

การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรงและค่าตัวคูณแรงกระแทกของสะพาน Box Beam และ Plank Girder ประเภทพื้นต่อเนื่องของกรมทางหลวง เพื่อปรับปรุงการออกแบบ

In-situ Investigation of Distribution Factors and Impact Factors for Enhancing Design of Box Beam and Plank Girder Bridges with Continuous Deck Slab

วุฒิชัย อมรประสิทธิ์ผล^{1,*} ราชวัลลภ กัมพูพงศ์² อารักษ์ มณฑา³ วิกรินทร์ สอนถม⁴ และ อรรถสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช⁵

^{1,2,3,4,5} สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง

*Corresponding author; E-mail address: wuttichai.amorn@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการตรวจวัดพฤติกรรมการรับแรงของสะพาน Box Beam และ Plank Girder ประเภทพื้นต่อเนื่องของกรมทางหลวงภายใต้การจราจรปกติ โดยนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรง (Girder Distribution Factor, GDF) และค่าตัวคูณแรงกระแทก (Impact Factor, IM) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากมาตรฐานการออกแบบสะพาน AASHTO ผลการวิเคราะห์ความเครียดพบว่า GDF จะเพิ่มขึ้นตามระดับการยัดรีงและมุมเฉียงของสะพานไม่ได้ขึ้นกับจำนวนช่วงต่อเนื่องของสะพาน ค่า GDF ที่คำนวณตาม AASHTO LRFD (2007 SI) ให้ค่าใกล้เคียงกับค่า GDF ของสะพานที่มีการยัดรีงจากช่วงพื้นต่อเนื่องเพียงอย่างเดียวและไม่มิมุมเฉียง ส่วนค่า GDF ที่คำนวณตาม AASHTO STANDARD (2002) ให้ค่าใกล้เคียงกับค่า GDF ของสะพานที่มีการยัดรีงเพิ่มเติมเนื่องจากทางเท้าและสะพานมีมุมเฉียง ในส่วนของ IM ผลการศึกษาเป็นไปในแนวทางเดียวกับ GDF กล่าวโดยสรุป การออกแบบสะพานประเภท Box Beam และ Plank Girder ประเภทพื้นต่อเนื่องยังคงสามารถใช้สูตรการออกแบบของ AASHTO ได้ โดยสะพานที่มีการยัดรีงสูงมีทางเท้า มีมุมเฉียงมาก ควรใช้สูตรการคำนวณ GDF ตาม AASHTO STANDARD (2002) ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงความเป็นจริงและปลอดภัยกว่าสูตรของ AASHTO LRFD (2007 SI)

คำสำคัญ: สะพาน, ทางหลวง, Box Beam, Plank Girder, พื้นต่อเนื่อง, ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรง, ค่าตัวคูณแรงกระแทก

Abstract

This paper presents in-situ investigation of distribution factors and impact factors for enhancing design of box beam and plank girder bridges with continuous deck slab. Analysis of measured strains reveals that skew angle and sidewalk have significant effect on girder distribution factors (GDFs) and impact factors (IMs) whereas span continuity has only little influence. Bridges without or with slightly skewed and/or in absence of sidewalk can distribute live load better

than bridges with highly skewed and/or in the presence of sidewalk. Statistical maximum GDFs and IMs of bridges without or with slightly skewed and/or in absence of sidewalk are lower than those of bridges with highly skewed and/or in the presence of sidewalk. Statistical maximum GDFs and IMs of bridges without or with slightly skewed and/or in the absence of sidewalk correspond with GDFs and IMs suggested in AASHTO LRFD (2007 SI) specifications whereas statistical maximum GDFs and IMs of bridges with highly skewed and/or in the presence of sidewalk correspond with GDFs and IMs suggested in AASHTO STANDARD (2002) specifications. It is recommended that GDFs and IMs suggested in AASHTO STANDARD (2002) shall be used in the design of highly skewed and/or in the presence of sidewalk of box beam and plank girder bridges with continuous deck slab.

Keywords: Bridges, Highways, Box Beam, Plank Girder, Continuous Deck Slab, Distribution Factor, Impact Factor

1. บทนำ

การก่อสร้างพื้นสะพานต่อเนื่องบนโครงสร้างสะพานช่วงเดียวเพื่อลดจำนวนรอยต่อพื้นสะพาน กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก กรมทางหลวงจึงมีแนวคิดในการก่อสร้างพื้นสะพานต่อเนื่องบนสะพานช่วงสั้นประเภท Plank Girder (PG) และสะพานช่วงกลางประเภท Box Beam (BB) ซึ่งนับว่าเป็นสะพานรูปแบบใหม่ของกรมทางหลวง มีลักษณะทางโครงสร้างที่แตกต่างจากสะพานช่วงยาวประเภทคานรูปตัวไอ (I-Girder, IG) พื้นต่อเนื่อง ด้วยช่วงพื้นต่อเนื่อง (Link Slab, LS) ที่มีความหนาดัง 0.25 เมตร ทำให้ LS มีสติเฟนสูงชันมาก เพิ่มการยัดรีงการโค้งตัวของ PG และ BB จนอาจทำให้ PG และ BB ซึ่งออกแบบและก่อสร้างตามแบบมาตรฐานของสำนักสำรวจและออกแบบ กรมทางหลวง ปี 2537 โดยที่ไม่ได้พิจารณาผลของการยัดรีงฯ รวมถึงตัวของ LS เองได้รับความเสียหาย ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของสะพาน

สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง (2559) [1] ได้ทำการศึกษา พฤติกรรมการรับแรงของสะพานข้ามคลองลำต้นไทร สะพานข้ามคลองลำฝักชี สะพานข้ามคลองบางเสาะง และสะพานข้ามคลองบ้านระภาค เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร ซึ่งในที่นี่หมายถึงน้ำหนักของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานในสภาวะการใช้งานปกติ โดยอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจวัดสะพานดังกล่าว ผลการศึกษาทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการรับแรงของสะพานทั้ง 4 แห่ง ซึ่งเป็นสะพานประเภท BB และ PG ก่อสร้างเป็นสะพานช่วงพื้นต่อเนื่อง ที่มีมุมเอียง และจำนวนช่วงต่อเนื่องที่แตกต่างกัน โดยพฤติกรรมการรับแรงจะนำเสนอในรูปแบบค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรง และค่าตัวคูณแรงกระทำ เปรียบเทียบค่าต่างๆ ที่วิเคราะห์ได้กับค่าที่ได้จากมาตรฐานการออกแบบสะพาน AASHTO เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงรูปแบบรายละเอียดสะพานต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร พิจารณาอยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรง และค่าตัวคูณแรงกระทำ ซึ่งเป็นสองปัจจัยหลักที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างสะพานส่วนบนตามมาตรฐานการออกแบบสะพาน AASHTO โดยค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรง และค่าตัวคูณแรงกระทำ เนื่องจากการจราจรของรถบรรทุกภายใต้สภาวะการใช้งานจริง ซึ่งคำนวณมาจากข้อมูลความเครียด ที่เก็บอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 10 วันในแต่ละ สะพาน จะนำมาเปรียบเทียบกับ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรง และค่าตัวคูณแรงกระทำ ตามมาตรฐาน AASHTO

