

การศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมการรับน้ำหนักและออกแบบ Skew Bridge ใน กรณี Skew 50 องศา

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 30

A Study of Analysis for Load Bearing Behavior and Designing a Skew Bridge in the Case of a Skew 50 Degrees

The 30th National Convention on Civil Engineering

สอเจริญชัย พุทธาสมศรี^{1,*} ชลสิทธิ์ ขาดเชื้อ² ภัทรพล แก้วสอน³ ธวัชชัย เปาทัย⁴ ชัยยะ พิงโพธิ์สถ⁵ และ วัชราน รัตนอง⁶

^{1,2,3,4,5} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา-ชลประทาน วิทยาลัยการชลประทาน สถาบันสมทบมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.นนทบุรี

⁶ วิศวกรรมโยธาชำนาญการพิเศษ กรมชลประทาน

*Corresponding author; E-mail address: Chollasit.Char@gmail.com

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีการก่อสร้างสะพานอย่างแพร่หลาย และปัญหาในการก่อสร้างที่พบส่วนใหญ่คือ สิ่งกีดขวางในการก่อสร้างที่ไม่สามารถทำลายหรือเคลื่อนย้ายได้ เพื่อหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางเหล่านั้น โดยการปรับมุมสะพานให้พ้นแนวสิ่งกีดขวาง (Skew Bridge) ซึ่งกรมทางหลวงมีแบบมาตรฐานในการออกแบบไว้รองรับมุม Skew 0 - 45 องศา (กรมทางหลวง, 2015) ทำให้เป็นข้อจำกัดในการออกแบบก่อสร้างสะพานในบางพื้นที่ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษากฎการรับน้ำหนักในกรณี Skew 50 องศา โดยศึกษาออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงแบบ Plank Girder ช่วงความยาว Span 10 เมตร รวมถึงออกแบบ Cross Beam และ เสาตอม่อ วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม SAP 2000 และ CSI Bridge ในการวิเคราะห์โครงสร้าง ทั้งในกรณีไม่มีมุม Skew และ มุม Skew 45 องศา เพื่อเปรียบเทียบแบบมาตรฐาน จากนั้นทำการศึกษาและวิเคราะห์มุม Skew 50 องศา จากผลการศึกษาพบว่า โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางคานมีค่าลดลงและอยู่ใกล้มุมป้าน และเกิดโมเมนต์ลบ ที่มุมป้าน อีกทั้งแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่มุมป้านแล้วค่อยๆ ลดลง แบบไม่สม่ำเสมอตามแนวที่รองรับ รวมถึงการโก่งตัวสูงสุดที่เข้าใกล้มุมป้านมากขึ้น ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบ Plank Girder, Cross Beam และเสาตอม่อ เพื่อใช้ในการก่อสร้างสะพานในกรณีมุม Skew 50 องศา และยังแสดงให้เห็นถึงการเลือกใช้เหล็กเสริมพิเศษและลดในการออกแบบที่เพิ่มขึ้น

Abstract

Currently, extensive bridge construction is underway, and a major challenge encountered in such projects is the presence of immovable obstacles. To address these challenges, skew bridges are constructed to circumvent these obstacles. The Department of Highways has established standard bridge designs capable of

accommodating skew angles ranging from 0 to 45 degrees (Department of Highways, 2015), which poses limitations on bridge design in certain areas. This research study examines the load-bearing behavior of a 50-degree skew and designs a skew bridge by investigating the design of reinforced concrete plank girders with a span length of 10 meters. It also encompasses the design of cross beams and abutment piles. Analyze using SAP 2000 and CSI Bridge software to analyze the structure, both in cases of no skew and skew angles of 45 degrees. To compare with the standard design. Then, study and analyze the Skew angle of 50 degrees. The results revealed that the mid-span positive moment decreases and approaches the skew angle, while there is an increase in a negative moment at the skew angle. Additionally, the maximum shear force increases, reaching its peak at the skew angle, and then gradually decreases. This occurs in a non-linear manner, diverging from the supported standard design. Furthermore, there is an increase in the maximum deflection nearing the skew angle. The researchers have designed plank girders, cross beams, and abutment piles to be utilized in bridge construction for a 50-degree skew angle. It also demonstrates the increased use of special reinforcing bars and wires in the design.

1. คำนำ

ในปัจจุบันการก่อสร้างสะพานมีอย่างแพร่หลายและปัญหาในการก่อสร้างส่วนใหญ่มาจากข้อจำกัดด้านพื้นที่ในเขตเมืองซึ่งความแออัดของสิ่งปลูกสร้างที่ไม่สามารถทำลายหรือเคลื่อนย้ายได้และยังมีข้อจำกัดทางภูมิศาสตร์ เช่น ภูมิประเทศแบบภูเขา ทำให้ต้องมีการเบี่ยงแนวสะพาน

เพื่อให้ทันแนวโน้มสิ่งกีดขวาง โดยในปัจจุบันคู่มือการออกแบบสะพานตามมาตรฐานทางหลวง ได้มีแบบมาตรฐานสำหรับกรณีมุม Skew 0 – 45 องศา เท่านั้น รวมถึงยังไม่มีการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของสะพานในกรณีมุม Skew มากกว่า 45 องศา จึงใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสะพานในกรณีมุม Skew มากกว่า 45 องศา

ในการวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาคานคอนกรีตอัดแรงแบบ Plank Girder ซึ่งใช้ในการออกแบบ Skew Bridge ที่ 50 องศา โดยจะทำการศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตอัดแรงแบบ Pre-tension เมื่อมีน้ำหนักมากระทำกับโครงสร้าง

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1 เพื่อศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมการรับน้ำหนัก Skew Bridge ที่ 50 องศา
- 2.2 ออกแบบ Skew Bridge ที่ 50 องศาโดยมีองค์ประกอบคือ Plank Girder Cross Beam และตอม่อ
- 2.3 เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบก่อสร้างสะพานกรณีมุม Skew ที่ 50 องศา

3. ขอบเขตการวิจัย

- 3.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมและออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงแบบ Plank Girder ที่มีมุม Skew 50 องศา ระยะ Span ยาว 10 เมตร
- 3.2 คานสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบ Plank Girder แบบ Pre – Tension
- 3.3 วิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างโดยใช้โปรแกรม SAP 2000 และ CSI Bridge
- 3.4 แบบมาตรฐานโครงสร้างสะพานโดยกรมทางหลวง