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรง (Distribution Factor) แสดงถึงสัดส่วนการกระจายผลตอบสนองของโครงสร้างที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร ไปยัง ส่วนต่างๆของโครงสร้าง ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรง มีค่าแตกต่างกันออกไป ตาม ลักษณะของผลตอบสนอง ลักษณะทางโครงสร้างและเรขาคณิตของสะพาน รวมถึงข้อกำหนดในมาตรฐานการออกแบบ ในการออกแบบโครงสร้างส่วนบนของ สะพานตามมาตรฐานการออกแบบสะพาน AASHTO STANDARD [2] ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรงจะถูกนำไปคูณเข้ากับผลตอบสนองของโครงสร้าง สะพานเนื่องจากน้ำหนักล้อของรถบรรทุกออกแบบ (รถบรรทุกครั้งคัน) เพื่อนำผลคูณที่ได้ไปออกแบบส่วนต่างๆของโครงสร้างต่อไป ส่วนในกรณีของมาตรฐานการออกแบบสะพาน AASHTO LRFD [3] ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรงจะถูกนำไปคูณเข้ากับผลตอบสนองของโครงสร้างสะพานเนื่องจากน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกออกแบบ (รถบรรทุก 1 คันเต็ม)

ในกรณีของสะพานประเภท Box Beam และ Plank Girder ซึ่งเป็นรูปแบบ โครงสร้างของสะพานในการศึกษาครั้งนี้ สะพานทั้งสองประเภทสามารถ เที่ยงเคียงได้กับสะพานประเภท Precast Concrete Beams Used in Multi-Beam Decks ตามมาตรฐาน AASHTO STANDARD หรือสะพานประเภท Precast Concrete Beams Used in Multi-Beam Decks Type g ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรง (Load Fraction or Distribution Factor) ของสะพานประเภทนี้ สำหรับผลตอบสนองประเภทโมเมนต์แรงดัด สรุปได้ดังนี้

มาตรฐาน AASHTO STANDARD (2002) Section 3.23.4.3 [2]

$$Load\ Fraction = \frac{S}{D} \quad (1)$$

โดยที่

S = ความกว้างของคาน precast (ฟุต)

$$D = (5.75 - 0.5N_L) + 0.7N_L(1 - 0.2C)^2 \quad \text{เมื่อ } C \leq 5$$

$$D = (5.75 - 0.5N_L) \quad \text{เมื่อ } C \geq 5$$

N_L = จำนวนช่องจราจรออกแบบทั้งหมดบนสะพานวัดจากขอบถึง ขอบทางเท้าหรือราวกันตก (ความกว้าง 12 ฟุต)

$$C = K \left(\frac{W}{L} \right) \quad \text{โดยที่}$$

W = ความกว้างทั้งหมดของสะพาน (ฟุต)

L = ความยาวคาน (ฟุต)

$$K = \left\{ (1 + \mu) \frac{I}{J} \right\}^2 \quad \text{โดยที่}$$

I = โมเมนต์แรงเฉื่อย

J = ค่าคงที่การบิด Saint-Venant

μ = อัตราส่วน Poisson

ตามที่ได้กล่าวข้างต้น ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรง ที่คำนวณได้จาก สมการที่ (1) จะถูกนำไปคูณเข้ากับผลตอบสนองของโครงสร้างสะพานเนื่องจาก น้ำหนักบรรทุกครั้งคัน ดังนั้น เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบกับค่า สัมประสิทธิ์การกระจายแรง ที่คำนวณได้จาก มาตรฐาน AASHTO LRFD และ จากข้อมูลการตรวจวัดความเครียดจริงในสนาม ซึ่งพิจารณาเป็นตัวคูณเข้ากับ รถบรรทุก 1 คันเต็ม ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรง ที่คำนวณได้จากสมการที่ (1) จะถูกปรับแก้ด้วยค่าปรับแก้ 0.5 เพื่อเป็นค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรง สำหรับรถบรรทุกออกแบบ 1 คันเต็ม ดังสมการที่ (2)

$$Load\ Fraction = \frac{0.5S}{D} \quad (2)$$

มาตรฐาน AASHTO LRFD (2007 SI) Section 4.6.2.2.2b [3]

สำหรับสะพานที่มีช่องจราจรออกแบบตั้งแต่ 2 ช่องจราจรขึ้นไป

Distribution factor

$$= k \left(\frac{b}{7600} \right)^{0.6} \left(\frac{b}{L} \right)^{0.2} \left(\frac{I}{J} \right)^{0.6} \quad (3)$$

โดยที่

$$k = 2.5(N_b)^{-0.2} \geq 0.15$$

N_b = จำนวนคาน ครอบคลุมตั้งแต่ 5 ถึง 20 คาน

b = ความกว้างคาน (มิลลิเมตร) ครอบคลุมตั้งแต่ 900 ถึง 1500 มิลลิเมตร

L = ความยาวคาน (มิลลิเมตร) ครอบคลุมตั้งแต่ 6000 ถึง 37000 มิลลิเมตร

I = โมเมนต์แรงเฉื่อย

J = ค่าคงที่การบิด Saint-Venant

ในกรณีที่มีสะพานมีมุมเฉียง มาตรฐาน AASHTO LRFD กำหนดให้ทำการปรับแก้ค่า Distribution factor ดังนี้

$$1 - 0.25 \tan \theta \leq 1.0, 0 \leq \theta \leq 60^\circ \quad (4)$$

ในส่วนของมาตรฐาน AASHTO STANDARD ไม่ได้กำหนดให้ปรับแก้ค่า Load Fraction แต่อย่างไร

ค่าตัวคูณแรงกระแทก (Impact Factor) แสดงถึงผลของแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นต่อโครงสร้างสะพาน เนื่องจากรถบรรทุกวิ่งผ่านสะพาน โดยตัวคูณแรงกระแทกจะถูกนำไปเพิ่มเติมเข้ากับผลตอบสนองของโครงสร้างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกออกแบบ ซึ่งพิจารณาเป็นน้ำหนักกระทำแบบสถิต เพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้างต่อไป มาตรฐาน AASHTO STANDARD และมาตรฐาน AASHTO LRFD กำหนดให้ Impact Factor (IM) สำหรับผลตอบสนองประเภทโมเมนต์แรงดัด มีค่าดังนี้

$$\text{AASHTO STANDARD IM} = \frac{50}{(L + 125)} \quad (5)$$

โดยที่ L = ความยาวช่วงสะพาน (ฟุต)

ค่า **AASHTO STANDARD IM** ตามสมการที่ (5) ให้ใช้ไม่เกิน 0.30

$$\text{AASHTO STANDARD IM} = 0.33 \quad (6)$$

ค่า **AASHTO LRFD IM** ตามสมการที่ (6) ใช้เพิ่มเติมเข้ากับโมเมนต์แรงดัดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกออกแบบ (HL-93 Truck) เท่านั้น โดยไม่ต้องนำมาเพิ่มเข้ากับน้ำหนักแม่ (Lane Load) 9.3 kN/m แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมาตรฐานการออกแบบ AASHTO LRFD กำหนดให้พิจารณา HL-93 Truck และ Lane Load กระทำพร้อมกันในการคำนวณหาโมเมนต์แรงดัด ดังนั้น เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบ การหาค่า IM ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD จึงพิจารณาในรูปแบบ IM เทียบเท่า ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$\text{AASHTO LRFD IM} = \frac{0.33M_{HL-93}}{(M_{HL-93} + M_{Land Load})} \quad (7)$$

โดยที่ M_{HL-93} และ $M_{Land Load}$ คือค่าโมเมนต์แรงดัดที่คำนวณได้จาก HL-93 Truck และ Lane Load ตามลำดับ

3. แนวทางการศึกษา

ในการศึกษานี้ ความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรง และค่าตัวคูณแรงกระแทก เนื้อหาในหัวข้อนี้จึงนำเสนอลักษณะความเครียดที่เกิดขึ้น รวมถึงการวิเคราะห์ต่างๆเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรง และค่าตัวคูณแรงกระแทกสำหรับผลตอบสนองประเภทโมเมนต์แรงดัด

เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานอย่างช้าๆ สะพานจะตอบสนองต่อการเคลื่อนที่นั้นในลักษณะกึ่งสถิต ความเครียดที่เกิดขึ้นบนคานสะพานจะมีลักษณะเป็นวัฏจักรที่ไม่ซับซ้อน ความเครียดจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจากระดับปกติเมื่อรถบรรทุกเริ่มเคลื่อนที่เข้าสะพาน และจะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งประมาณกึ่งกลางสะพาน

จากนั้นจะค่อยๆลดต่ำลงมาสู่ระดับปกติเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ออกจากสะพาน วัฏจักรของความเครียดนี้ เรียกว่าวัฏจักรความเครียดกึ่งสถิต และผลต่างระหว่างค่าสูงสุดกับระดับปกติจะเรียกว่า ความเครียดกึ่งสถิต (Quasi-static Strain, ϵ_{stat})

ในขณะที่เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานด้วยความเร็วปกติประมาณ 30 ถึง 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง วัฏจักรความเครียดจะซับซ้อนขึ้น ซึ่งจะประกอบไปด้วยวัฏจักรหลักหนึ่งวัฏจักร และวัฏจักรย่อยหลายวัฏจักรผสมอยู่ในวัฏจักรหลักดังแสดงในรูปที่ 1 วัฏจักรหลักที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานด้วยความเร็วปกติ จะมีลักษณะเป็นวัฏจักรความเครียดกึ่งสถิต เหมือนในกรณีของรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานอย่างช้าๆ ทั้งนี้เนื่องจากรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานด้วยความเร็ว 30 ถึง 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จะเคลื่อนที่ผ่านสะพานความยาวช่วง 20 เมตร ในเวลา 1.1 ถึง 3.1 วินาที (คิดระยะเวลาหน้าถึงเวลาหลังของรถบรรทุกเท่ากับ 5.5 เมตร) ซึ่งจะทำให้เกิดวัฏจักรที่มีความถี่เทียบเท่าไม่เกิน 0.90 Hz ความถี่เทียบเท่านี้มีค่าต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐานของสะพานความยาวช่วง 20 เมตร ซึ่งมีค่าอยู่ประมาณ 5 Hz มาก ทำให้รูปร่างของวัฏจักรหลักนี้คล้ายคลึงกับวัฏจักรความเครียดกึ่งสถิต ที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานอย่างช้าๆ เพียงแต่ว่าระยะเวลาที่เกิดวัฏจักรหลักจะสั้นกว่ามาก โดยความเครียดสูงสุดของวัฏจักรหลักจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเครียดกึ่งสถิต ในขณะที่วัฏจักรย่อยที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสั่นไหวของโครงสร้างสะพาน ซึ่งกระตุ้นโดยการแปรปรวนของแรงต้นลม ยางจากล้อรถบรรทุก ซึ่งเกิดมาจากระบบช่วงล่างของรถตัวรถบรรทุก โดยทั่วไปการสั่นไหวของโครงสร้างสะพานที่เกิดจากการกระตุ้นโดยรถบรรทุก จะมีความถี่อยู่ประมาณ 3 ถึง 4 Hz

เนื่องจากความถี่ของวัฏจักรหลักมีค่าต่างจากความถี่ของวัฏจักรย่อยเป็นอย่างมาก และความถี่ได้ถูกบันทึกไว้ในรูปแบบดิจิตอล ทำให้สามารถแยกวัฏจักรหลักออกจากวัฏจักรย่อยที่ซับซ้อนได้โดยอาศัยการกรองความถี่ประเภท lowpass digital filter ซึ่งมี software ที่ใช้ในการกรองอยู่อย่างแพร่หลาย ในการกรองความถี่ จะกำหนด cut-off frequency ไว้ประมาณ 1 Hz ความถี่ที่สูงเกิน 1 Hz จะถูกกรองออกไปทำให้ได้วัฏจักรหลักที่มีความถี่ต่ำกว่า 1 Hz ออกมา รูปที่ 1 แสดงค่าความเครียดกึ่งสถิต ϵ_{stat} ที่ได้จากวัฏจักรหลัก รวมถึงค่าความเครียดพลวัตสัมบูรณ์สูงสุด ϵ_{dyn} [4]

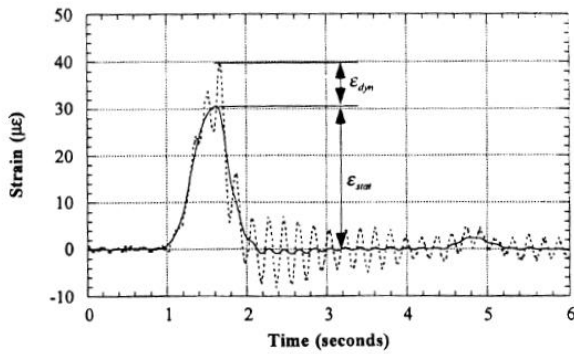
ค่า ϵ_{stat} และค่า ϵ_{dyn} จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรง (GDF) และค่าตัวคูณแรงกระแทก (IM) สำหรับผลตอบสนองประเภทโมเมนต์แรงดัด ดังนี้

ในกรณีที่คานแต่ละตัวมีค่าโมดูลัสของหน้าตัดเท่ากัน ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรงลงแต่ละคานจะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของ ϵ_{stat} ของคานนั้นต่อผลรวมของ ϵ_{stat} ของทุกคานตลอดหน้าตัดสะพาน หรือ

$$GDF_i = \frac{\epsilon_{stat,i}}{\sum \epsilon_{stat}} \quad (8)$$

สำหรับค่าตัวคูณแรงกระแทกให้พิจารณาจากอัตราส่วนของ ϵ_{dyn} ต่อ ϵ_{stat} หรือ

$$IM = \frac{\epsilon_{dyn}}{\epsilon_{stat}} \quad (9)$$



รูปที่ 1 วิถีจักรความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานด้วยความเร็วปกติ [4]