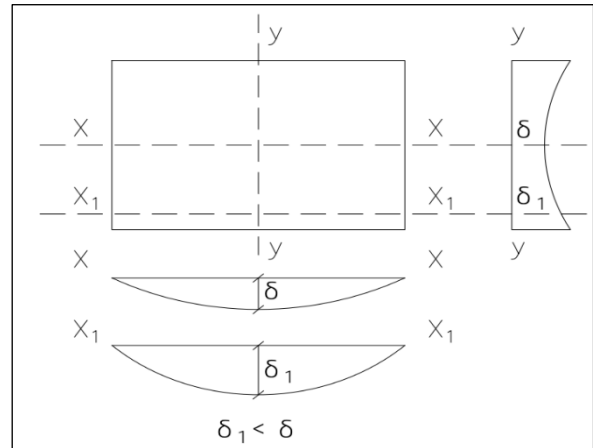
4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 4.1 ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของคานคอนกรีตอัดแรงแบบ Plank Girder ที่มีมุม Skew 50 องศา ระยะ Span ยาว 10 เมตร
- 4.2 ใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ หรือการเลือกใช้งานอย่างเหมาะสม ระหว่างคานคอนกรีตอัดแรงแบบ Plank Girder ในกรณีคิมุม Skew มากกว่า 45 องศา
- 4.3 สามารถนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้กับโครงสร้างอื่นที่เป็นคอนกรีตอัดแรง และมีพฤติกรรมรับน้ำหนัก หรือลักษณะโครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน

5. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

5.1 Behavior of Skew Bridge Decks.

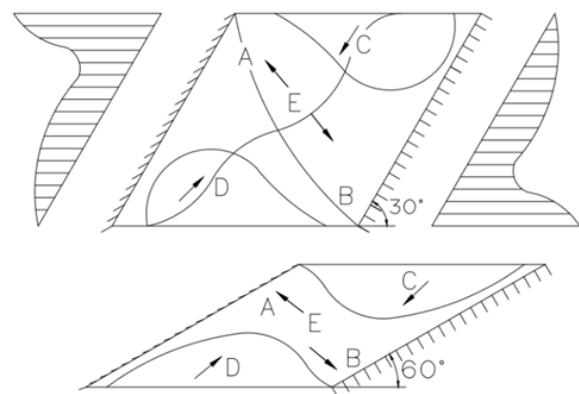
โดยปกติแล้วพื้นสะพานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะมีพฤติกรรมโค้งงอตั้งฉากในทิศทางตามยาวและตามขวาง โมเมนต์หลักอยู่ในทิศทางปกติของการเคลื่อนที่ โมเมนต์หลักสามารถจำแนกได้จากรูปแบบการเสียรูปดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นความจริง แต่ความเครียดที่เกิดจากการเสียรูปล้นเป็นการอนุมานโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปและความเครียดเท่านั้น



รูปที่ 1 Deflection Profiles in a Right Deck [13]

ในกรณีของแผ่นพื้นเอียง แรงที่ไหลระหว่างเส้นรองรับจะผ่านแถบของพื้นที่ที่เชื่อมต่อกับมุมป้าน และแผ่นพื้นจะโค้งตามแนวเส้นที่เชื่อมกับมุมป้านเป็นหลัก ความกว้างของแถบโค้งงอหลักนี้เป็นฟังก์ชันของมุมเอียงและอัตราส่วนความยาวช่วงเอียงและความกว้างของพื้น (อัตราส่วนกว้างยาว) พื้นที่ทั้งสองด้านของแถบไม่ได้ถ่ายโอนน้ำหนักไปยังส่วนรองรับโดยตรง แต่ถ่ายโอนน้ำหนักไปยังแถบในลักษณะคานยื่นเท่านั้น ดังนั้นแผ่นพื้นเอียงจึงเกิดโมเมนต์ดัดซึ่งมีความสำคัญอย่างมากต่อโครงสร้าง ดังนั้นจึงไม่สามารถละเลยได้ ด้วยเหตุนี้ ทิศทางโมเมนต์หลักจึงแปรผันและเป็นฟังก์ชันของมุมเอียงและอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว

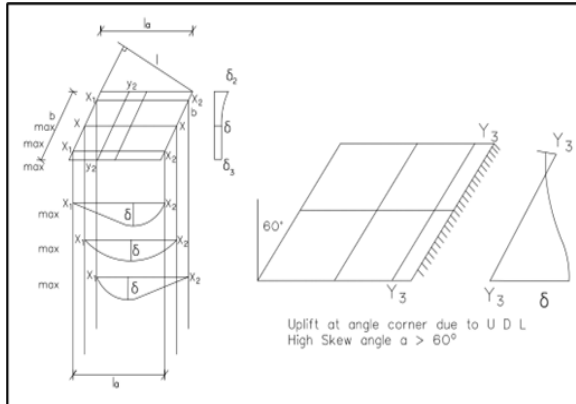
น้ำหนักจะถูกถ่ายโอนไปยังส่วนรองรับก่อนตามความยาวที่กำหนดตามแนวที่รองรับจากมุมป้าน ต่อมาแรงก็ถูกกระจายออกไปจนเต็มความยาวแรงที่แสดงในรูปที่ 2 (a และ b) เส้นบางๆ ในรูปที่ 1 (a) บ่งบอกถึงรูปร่างที่ผิดรูป การกระจายแรงปฏิกิริยาตามความยาวของส่วนรองรับจะแสดงที่ด้านรองรับทั้งสองข้างด้วย



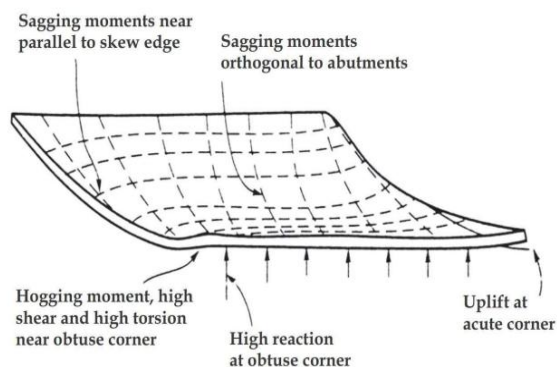
รูปที่ 2 (a and b) Force Flow in a Skew Deck [13]

จากรูปที่ 2 ในโซน AEB เป็นพื้นที่ที่มีระดับของการโค้งงอสูง แต่มีแรงบิดค่อนข้างต่ำ ส่วนในโซน C และ D เป็นพื้นที่ที่มีแรงบิดสูงแต่การโค้งงอต่ำ

สำหรับมุมเอียงเล็กๆ ขอบอิสระทั้งสองจะมีการโก่งตัวลงแต่มีขนาดต่างกัน โปรไฟล์การโก่งตัวของขอบอิสระจะไม่สมมาตรมากขึ้นเมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้น การโก่งตัวสูงสุดจะเคลื่อนไปทางมุมป้าน สำหรับมุมเอียงที่มีค่ามาก การโก่งตัวสูงสุดจะอยู่ใกล้กับมุมป้านมาก ใกล้มุมแหลมอาจมีการโก่งตัวเป็นลบด้วยซ้ำ ทำให้เกิดเส้นโค้งโก่งรูปตัว S ที่มีการบิดที่เกี่ยวข้องดังรูปที่ 3



รูปที่ 4 (a) Deflection Profile in a Skew Deck (b) “S” Shaped Deflection Profile Near the Support Line for Large Skew Angles [13]



รูปที่ 5 General Flexural Behavior of Skew Deck [13]

มุมเอียงที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้โมเมนต์ดัดลดลงแต่โมเมนต์บิดเพิ่มขึ้น พลังงานความเครียดทั้งหมดยังคงเท่าเดิม