ในการออกแบบคานสะพานของสะพานระบบพื้นคาน โดยทั่วไปจะพิจารณากรณีรถบรรทุกมากกว่า 1 คันบนสะพานเพื่อให้เกิดผลตอบสนองสูงสุดในคาน ในกรณีของสะพานข้ามคลองลำต้นไทร สะพานข้ามคลองลำผักชี สะพานข้ามคลองบางเสาธง และสะพานข้ามคลองบ้านระกาศ ซึ่งเป็นสะพานที่มี 4 ช่องจราจร แต่อย่างไรก็ตาม รถบรรทุกเกือบทั้งหมดวิ่งผ่านเฉพาะช่องจราจรที่ 1 และ 2 หรือพิจารณาเฉพาะกรณีรถบรรทุกจำนวน 2 คันบนสะพาน โดยเพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบค่า GDF จาการรถบรรทุกในสภาวะใช้งานจริงกับค่า GDF ตามมาตรฐาน AASHTO ซึ่งพิจารณาเป็นตัวคูณเพิ่มเข้ากับรถบรรทุกออกแบบ 1 คัน ตามสมการที่ (2) และ (3) สำหรับ AASHTO STANDARD และ AASHTO LRFD ตามลำดับ ค่า GDF ที่เกิดจากรถบรรทุกวิ่งในช่องจราจรที่ 1 จะถูกนำมารวมกับค่า GDF ที่เกิดจากรถบรรทุกวิ่งในช่องจราจรที่ 2 เป็นค่า GDF รวม เพื่อนำไปเปรียบเทียบโดยอาศัยสมมติฐานที่ว่ารถบรรทุกวิ่งอย่างอิสระ ไม่มีความสัมพันธ์กันทางสถิติระหว่างรถบรรทุกที่ใช้ช่องจราจรที่ 1 และ 2 ค่า GDF รวมที่ได้จะมีค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังสมการที่ (10) และ (11) ตามลำดับ

$$GDF_{mean,total} = GDF_{mean,lane 1} + GDF_{mean,lane 2} \quad (10)$$

$$GDF_{std,total} = \left[(GDF_{std,lane 1})^2 + (GDF_{std,lane 2})^2 \right]^{0.5} \quad (11)$$

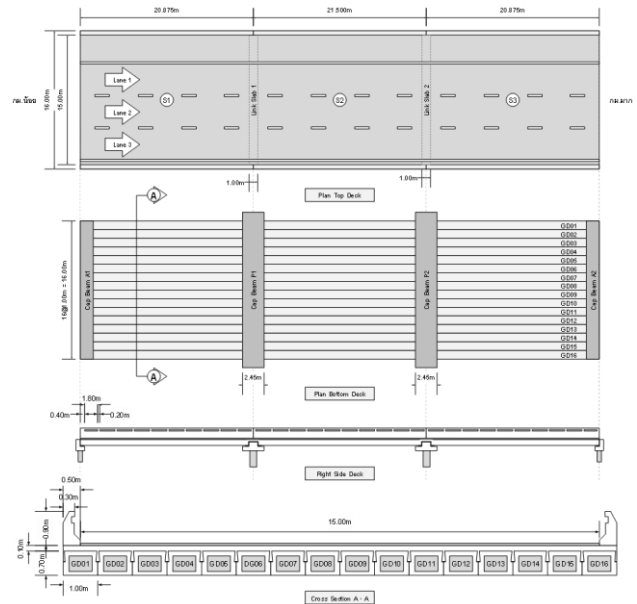
นอกจากนี้ ค่าความเครียดที่นำมาใช้ในการคำนวณหา IM ตามสมการที่ (9) จะพิจารณาเฉพาะค่าความเครียดบนคานที่มี GDF สูงและค่าความเครียดถึงสถิติที่นำมาพิจารณาจะต้องมีค่าสูงพอที่จะเป็นตัวแทนของรถบรรทุกหนัก ทั้งนี้ เพื่อให้สอดคล้องกับค่า IM ตามมาตรฐาน AASHTO ที่จะนำไปคูณเพิ่มเข้ากับผลตอบสนองเนื่องจากรถบรรทุกออกแบบซึ่งจัดเป็นรถบรรทุกหนัก ที่ได้ถูกคูณเพิ่มเข้ากับค่า GDF ตามมาตรฐานการออกแบบ ซึ่งจัดเป็นค่า GDF ที่สูงสุดของคานในการออกแบบ

4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรของสะพานข้ามคลองลำต้นไทร

สะพานข้ามคลองลำต้นไทร เป็นสะพานความยาว 3 ช่วง ขนาด $(1 \times 20.875) + (1 \times 21.500) + (1 \times 20.875) = 63.250$ เมตร สะพานมีลักษณะสมมาตรตามแนวสะพาน สะพานมีความกว้าง 16 เมตร ด้านซ้ายและขวาของสะพานก่อสร้างเป็น Concrete Barrier โครงสร้างหลักเป็น Box Beam ประเภทคานคอนกรีตอัดแรงหล่อสำเร็จ กลวง ผนังมีความหนาโดยเฉลี่ย 0.18 เมตร คานมีความกว้าง 0.99

เมตร สูง 0.70 เมตร ยาว 20 เมตร ตามแบบมาตรฐานของสำนักสำรวจและออกแบบปี 2537 จำนวน 16 คานวางเรียงชิดติดกัน โดยมีการอัดแรงทางข้างขนาดประมาณ 4 ตัน เพื่อช่วยในการถ่ายแรงแรงระหว่างคาน ด้านบนของคานเทพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กหนา 0.10 เมตร โดยระหว่างช่วงสะพานได้ทำการเทพื้นสะพานต่อเนื่องหนา 0.25 เมตร เป็นระยะ 1.50 เมตร ด้านบนของพื้นสะพานปูผิวจราจรแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 0.05 เมตร ผิวจราจรแบ่งเป็น 3 ช่องจราจร กับอีก 1 ช่องบริการ ช่องบริการครอบคลุมพื้นที่คานตัวที่ 1 ถึง 4 ช่องจราจรที่ 1 ครอบคลุมพื้นที่คานตัวที่ 4 ถึง 8 ช่องจราจรที่ 2 ครอบคลุมพื้นที่คานตัวที่ 8 ถึง 12 และช่องจราจรที่ 3 ครอบคลุมพื้นที่คานตัวที่ 12 ถึง 16 ฐานรองคานสะพาน ด้านหัวและท้ายสะพานเป็น Free Bearing ส่วนฐานรองคานสะพานช่วงพื้นต่อเนื่องเป็นแบบ Fixed Bearing รายละเอียดแสดงในรูปที่ 2



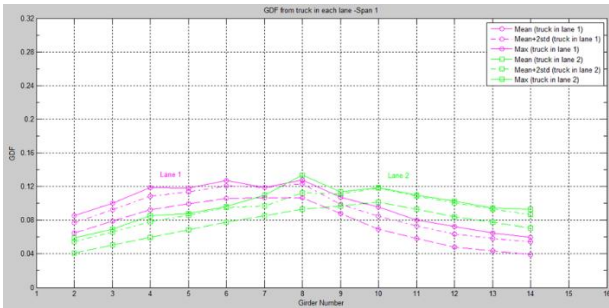
รูปที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของสะพานข้ามคลองลำต้นไทร

ความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานข้ามคลองลำต้นไทรอย่างอิสระจำนวน 674 คัน ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ตามแนวทางการศึกษา เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรงสำหรับผลตอบสนองประเภทโมเมนต์แรงดัดตามสมการที่ (8) ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรง พิจารณาที่ 2 บริเวณ ได้แก่ กึ่งกลางช่วงสะพานที่ 1 และกึ่งกลางช่วงสะพานที่ 2 ช่วงสะพานที่ 1 และช่วงสะพานที่ 2 มีความยาวช่วงคานจาก Bearing ถึง Bearing เท่ากันยาว 20 เมตร แตกต่างกันเฉพาะบริเวณสภาพการยึดตั้งบริเวณปลายช่วงคาน กล่าวคือ ช่วงสะพานที่ 1 ปลายช่วงสะพานด้านที่ติดกับตอม่อริม สภาพการยึดตั้งคานจะเป็น Free Bearing ยึดตั้งเฉพาะการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ในขณะที่ปลายอีกด้านหนึ่ง มีลักษณะเป็น Fixed Bearing ยึดตั้งการเคลื่อนที่ทั้งในแนวตั้งและแนวราบ โดยอาจมีการเคลื่อนที่ในแนวราบได้เพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ ช่วงพื้นต่อเนื่องที่เชื่อมระหว่างช่วงสะพานที่ 1 กับช่วงสะพานที่ 2 ยังต้านทานการหมุนอย่างอิสระของปลายคาน ช่วงสะพานที่ 1 อีกด้วย ส่วนช่วงสะพานที่ 2 ปลายช่วงสะพานทั้งสองด้าน มีลักษณะเป็น Fixed Bearing โดยมีช่วงพื้นต่อเนื่องต้านทานการหมุนอย่างอิสระของปลายคานทั้งสองด้าน

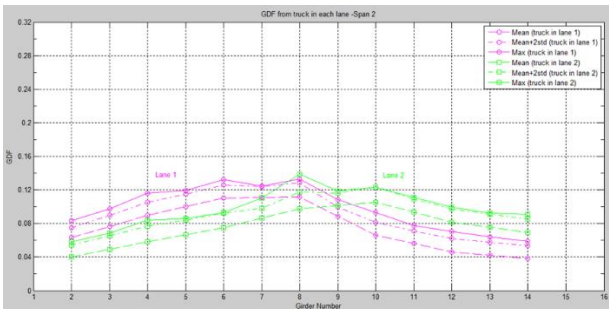
จากข้อมูลรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพาน มีรถบรรทุกที่ใช้ช่องจราจรที่ 1 และช่องจราจรที่ 2 จำนวน 460 และ 214 คัน ตามลำดับ การคำนวณ GDF จะแยกพิจารณา

แต่ละช่องจราจร จากนั้นจะนำมารวมกันและเปรียบเทียบกับ GDF ที่คำนวณได้จากมาตรฐาน AASHTO

กราฟแสดงค่าทางสถิติของ GDF ของแต่ละคาน ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (mean) ค่าเฉลี่ยบวกสองเท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน แสดงไว้ในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า GDF ของแต่ละคานเมื่อรถบรรทุกอยู่ช่องจราจรที่ 1 จะสมมาตรกับ GDF เมื่อรถบรรทุกอยู่ช่องจราจรที่ 2 สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงที่ว่า สะพานมีลักษณะสมมาตร อีกทั้งช่องจราจรที่ 1 และ 2 ก็วางตัวสมมาตรกันบนสะพาน



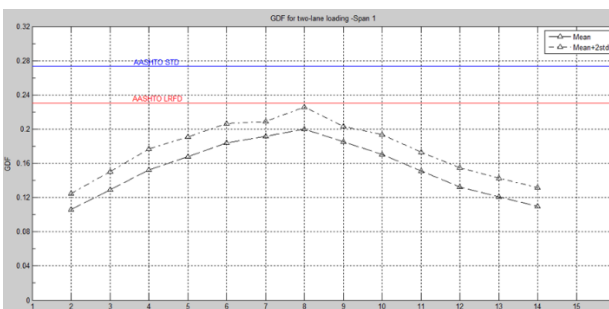
รูปที่ 3 ค่าทางสถิติของ GDF ช่วงสะพานที่ 1 แยกช่องจราจร



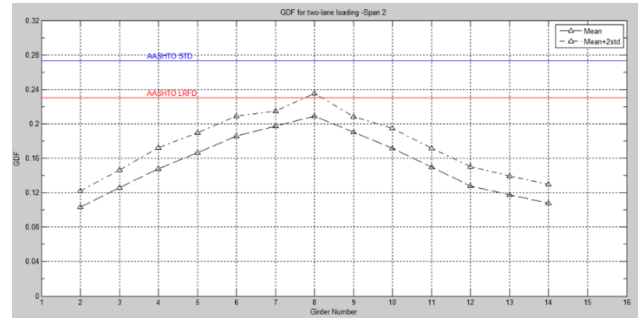
รูปที่ 4 ค่าทางสถิติของ GDF ช่วงสะพานที่ 2 แยกช่องจราจร

ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของ GDF รวม คำนวณได้จากสมการที่ (10) และ (11) กราฟแสดงค่าทางสถิติพร้อมกับค่า GDF ตามมาตรฐาน AASHTO STANDARD และมาตรฐาน AASHTO LRFD ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2) และ (3) มีค่าเท่ากับ 0.2732 และ 0.2305 ตามลำดับ แสดงไว้ในรูปที่ 5 และรูปที่ 6

จากกราฟจะเห็นได้ว่า ช่วงสะพานที่ 1 และช่วงสะพานที่ 2 มีการกระจายแรงลงคานแต่ละคานที่ใกล้เคียงกัน โดยทั้งหมดมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าค่า GDF ตามมาตรฐาน AASHTO STANDARD และ AASHTO LRFD นอกจากนี้ ยังพบว่า GDF ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่า GDF ตามสภาพการใช้งานจริงมากกว่า AASHTO STANDARD



รูปที่ 5 ค่าทางสถิติของ GDF รวม ช่วงสะพานที่ 1 และค่า GDF (AASHTO)



รูปที่ 6 ค่าทางสถิติของ GDF รวม ช่วงสะพานที่ 2 และค่า GDF (AASHTO)

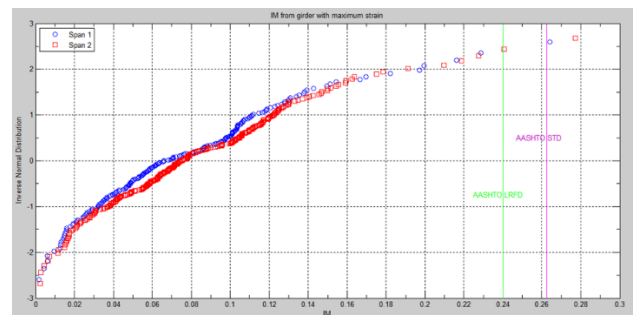
ค่าตัวคูณแรงกระแทก (IM) จากข้อมูลการตรวจวัดความเครียด คำนวณได้จากสมการที่ (9) โดยจะพิจารณาเฉพาะค่าความเครียดบนคานที่มี GDF สูงและค่าความเครียดที่สถิติที่นำมาพิจารณาจะต้องมีค่าสูงพอที่จะเป็นตัวแทนของรถบรรทุกหนักตามที่ได้กล่าวไว้ในแนวทางการศึกษา ในที่นี้ ค่าความเครียดที่สถิติที่นำมาคำนวณ IM จะพิจารณาค่าตั้งแต่ 20 ไมโครสตรนขึ้นไป ซึ่งประมาณได้กับค่าความเครียดที่สถิติของคานบริเวณตำแหน่งรถบรรทุก ที่เกิดขึ้นเมื่อจากรถบรรทุกลิบล้อหนักประมาณ 25 ตันวิ่งผ่านสะพานจากผลการทดสอบที่สภาวะควบคุม