5.2 Characteristics of Skew Decks.

5.2.1 แรงปฏิกิริยาสูงที่มุมป้าน

5.2.2 เป็นไปได้ว่าจะมีการยกตัวที่มุมแหลม โดยเฉพาะในกรณีที่มีมุม Skew มาก

5.2.3 เกิดโมเมนต์ลบตามแนวที่รองรับ แรงเฉือนและแรงบิดจะสูงใกล้มุมป้าน

5.2.4 โมเมนต์บวกจะตั้งฉากกับที่รองรับในบริเวณกึ่งกลาง

5.2.5 ที่ขอบอิสระโมเมนต์ดัดสูงสุดจะอยู่ใกล้มุมป้าน ค่อนข้างมากกว่าบริเวณกึ่งกลาง

5.2.6 จุดที่เกิดการโก่งตัวสูงสุดจะอยู่ใกล้มุมป้าน (การเคลื่อนตัวของจุดที่เกิดการโก่งตัวสูงสุด จะเคลื่อนไปทางมุมป้านมากขึ้นถ้ามีมุม Skew มากขึ้น)

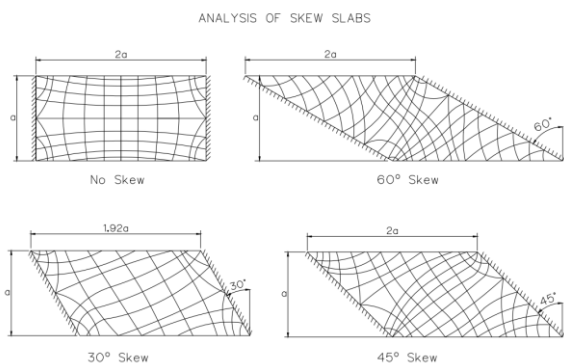
5.2.7 โมเมนต์ตามยาวที่สูงสุดและการโก่งตัวจะลดลง เมื่อมุม Skew มากขึ้น

5.2.8 เมื่อมุม Skew มากขึ้น แรงปฏิกิริยาจะสูงขึ้นไปทางมุมป้าน และน้อยลงที่มุมแหลม เพราะฉะนั้นการกระจายตัวของแรงปฏิกิริยาจะไม่สม่ำเสมอบนแนวที่รองรับ

ปกติแล้วสำหรับมุมเอียงไม่เกิน 15 องศา ผลของ Skew ต่อค่าโมเมนต์หลักและทิศทางจะมีน้อยมากเมื่อมุม Skew เพิ่มขึ้นเกิน 15 องศา จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ที่แม่นยำยิ่งขึ้น

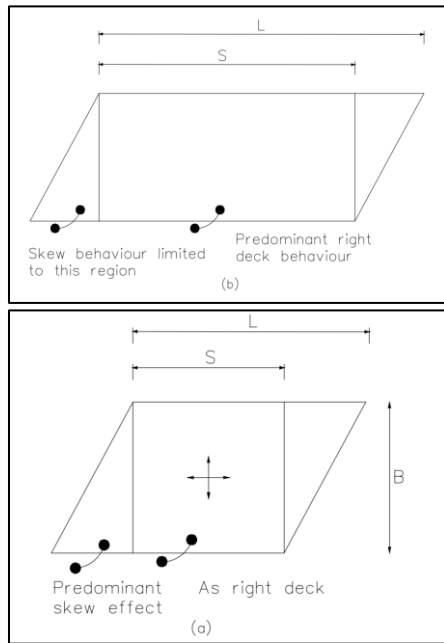
หากความกว้างของแผ่นคอนกรีตมีขนาดใหญ่ ส่วนของคานยื่นจากแถบดัดโค้งหลักที่ติดกับมุมป้านจะมีขนาดใหญ่เพื่อลดโมเมนต์การบิดบนพื้นที่รับน้ำหนักที่ติดกับมุมป้าน สามารถใช้ที่รองรับแบบยึดหยุ่นตามแนวขอบอิสระของแผ่นคอนกรีต (คานตัวริม) มันจะทำหน้าที่เป็นแนวที่รองรับสำหรับแผ่นคอนกรีต จะช่วยเป็นที่รองรับที่ยึดหยุ่นในทิศทางตามขวางสำหรับพื้น เพื่อป้องกันพฤติกรรมคานยื่นในสามเหลี่ยมมุมแหลม

ที่ได้ทำการอธิบายไปแล้วว่าที่บริเวณตรงกลางของแผ่นพื้น มีโมเมนต์บวกมาก โดยมีทิศทางของการดัดงอ ค่อนไปตามแนวที่ติดกับมุมป้าน ในทางตรงกันข้าม ในส่วนท้ายของสามเหลี่ยม มีทิศทางดัดงอที่แตกต่างกับมุมบิดที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 6 Principal Stress Trajectories for Various Skew Angles [13]

ถ้าในบริเวณที่เป็นสามเหลี่ยมนั้นเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณสี่เหลี่ยมตรงกลางผลกระทบของมุมเอียงจะถูกจำกัดในส่วนท้ายภาพที่ 7



รูปที่ 7 (a) Wide skew deck without edge beam (b) Wide skew deck with edge beam [13]

ถ้า L คือระยะลาดเอียง (ระยะวัดตามขอบอิสระ) และ B คือความกว้างจริง S สามารถกำหนดเป็นระยะพื้นจริง [ความยาวของแผ่นคอนกรีตระหว่างมุมป้านและมุมแหลมตามทิศทางของความยาว รูปที่ 7 (a และ b)] เอฟเฟกต์การเอียงไม่มีนัยสำคัญหาก $S/L > 0.75$ หาก S/L อยู่ที่ 0.5 ถึง 0.75 จำเป็นต้องพิจารณาเอฟเฟกต์การเอียง และ สำหรับ $S/L < 0.5$ พฤติกรรมการเอียงจะมีอิทธิพลกับพื้นที่ทั้งหมดของพื้น

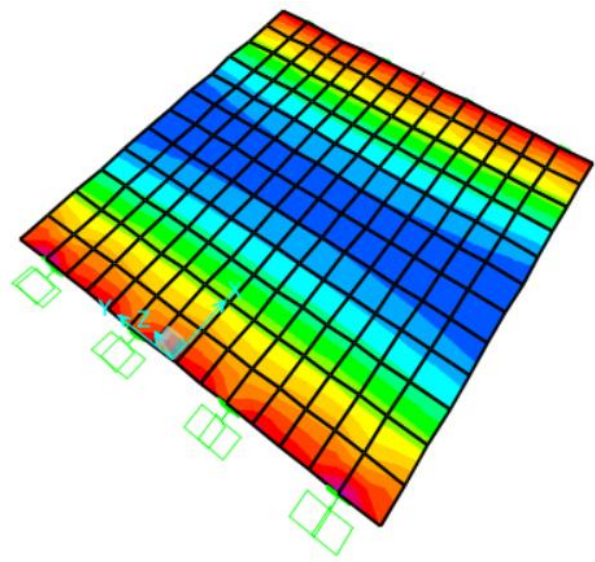
ในกรณีของแผ่นพื้นซึ่งมีความกว้างมากกว่ามากเมื่อเทียบกับระยะ Span เอฟเฟกต์การเอียงจะมีความโดดเด่น น้อยกว่า ดังนั้นจึงต้องพิจารณาเอฟเฟกต์การเอียงจนถึงค่า $L/B = 0.5$ หาก B มากกว่า $2L$ พฤติกรรมจะต้องเป็นไปตาม การโค้งงอในทิศทางเดียว ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบมุมเอียง

ในกรณีของ $S/L < 0.5$ มีความต้องการให้มีความหนาและแผ่นพื้นเพื่อให้มีความแข็งแรงด้านแรงบิดสูงสำหรับพื้น สามารถใช้คานหลายคานที่มีระยะชิดกันพร้อมแผ่นพื้นแบบหล่อในที่ได้ หากมีข้อจำกัดด้านความลึก

6. วิธีการดำเนินการวิจัย

6.1 ตรวจสอบกระบวนการออกแบบกรณีที่ไม่มิมุม Skew

ในขั้นตอนนี้ผู้จัดทำได้ทำการตรวจสอบกระบวนการวิเคราะห์และออกแบบโดยอ้างอิงจากแบบมาตรฐานกรมทางหลวง โดยทำการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างสะพานด้วยโปรแกรม CSI Bridge ในกรณีที่ไม่มีมุม Skew เมื่อมีน้ำหนักรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HL-93 มากระทำในโครงสร้าง แรงจะไหลเข้าสู่ Support ทั้งสองข้างเท่าๆ กัน หรือถูกถ่ายหน่วยแรง (Stress) ด้วยระยะเท่ากัน อาจกล่าวได้ว่า แรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับนั้นจะสมมาตรซ้ายขวาดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การกระจาย Stress ในกรณีไม่มีมุม Skew
หน่วยแรงบนหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรง

$$f_{top} = \frac{P}{A} - \frac{P_{ec}}{I} + \frac{M_c}{I} \quad (1)$$

$$f_{bottom} = \frac{P}{A} + \frac{P_{ec}}{I} - \frac{M_c}{I} \quad (2)$$

การ Debond ของคาน Pre-Tension

$$\text{จำนวนลวดอัดแรง} = 16 \quad \text{เส้น}$$

$$\text{Debond} = 2 \quad \text{เส้น}$$

$$\text{เหลือ} = 14 \quad \text{เส้น}$$

$$P_j = \frac{180,000}{9.81} \times 14$$

$$= 256,880.7 \text{ kg}$$

$$e = 12.19 \text{ cm}$$

หน่วยแรงบนหน้าตัด

ตารางที่ 1 หน่วยแรงบนหน้าตัดในสภาวะถ่ายแรงกรณีไม่มีมุม SKEW

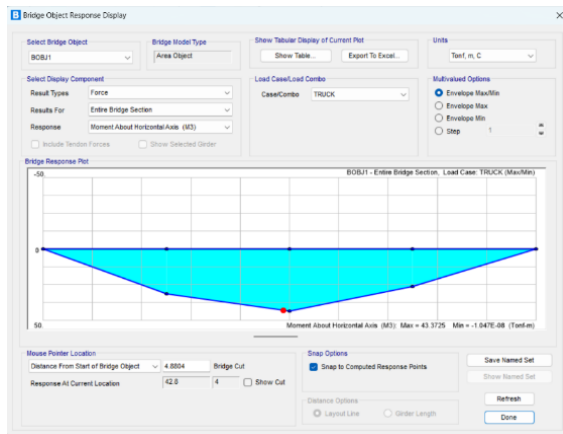
Station (m)	P/A (ksc)	P _{ec} /I (TOP) (ksc)	P _{ec} /I (BOT) (ksc)	M _c /I (TOP) (ksc)	M _c /I (BOT) (ksc)	f (TOP) (ksc)	f (BOT) (ksc)
0.00	86.59	178.01	171.82	0.00	0.00	-91.42	258.41
1.00	86.59	178.01	171.82	18.21	17.58	-73.21	240.83
2.00	86.59	178.01	171.82	32.38	31.25	-59.04	227.16
3.00	86.59	178.01	171.82	42.50	41.02	-48.92	217.39
4.00	86.59	178.01	171.82	48.57	46.88	-42.85	211.53
5.00	86.59	178.01	171.82	50.59	48.83	-40.83	209.58
6.00	86.59	178.01	171.82	48.57	46.88	-42.85	211.53
7.00	86.59	178.01	171.82	42.50	41.02	-48.92	217.39
8.00	86.59	178.01	171.82	32.38	31.25	-59.04	227.16
9.00	86.59	178.01	171.82	18.21	17.58	-73.21	240.83
10.00	86.59	178.01	171.82	0.00	0.00	-91.42	258.41

ตารางที่ 2 หน่วยแรงบนหน้าตัดในสภาวะใช้งานกรณีไม่มีมุม SKEW

Station (m)	P _i /A (ksc)	P _{ec} /I (TOP) (ksc)	P _{ec} /I (BOT) (ksc)	M _c /I (TOP) (ksc)	M _c /I (BOT) (ksc)	f (TOP) (ksc)	f (BOT) (ksc)
0.00	74.10	152.34	147.03	0.00	0.00	-78.24	221.13
1.00	74.10	152.34	147.03	67.76	65.40	-10.48	155.73
2.00	74.10	152.34	147.03	106.46	102.75	28.22	118.38
3.00	74.10	152.34	147.03	129.99	125.46	51.75	95.67
4.00	74.10	152.34	147.03	155.83	150.41	77.59	70.72
5.00	74.10	152.34	147.03	161.62	156.00	83.38	65.13
6.00	74.10	152.34	147.03	155.83	150.41	77.59	70.72
7.00	74.10	152.34	147.03	129.99	125.46	51.75	95.67
8.00	74.10	152.34	147.03	106.46	102.75	28.22	118.38
9.00	74.10	152.34	147.03	67.76	65.40	-10.48	155.73
10.00	74.10	152.34	147.03	0.00	0.00	-78.24	221.13

กำลังรับโมเมนต์

จากการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างสะพานในกรณีไม่มีมุม Skew ด้วยโปรแกรม CSI Bridge ผลที่ได้คือ ค่าโมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างสะพานที่แสดงในรูปที่ 10 เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบกำลังรับโมเมนต์



รูปที่ 10 ผลแสดงโมเมนต์จากโปรแกรม CSI Bridge กรณีไม่มีมุม Skew

$$M_n = \left(A_p \times f_{ps} \left(d_p - \frac{a}{2} \right) \right) + \left(A_s \times f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \right) \quad (3)$$

$$M_n = 77.65 \text{ T.m}$$

$$\phi M_n = 0.9 \times 77.65$$

$$= 69.89 \text{ T.m}$$

โมเมนต์ที่เกิดขึ้น

$$M_u = 1.3(DL+1.67LL) \quad (4)$$

$$= 1.3(13.950)+1.3(1.67)(16.238)$$

$$= 53.388 \text{ T.m} \quad ; \text{ OK}$$

กำลังรับแรงเฉือน

$$\text{หน้าตัดวิกฤต } d/2 \text{ จากปลายคานา} = 30/2$$

$$= 15 \text{ cm}$$

$$= 0.15 \text{ m}$$

$$V_{ci} = 37.095 \text{ T} > 0.45 \sqrt{f'_c} b_w d_p$$

$$V_{cw} = 119.843 \text{ T}$$

$$\text{ดังนั้น } V_c = \min\{V_{ci}, V_{cw}\} = 37.095 \text{ T}$$

$$\text{ได้ } \phi V_c = 0.85 \times 37.095 = 31.531 \text{ T}$$

$$\text{จาก } \frac{V_c}{2} = \frac{37.095}{2} = 18.548 \text{ T}$$

$$\frac{V_u}{\phi} = \frac{24.096}{0.85} = 28.348 \text{ T}$$

$$> \frac{V_c}{2} (18.548 \text{ T})$$

ใส่เหล็กปลอกชั้นต่ำ

เลือกใช้เหล็ก RB9 ; $A_v = 0.636$

$$\text{ได้ } S = \frac{0.636}{0.028} = 22.71 \text{ cm}$$

ระยะเรียงสูงสุดต้องไม่เกิน 0.75h หรือ 60 cm

$$= 0.75 \times 35$$

$$= 26.25 \text{ cm ใช้ระยะเรียง } 15 \text{ cm ตามแบบมาตรฐาน}$$

การโค้งตัว

1.สภาวะถ่ายแรง

-เนื่องจากการอัดแรง 3.64 cm

-เนื่องจากน้ำหนักคอนกรีต 1.27 cm สุทธิ 2.37 cm

2.สภาวะใช้งาน

-เนื่องจากการอัดแรง 3.12 cm

-เนื่องจากน้ำหนักคอนกรีต 1.27 cm

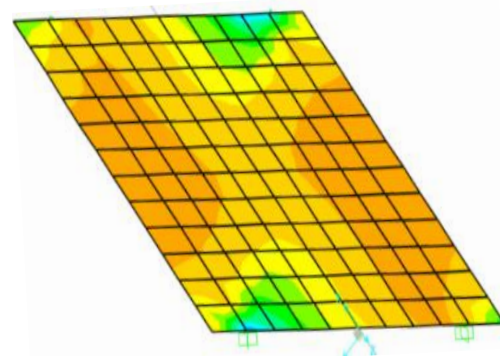
-เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร 1.75 cm สุทธิ 0.096 cm

จากการตรวจสอบกระบวนการวิเคราะห์และออกแบบเพื่อเทียบกับแบบมาตรฐานกรมทางหลวงแล้วปรากฏว่าได้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องและไปในทิศทางเดียวกันกับแบบมาตรฐานกรมทางหลวงซึ่งอนุมานได้ว่ากระบวนการออกแบบและขั้นตอนการศึกษานั้นมีความถูกต้อง

7. ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

7.1 กรณีมุม Skew 50 องศา

จากการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างสะพานด้วยโปรแกรม CSI Bridge ในกรณีมุม Skew 50 องศา เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกทุกตามมาตรฐาน AASHTO HL-93 มากระทำในโครงสร้าง แรงจะไหลเข้าสู่ Support ทั้งสองข้างไม่เท่ากัน เพราะว่าจะแรงจะถูกถ่ายไปยัง Support ที่ใกล้ที่สุดก่อน จากนั้นจึงจะกระจายไปทั่วแนวที่รองรับ จึงเป็นสาเหตุที่บริเวณมุมป้านมี Stress ที่สูงกว่าเนื่องจากมีแรงที่มากในบริเวณนี้ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 การกระจาย Stress บนโครงสร้างสะพาน กรณีมุม Skew 50 องศา

หน่วยแรงบนหน้าตัด

ตารางที่ 3 หน่วยแรงบนหน้าตัดในสภาวะถ่ายแรงกรณีมุม SKEW 50 องศา

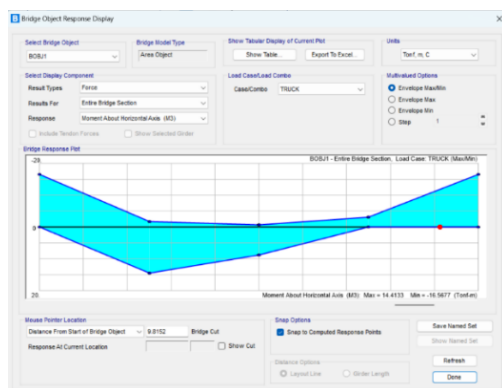
Station (m)	P _i /A (ksc)	P _{ec} /I (TOP) (ksc)	P _{ec} /I (BOT) (ksc)	M _c /I (TOP) (ksc)	M _c /I (BOT) (ksc)	f (TOP) (ksc)	f (BOT) (ksc)
0.00	96.27	197.90	191.02	0.00	0.00	-101.63	287.29
1.00	96.27	197.90	191.02	18.21	17.58	-83.42	269.71
2.00	96.27	197.90	191.02	32.38	31.25	-69.25	256.04
3.00	96.27	197.90	191.02	42.50	41.02	-59.13	246.27
4.00	96.27	197.90	191.02	48.57	46.88	-53.06	240.41
5.00	96.27	197.90	191.02	50.59	48.83	-51.04	238.46
6.00	96.27	197.90	191.02	48.57	46.88	-53.06	240.41
7.00	96.27	197.90	191.02	42.50	41.02	-59.13	246.27
8.00	96.27	197.90	191.02	32.38	31.25	-69.25	256.04
9.00	96.27	197.90	191.02	18.21	17.58	-83.42	269.71
10.00	96.27	197.90	191.02	0.00	0.00	-101.63	287.29

ตารางที่ 4 หน่วยแรงบนหน้าตัดในสภาวะใช้งานกรณีมุม SKEW 50 องศา

Station (m)	P _i /A (ksc)	P _{ec} /I (TOP) (ksc)	P _{ec} /I (BOT) (ksc)	M _c /I (TOP) (ksc)	M _c /I (BOT) (ksc)	f (TOP) (ksc)	f (BOT) (ksc)
0.00	80.73	165.97	160.19	-32.39	-31.26	-117.63	272.18
1.00	80.73	165.97	160.19	6.00	5.79	-79.24	235.13
2.00	80.73	165.97	160.19	70.81	68.34	-14.43	172.58
3.00	80.73	165.97	160.19	89.11	86.01	3.87	154.91
4.00	80.73	165.97	160.19	93.00	89.77	7.76	151.15
5.00	80.73	165.97	160.19	90.78	87.62	5.54	153.30
6.00	80.73	165.97	160.19	81.10	78.27	-4.14	162.65
7.00	80.73	165.97	160.19	66.10	63.80	-19.14	177.12
8.00	80.73	165.97	160.19	36.19	34.93	-49.05	205.99
9.00	80.73	165.97	160.19	4.86	4.69	-80.38	236.23
10.00	80.73	165.97	160.19	-32.39	-31.26	-117.63	272.18