IM ที่คำนวณได้ตามแนวทางข้างต้นในแต่ละช่วงสะพานมีการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบโค้งปกติ ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยมีค่าทางสถิติ ดังนี้

ช่วงสะพานที่ 1 IM มีค่าเฉลี่ย 0.0749 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0442 ค่าเฉลี่ยบวกสองเท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าสูงสุดทางสถิติ) 0.1633 และค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นจริง 0.2641

ช่วงสะพานที่ 2 IM มีค่าเฉลี่ย 0.0813 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0443 ค่าเฉลี่ยบวกสองเท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าสูงสุดทางสถิติ) 0.1699 และค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นจริง 0.2771

IM ของทั้งสองช่วงสะพานมีค่าทางสถิติที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 7 ถึง 8% ค่าสูงสุดทางสถิติอยู่ประมาณ 16 ถึง 17% ซึ่งยังคงต่ำกว่าค่า IM ตามมาตรฐาน AASHTO ค่อนข้างมาก (AASHTO STANDARD IM = 0.2623 และ AASHTO LRFD IM = 0.2399 คำนวณสำหรับความยาวช่วงคาน 20 เมตร จากสมการที่ (5) และ (7) ตามลำดับ)

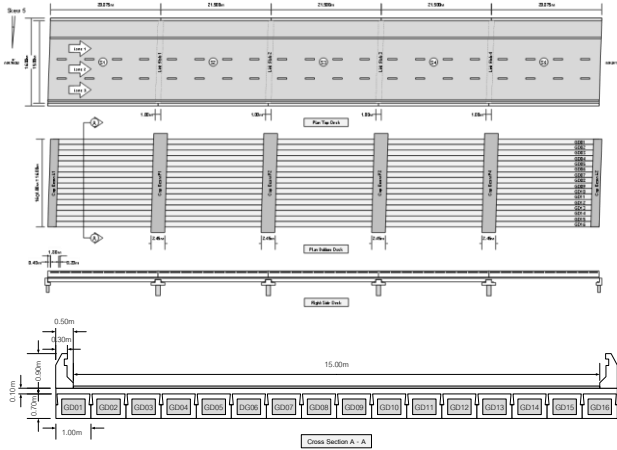


รูปที่ 7 ค่า IM ช่วงสะพานที่ 1 และ 2 มีการกระจายตัวแบบโค้งปกติ

4.2 ผลการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรของสะพานข้ามคลองลำผักชี

สะพานข้ามคลองลำผักชี เป็นสะพานความยาว 5 ช่วง ขนาด $(1 \times 20.875) + (3 \times 21.500) + (1 \times 20.875) = 106.250$ เมตร สะพานมีมุมเอียงเล็กน้อยประมาณ 5 องศา สะพานมีความกว้าง 16 เมตร ด้านซ้ายและขวาของ

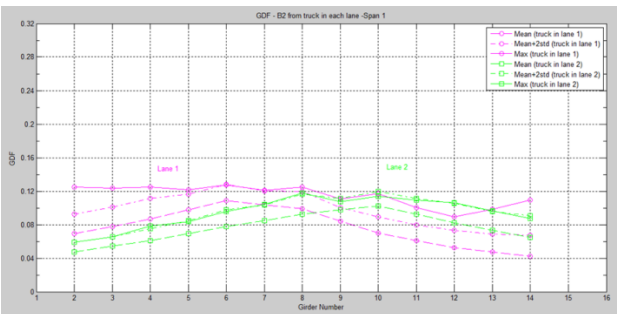
สะพานก่อสร้างเป็น Concrete Barrier โครงสร้างหลักเป็น Box Beam เช่นเดียวกับสะพานข้ามคลองลำตันไทร ดังแสดงในรูปที่ 8



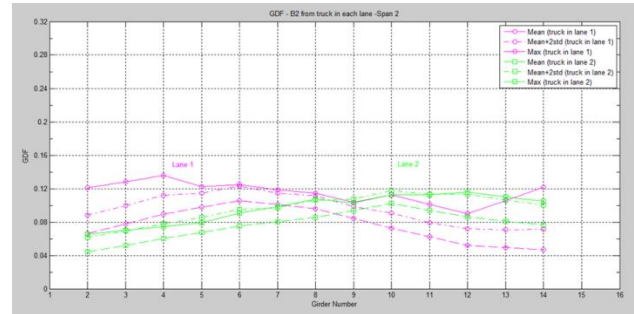
รูปที่ 8 ลักษณะทางกายภาพของสะพานข้ามคลองลำตันไทร

ความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานข้ามคลองลำตันไทรอย่างอิสระจำนวน 346 คัน ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ตามแนวทางการศึกษาพิจารณาที่ 3 บริเวณ ได้แก่ กึ่งกลางช่วงสะพานที่ 1 กึ่งกลางช่วงสะพานที่ 2 และกึ่งกลางช่วงสะพานที่ 3 ช่วงสะพานที่ 1 ช่วงสะพานที่ 2 และช่วงสะพานที่ 3 มีความยาวช่วงคานจาก Bearing ถึง Bearing เท่ากันยาว 20 เมตร แตกต่างกันเฉพาะบริเวณสภาพการยึดตั้งบริเวณปลายช่วงคาน กล่าวคือ ช่วงสะพานที่ 1 ปลายช่วงสะพานด้านที่ติดกับตอม่อริม สภาพการยึดตั้งคานจะเป็น Free Bearing ยึดตั้งเฉพาะการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ในขณะที่ปลายอีกด้านหนึ่งมีลักษณะเป็น Fixed Bearing ยึดตั้งการเคลื่อนที่ทั้งในแนวตั้งและแนวราบ นอกจากนี้ ช่วงพื้นต่อเนื่องจากที่เชื่อมระหว่างช่วงสะพานที่ 1 กับช่วงสะพานที่ 2 ยังด้านทานการหมุนอย่างอิสระของปลายคานช่วงสะพานที่ 1 อีกด้วย ส่วนช่วงสะพานที่ 2 และช่วงสะพานที่ 3 ปลายช่วงสะพานทั้งสองด้าน มีลักษณะเป็น Fixed Bearing โดยมีช่วงพื้นต่อเนื่องจากด้านทานการหมุนอย่างอิสระของปลายคานทั้งสองด้าน

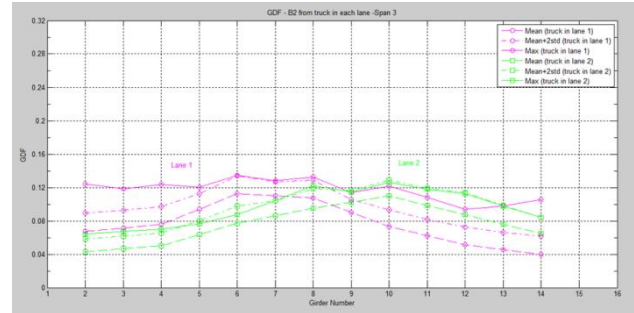
จากข้อมูลรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพาน มีรถบรรทุกใช้ช่องจราจรที่ 1 และช่องจราจรที่ 2 จำนวน 329 และ 17 คัน ตามลำดับ กราฟแสดงค่าทางสถิติของ GDF ของแต่ละคาน แสดงไว้ในรูปที่ 9 ถึงรูปที่ 11



รูปที่ 9 ค่าทางสถิติของ GDF ช่วงสะพานที่ 1 แยกช่องจราจร

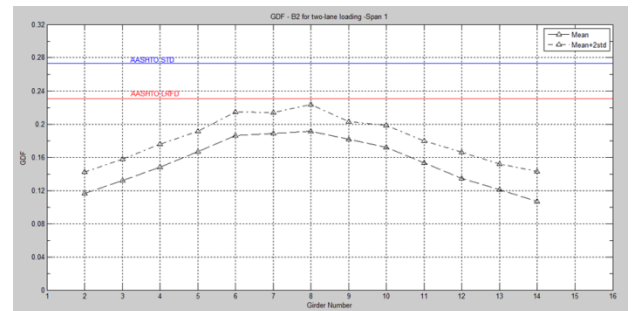


รูปที่ 10 ค่าทางสถิติของ GDF ช่วงสะพานที่ 2 แยกช่องจราจร

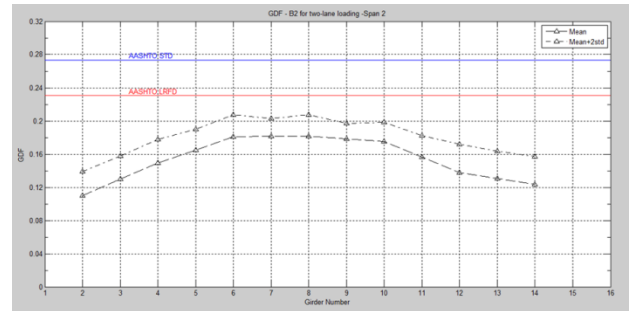


รูปที่ 11 ค่าทางสถิติของ GDF ช่วงสะพานที่ 3 แยกช่องจราจร

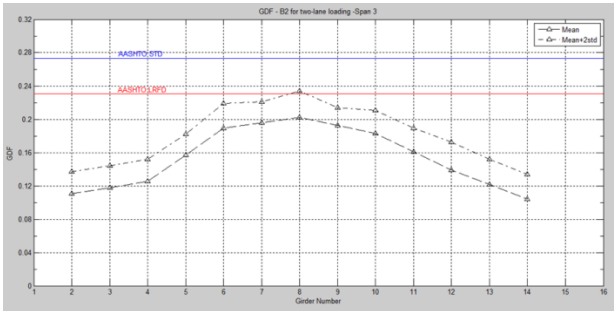
ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของ GDF รวม คำนวณได้จากสมการที่ (10) และ (11) ตามลำดับ กราฟแสดงค่าทางสถิติ แสดงไว้ในรูปที่ 12 ถึง รูปที่ 14 พร้อมด้วย ค่า GDF ตามมาตรฐาน AASHTO STANDARD และ AASHTO LRFD GDF ตามมาตรฐาน AASHTO STANDARD และมาตรฐาน AASHTO LRFD คำนวณได้จากสมการที่ (2) และ (3) มีค่าเท่ากับ 0.2732 และ 0.2305 ตามลำดับ



รูปที่ 12 ค่าทางสถิติของ GDF รวม ช่วงสะพานที่ 1 และค่า GDF (AASHTO)

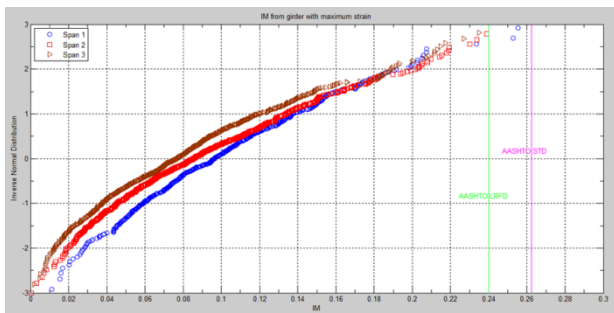


รูปที่ 13 ค่าทางสถิติของ GDF รวม ช่วงสะพานที่ 2 และค่า GDF (AASHTO)



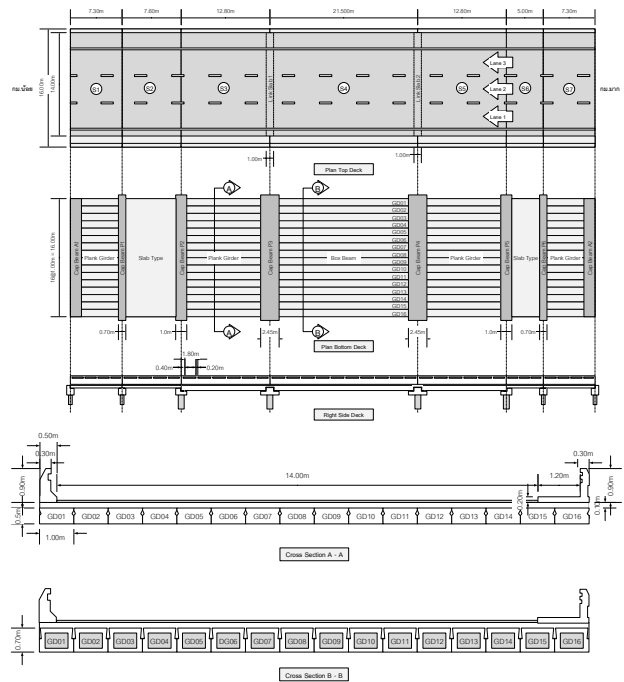
รูปที่ 14 ค่าทางสถิติของ GDF รวม ช่วงสะพานที่ 3 และค่า GDF (AASHTO) จากกราฟในรูปที่ 12 ถึงรูปที่ 14 จะเห็นได้ว่า ช่วงสะพานที่ 1 ช่วงสะพานที่ 2 และช่วงสะพานที่ 3 มีการกระจายแรงลงคานแต่ละคานที่ใกล้เคียงกัน โดยทั้งหมดมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าค่า GDF ตามมาตรฐาน AASHTO STANDARD และ AASHTO LRFD นอกจากนี้ ยังพบว่า GDF ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่า GDF ตามสภาพการใช้งานจริงมากกว่า AASHTO STANDARD

ค่าตัวคูณแรงกระทำ (IM) จากข้อมูลการตรวจวัดความเครียด คำนวณได้จากสมการที่ (9) โดยใช้หลักการเดียวกับสะพานข้ามคลองลำต้นไทร ซึ่ง ค่า IM ที่คำนวณได้ในแต่ละช่วงสะพานมีการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบโค้งปกติ ดังแสดงในรูปที่ 15 IM ของทั้งสามช่วงสะพานมีค่าทางสถิติที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 7 ถึง 9% ค่าสูงสุดทางสถิติอยู่ประมาณ 18 ถึง 20% ซึ่งยังคงต่ำกว่าค่า IM ตามมาตรฐาน AASHTO ค่อนข้างมาก (AASHTO STANDARD IM = 0.2623 และ AASHTO LRFD IM = 0.2399 สำหรับความยาวช่วงคาน 20 เมตร จากสมการที่ (5) และ (7) ตามลำดับ)