กำลังรับโมเมนต์

จากการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างสะพานในกรณีมุม Skew 50 องศา โดยโปรแกรม CSI Bridge ผลที่ได้คือ ค่าโมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างสะพานดังแสดงในรูปที่ 13 เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบกำลังรับโมเมนต์



รูปที่ 13 ผลแสดงโมเมนต์จากโปรแกรม CSI Bridge กรณีมุม Skew 50 องศา

$$M_n = \left(A_p \times f_{ps} \left(d_p - \frac{a}{2} \right) \right) + \left(A_s \times f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \right) \quad (3)$$

$$M_n = 16.145 \quad \text{T.m}$$

$$\phi M_n = 0.9 \times 16.145$$

$$= 14.53 \quad \text{T.m}$$

โมเมนต์ที่เกิดขึ้น

$$M_u = 1.3(DL + 1.67LL)$$

$$= 13.48 \quad \text{T.m} \quad ; \text{OK}$$

กำลังรับแรงเฉือน

$$\text{หน้าตัดวิกฤต } d/2 \text{ จากปลายคาน} = 30/2$$

$$= 15 \text{ cm}$$

$$= 0.15 \text{ m}$$

$$V_{ci} = 213.577 \quad \text{T} > 0.45 \sqrt{f'_c} b_w d_p$$

$$V_{cw} = 125.356 \quad \text{T}$$

$$\text{ดังนั้น } V_c = \min\{V_{ci}, V_{cw}\} = 125.356 \quad \text{T}$$

$$\text{ได้ } \phi V_c = 0.85 \times 125.356 = 106.553 \quad \text{T}$$

$$\text{จาก } \frac{V_c}{\frac{2}{\phi}} = \frac{125.356}{\frac{2}{0.85}} = 62.678 \quad \text{T}$$

$$= \frac{76.487}{0.85} = 89.985 \quad \text{T}$$

$$> \frac{V_c}{2} (62.678 \text{ T})$$

ใส่เหล็กปลอกชั้นต่ำ

$$\text{เลือกใช้เหล็ก RB9} \quad ; A_v = 0.636$$

$$\text{ได้ } S = \frac{0.636}{0.031} = 20.52 \quad \text{cm}$$

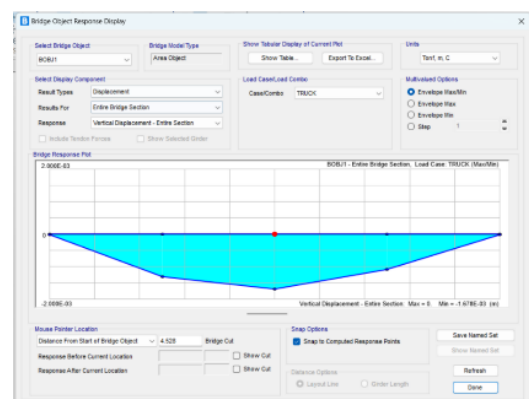
ระยะเรียงสูงสุดต้องไม่เกิน 0.75h หรือ 60 cm

$$= 0.75 \times 35$$

$$= 26.25 \text{ cm ใช้ระยะเรียง } 15 \text{ cm ตามแบบมาตรฐาน}$$

7.2 การโค้งตัว

จากการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างสะพานในกรณีมุม Skew 50 องศา โดยโปรแกรม CSI Bridge จะเกิดการโค้งตัวเนื่องจากหน่วยแรงในพื้นที่ที่รองรับบริเวณมุมป้านนั้นค่าสูง ทำให้เกิดแรงในบริเวณนั้นสูง ซึ่งจะทำให้การโค้งตัวสูงสุดของคานนั้นจะอยู่ใกล้กับ Support บริเวณมุมป้านมากกว่า

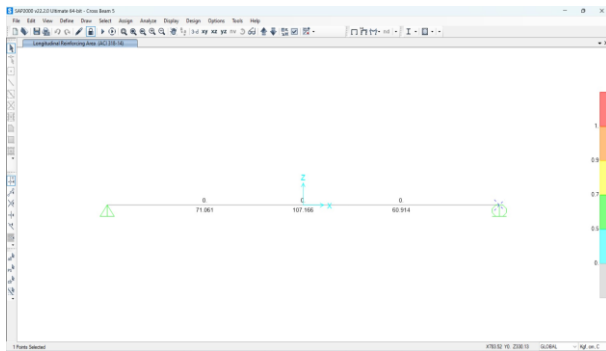


รูปที่ 14 ผลแสดงการการโค้งตัวจากโปรแกรม CSI Bridge กรณีมุม Skew 50 องศา

7.3 Cross Beam

ผลจากการวิเคราะห์แรงที่กระทำลงบน Cross Beam โดยใช้โปรแกรม SAP 2000 แสดงให้เห็นถึงปริมาณพื้นที่หน้าตัดของเหล็กแกนที่ต้องการ และปริมาณพื้นที่หน้าตัดเหล็กปลอกที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 15 เพื่อนำค่าไป

ใช้ในการตรวจสอบการออกแบบปริมาณการเสริมเหล็กของ Cross Beam เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการออกแบบ



รูปที่ 15 ผลวิเคราะห์แสดงปริมาณการเสริมเหล็กบนหน้าตัด Cross Beam ของเหล็กแกน

ขนาดหน้าตัดและค่า Mu

ลองเลือกใช้น้ำตัด 0.65x1.3 m (DL = 0.65x1.3x2,400 = 2,028 kg/m)

$$\begin{aligned} W_u &= 1.4DL + 1.7LL \\ &= 1.4(2,028) + 1.7(24,531) \\ &= 44,541.9 \text{ kg/m} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} M_u &= \frac{W_u L^2}{8} \\ &= \frac{44.54 \times 10^2}{8} \\ &= 556.753 \text{ T.m} \end{aligned} \quad (6)$$

หาค่า A_s และเหล็กเสริม

$$\begin{aligned} A_s &= pbd \\ &= 0.0189 \times 65 \times 120 \\ &= 147.42 \text{ cm}^2 \\ \text{เสริมเหล็ก 2 ชั้น 12-DB40} &= 12 \times \frac{\pi}{4} \times 4^2 \\ &= 150.796 \text{ cm}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

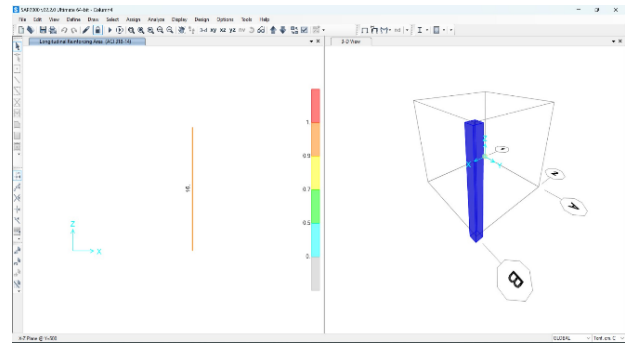
แรงเฉือนที่หน้าตัดวิกฤตเกิดขึ้นที่ระยะ d จากขอบที่รองรับ และเสริมเหล็ก 2 ชั้น d = 1.3-0.1

$$\begin{aligned} V_u &= 222,701 - 44,540.2(1.2) \\ &= 169,252 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เลือกเหล็กปลอก DB12; S} &= \frac{\phi A_v f_y d}{\phi V_s} \\ &= \frac{0.85 \times 6 \times 1.13 \times 4,000 \times 120}{103,513} \\ &= 26.72 \text{ cm} \\ \text{ใช้} &= 20 \text{ cm} \end{aligned} \quad (8)$$

7.4 เสาตอม่อ

ผลจากการวิเคราะห์แรงที่กระทำลงบนเสาตอม่อ โดยใช้โปรแกรม SAP 2000 แสดงให้เห็นถึงปริมาณพื้นที่หน้าตัดของเหล็กแกนที่ต้องการ ดังรูปที่ 16 เพื่อนำค่าไปใช้ในการตรวจสอบการออกแบบปริมาณการเสริมเหล็กของเสาตอม่อ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการออกแบบ



รูปที่ 16 ผลวิเคราะห์แสดงปริมาณการเสริมเหล็กในเสาตอม่อ

น้ำหนักประลัย $P_u = 164,103 \text{ kg}$

ขนาดหน้าตัดเสา

สมมติการเสริมเหล็กในหน้าตัดเสา $A_{st} = 0.04A_g$

$$\phi P_n = 0.8\phi(0.85f'_c A_g + f_y A_{st}) \quad (9)$$

เมื่อ $\phi = 0.7$

$$A_g = 641 \text{ cm}^2$$

ลองเลือกหน้าตัด 0.40x0.40 m ($A_g = 1,600 \text{ cm}^2$)

การเสริมเหล็กในหน้าตัดเสา

1. เหล็กเสริมหลัก

$$\phi P_n = 0.8\phi(0.85f'_c A_g + f_y A_{st}) \quad (9)$$

เมื่อ $\phi = 0.7$

$$A_g = -45.41 \text{ cm}^2$$

เสริมเหล็ก 4-DB25 ($A_s = 19.64 \text{ cm}^2$)

$$\begin{aligned} P &= \frac{A_{st}}{A_g} \\ &= 0.014 \text{ อยู่ระหว่าง } 0.01-0.08 \text{ ; ok} \end{aligned} \quad (10)$$

2. เหล็กปลอก

จากขนาดและจำนวนเหล็กเสริมหลัก ใช้เหล็กปลอก ใช้เหล็กปลอก RB9

จำนวน 1 ปลอกระยะห่างไม่เกิน

$$48 \text{ เท่าของ Dai. เหล็กปลอก} = 43.2 \text{ cm.}$$

$$16 \text{ เท่าของ Dai. เหล็กยื่น} = 40 \text{ cm.}$$

$$\text{ด้านแคบ} = 40 \text{ cm.}$$

ใช้เหล็กปลอก RB9 @ 0.3

8. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

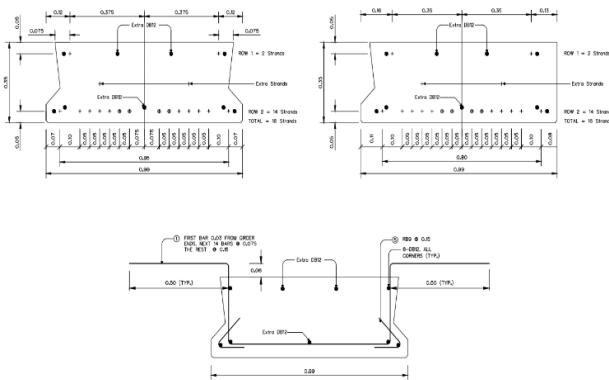
8.1 สรุปผลการศึกษา

8.1.1 สรุปผลการศึกษาตามวัตถุประสงค์ที่ 1 (เพื่อศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมการรับน้ำหนัก Skew Bridge ที่มุม 50 องศา) จากการศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมการรับน้ำหนัก Skew Bridge ที่ 50 องศา พบว่าจะเกิดแรงปฏิกิริยาและแรงเฉือนสูงสุดที่มุมป้าน ซึ่งเป็นพื้นที่ที่แรงกระทำนั้นถูกถ่ายมายังพื้นที่บริเวณนี้เป็นอันดับแรกมีค่า 24.531 T อีกทั้งเกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดตามแนวที่

รองรับมีค่า 16.568 T-m และการโก่งตัวสูงสุดนั้นจะอยู่ใกล้กับ Support บริเวณมุมบ้าน

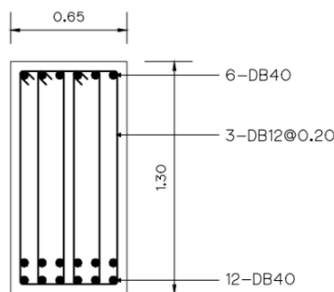
8.1.2 สรุปผลการศึกษาตามวัตถุประสงค์ที่ 2 (ออกแบบ Skew Bridge ที่มุม 50 องศาโดยมีองค์ประกอบคือ Plank Girder Cross Beam และตอม่อ) จากการออกแบบ Skew Bridge ที่มุม 50 องศาทำให้ทราบรายละเอียดองค์ประกอบของสะพาน ดังนี้

ก. Plank Girder เลือกใช้ขนาดหน้าตัดความกว้าง 0.99 เมตร ความลึก 0.35 เมตร ประกอบด้วยลวดทั้งหมดจำนวน 18 เส้น จำแนกเป็น ผิวบน 2 เส้น กึ่งกลาง 2 เส้นและผิวล่าง 14 เส้น เหล็กเสริมหลัก DB12 จำนวน 6 เส้นจำแนกเป็นผิวบน 2 เส้นและผิวล่าง 4 เส้น เหล็กเสริมพิเศษ DB12 จำนวน 3 เส้นจำแนกเป็นผิวบน 2 เส้นและผิวล่าง 1 เส้น และเลือกใช้ เหล็ก RB9 ระยะเรียง 15 เซนติเมตร



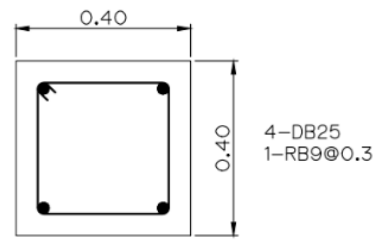
รูปที่ 17 รายละเอียด Plank Girder

ข. Cross Beam เลือกใช้ขนาดหน้าตัดความกว้าง 0.65 เมตร ความลึก 1.3 เมตร ประกอบด้วยเหล็กเสริมหลัก DB40 จำนวน 18 เส้น จำแนกเป็นผิวบน 6 เส้นและผิวล่าง 12 เส้น เหล็กปลอก DB12 ระยะเรียง 0.20 จำนวน 3 เส้น



รูปที่ 18 รายละเอียด Cross beam

ค. ตอม่อ เลือกใช้ขนาดหน้าตัดความกว้าง 0.4 เมตร ความลึก 0.4 เมตร ประกอบด้วยเหล็กเสริมหลัก DB25 จำนวน 4 เส้น เหล็กปลอก RB9 ระยะเรียง 0.30 จำนวน 1 เส้น



รูปที่ 19 รายละเอียดตอม่อ

8.1.3 สรุปผลการศึกษาตามวัตถุประสงค์ที่ 3 (เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบก่อสร้างสะพานกรณีมุม Skew ที่มุม 50 องศา) จากการศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมการรับน้ำหนักและออกแบบ Skew Bridge ในกรณีมุม Skew 50 องศา แสดงให้เห็นถึงการเลือกใช้เหล็กเสริมพิเศษและลวดในการออกแบบที่เพิ่มขึ้นจากแบบมาตรฐาน Plank Girder Span 10 เมตร ของกรมทางหลวง เพื่อให้สามารถรับโมเมนต์และความเค้นที่มากขึ้น ทั้งนี้ในอนาคตอาจนำมาเป็นแนวทางในการออกแบบ Skew Bridge ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความปลอดภัยต่อโครงสร้างที่มีการรับน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป จึงต้องออกแบบ Cross Beam และตอม่อให้มีพฤติกรรมการรับน้ำหนักที่สอดคล้องกับ Plank Girder ตามลำดับ

8.2 การนำไปใช้ประโยชน์

สามารถนำข้อมูลการออกแบบ Skew Bridge ที่มุม Skew 50 องศา ที่มีความยาวสะพาน 10 เมตร จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบหรือเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงานและสถานที่ที่ต้องการ และไปประยุกต์ใช้กับโครงสร้างอื่น ๆ ที่มี Skew Bridge ที่คล้ายคลึงกัน

8.3 ปัญหาและอุปสรรค

8.3.1 ข้อจำกัดเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ของโปรแกรม SAP 2000 ไม่สามารถวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างสะพานเมื่อมี Moving Load มากระทำ จึงต้องมีการเพิ่มโปรแกรม CSI Bridge เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน

8.3.2 การใช้งานของโปรแกรม CSI Bridge ที่มีความทันสมัยและซับซ้อนของเครื่องมือในการวิเคราะห์ ทำให้การดำเนินงานวิจัยเกิดความล่าช้ามากยิ่งขึ้น เนื่องจากต้องทำการศึกษาวิธีการใช้งานของเครื่องมือเพิ่มเติม

8.4 ข้อเสนอแนะ

8.4.1 ควรเพิ่มการศึกษาวิเคราะห์ Skew Bridge ให้มีมุมเอียง(Skew) ที่หลากหลายกว่านี้ เพื่อจะได้ผลจากการวิเคราะห์ออกมาครอบคลุมและหลากหลายต่อการออกแบบโครงสร้างสะพาน

8.4.2 ควรมีการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักคานคอนกรีตอัดแรง Plank Girder แบบ Pre Tension ที่มีความยาวที่มากกว่า 10 เมตร เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลวิเคราะห์พฤติกรรมการรับน้ำหนักคานคอนกรีตอัดแรงที่ความยาวต่างกัน

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมโยธา-ชลประทาน เรื่อง การศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมการรับน้ำหนักและออกแบบ Skew Bridge ในกรณี Skew 50 องศา อันเนื่องมาจากข้อจำกัดด้านพื้นที่ในเขตเมืองที่แออัดและข้อจำกัดทางภูมิศาสตร์ ทำให้ต้องมีการเบี่ยงแนวสะพาน โครงการนี้สามารถดำเนินการจนประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนเป็นอย่างดีจากท่าน อาจารย์วิรัช ธารนง ที่กรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะและปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนกระทั่งโครงการครั้งนี้สำเร็จเรียบร้อยได้ด้วยดี ผู้จัดทำโครงการตระหนักถึงความตั้งใจและความทุ่มเทของอาจารย์และกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

คุณค่าและประโยชน์ของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ ผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณ บพท บวรพจน์และผู้ที่มีส่วนช่วยเหลือทุกท่านที่มีส่วนส่งเสริมให้ผู้ศึกษาประสบความสำเร็จในการดำเนินชีวิตและก้าวหน้าในหน้าที่การงาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] กิตติกรรมประกาศ ปิ่นละมัย(2559).การตรวจสอบพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานกล่องคอนกรีตอัดแรงเพื่อการซ่อมแซมและบำรุงรักษาสะพานแหล่งที่มา:<http://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/.pdf>
- [2] ต่อกุล กาญจนาลัย(ม.ป.ป.).การออกแบบคอนกรีตอัดแรง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา , กรุงเทพฯ
- [3] อธิวิทย์ ชัยนี และสุนิธิ สุภาพ(2559).ผลกระทบของมุมเฉียงที่มีต่อการกระจายน้ำหนักบรรทุกทุกไทยในสะพานคอนกรีตความยาวช่วงปานกลาง แหล่งที่มา <https://ph01.tcithaijo.org>
- [4] นเรศวร พันธธธร(2555).การเสถียรของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง แหล่งที่มา : <https://engfanatic.tumcivil.com>
- [5] ปกรณ์ภัทร บุคชา(2562).ผลกระทบของมาตรการออกแบบสะพานเพื่อต้านการไหวสะเทือนของไทยที่มีต่ออัตราส่วนความต้องการต่อวิสัยความสามารถของเสาเดี่ยวกอนกรีตเสริมเหล็ก , แหล่งที่มา : <http://irithesis.swu.ac.th>
- [6] มงคล จิรวรรณเดช. (2566).การศึกษาวิเคราะห์และออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพคานสะพานคอนกรีตอัดแรงชนิด I- Girder, แหล่งที่มา : <https://www.conference.thaince.org>
- [7] สุนิธิ สุภาพ และภานุวัฒน์ จ้อยกลัด. (2554).การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของสะพานช่วงเดียวแบบรองรับธรรมดาเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกไทย แหล่งที่มา: <https://ph01.TciThaijo.org>
- [8] สุนิธิ สุภาพ และภานุวัฒน์ จ้อยกลัด. (2554).การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของสะพานช่วงเดียวแบบรองรับธรรมดาเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกไทย แหล่งที่มา: <https://ph01.TciThaijo.org>
- [9] Kathir (2018). Pre-Tensioning and Post-Tensioning Method Available Source: <https://civilsnapshot.com>
- [10] Nikhil, V. and Deshmukh, Dr. U. P. Waghe. (2015). Analysis and Design of Skew Bridges. Available Source [https://Analysis and Design of Skew Bridges \(ijsr.net\)](https://Analysis and Design of Skew Bridges (ijsr.net)),
- [11] Pranathi Reddy and Karuna S. (2015). COMPARATIVE STUDY ON NORMAL AND SKEW BRIDGE OF PSC BOX GIRDER. Available Source <https://ijret.org/volumes/2015v04/i06/IJRET20150406017.pdf>
- [12] LIN and NED H. BURNS. (1981). DESIGN OF PRESTRESSED CONCRETE STRUCTURES THIRD EDITION. Available Source <https://www.academia.edu>
- [13] Rajagopalan, N. (2006). Bridge Superstructure. Indian Institute of Technology, India