รูปที่ 15 ค่า IM ช่วงสะพานที่ 1 2 และ 3 มีการกระจายตัวแบบโค้งปกติ 4.3 ผลการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรของสะพานข้ามคลองบางเสาช

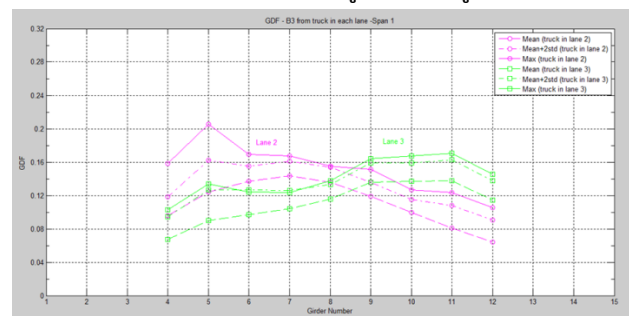
สะพานข้ามคลองบางเสาช เป็นสะพานความยาว 3 ช่วง ขนาด (1X12.750)+(1X21.500)+(1X12.750) = 47.000 เมตร สะพานมีความกว้าง 15 เมตร ด้านซ้ายของสะพานก่อสร้างเป็นทางเดินเท้ากว้าง 1.50 เมตร ส่วนด้านขวาของสะพานก่อสร้างเป็น Concrete Barrier โครงสร้างหลักของสะพานช่วงริมเป็นคานคอนกรีตตันอัดแรงหล่อสำเร็จประเภท Plank Girder คานมีความกว้าง 0.99 เมตร สูง 0.45 เมตร ยาว 12 เมตร จำนวน 15 คานวางเรียงชิดติดกัน โดยมี Shear Key เพื่อช่วยในการถ่ายแรงระหว่างคาน โครงสร้างหลักของสะพานช่วงกลางเป็น Box Beam เช่นเดียวกับสะพานข้ามคลองลำต้นไทรและสะพานข้ามคลองลำผักชี ดังแสดงในรูปที่ 16



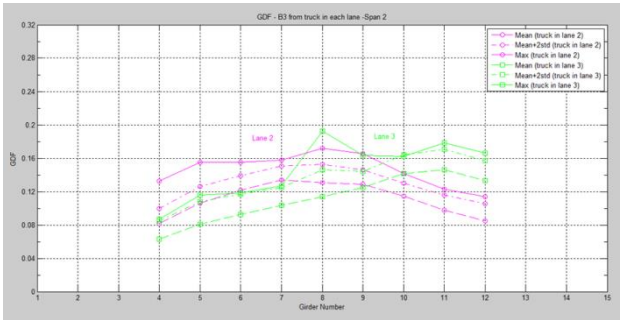
รูปที่ 16 ลักษณะทางกายภาพของสะพานข้ามคลองบางเสาช

ความเครียดที่เกิดขึ้นจากการบรรทุกทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานข้ามคลองบางเสาช อย่างอิสระจำนวน 536 คัน ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ตามแนวทางการศึกษา พิจารณาที่ 2 บริเวณ ได้แก่ กึ่งกลางช่วงสะพานที่ 1 และกึ่งกลางช่วงสะพานที่ 2 ช่วงสะพานที่ 1 และช่วงสะพานที่ 2 มีความยาวช่วงคานจาก Bearing ถึง Bearing เท่ากับ 12 เมตร และ 20 เมตร ตามลำดับ สภาพการยึดรั้งบริเวณปลายช่วงคาน ช่วงสะพานที่ 1 ปลายช่วงสะพานด้านที่ติดกับตอม่อริม สภาพการยึดรั้งคานจะเป็น Free Bearing ยึดรั้งเฉพาะการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ในขณะที่ปลายอีกด้านหนึ่ง มีลักษณะเป็น Fixed Bearing ยึดรั้งการเคลื่อนที่ทั้งในแนวตั้งและแนวราบ โดยอาจมีการเคลื่อนที่ในแนวราบได้เพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ ช่วงพื้นที่ต่อเนื่องที่เชื่อมระหว่างช่วงสะพานที่ 1 กับช่วงสะพานที่ 2 ยังด้านทานการหมุนอย่างอิสระของปลายคานช่วงสะพานที่ 1 อีกด้วย ส่วนช่วงสะพานที่ 2 ปลายช่วงสะพานทั้งสองด้าน มีลักษณะเป็น Fixed Bearing โดยมีช่วงพื้นที่ต่อเนื่องด้านทานการหมุนอย่างอิสระของปลายคานทั้งสองด้าน

จากข้อมูลรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพาน มีรถบรรทุกใช้ช่องจราจรที่ 2 และช่องจราจรที่ 3 จำนวน 457 และ 79 คัน ตามลำดับ กราฟแสดงค่าทางสถิติของ GDF ของแต่ละคาน แสดงไว้ในรูปที่ 17 และรูปที่ 18



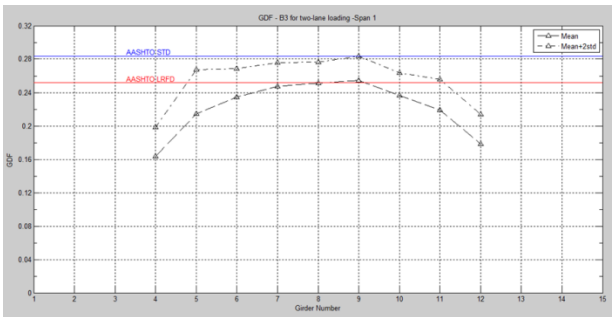
รูปที่ 17 ค่าทางสถิติของ GDF ช่วงสะพานที่ 1 แยกช่องจราจร



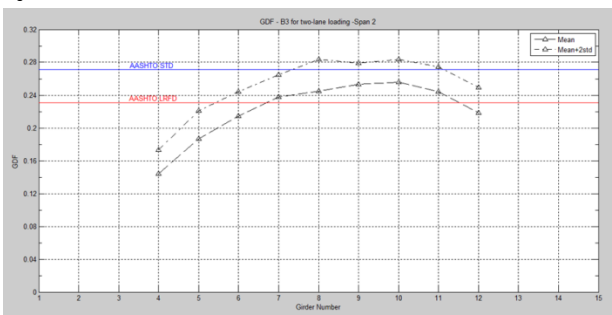
รูปที่ 18 ค่าทางสถิติของ GDF ช่วงสะพานที่ 2 แยกช่องจราจร

ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของ GDF รวม คำนวณได้จากสมการที่ (10) และ (11) ตามลำดับ กราฟแสดงค่าทางสถิติ แสดงไว้ในรูปที่ 19 และรูปที่ 20 พร้อมด้วย ค่า GDF ตามมาตรฐาน AASHTO STANDARD และ AASHTO LRFD

GDF ตามมาตรฐาน AASHTO STANDARD และมาตรฐาน AASHTO LRFD คำนวณได้จากสมการที่ (2) และ (3) มีค่าเท่ากับ 0.2836 และ 0.2518 ตามลำดับ สำหรับ Plank Girder และ 0.2715 และ 0.2305 ตามลำดับ สำหรับ Box Beam



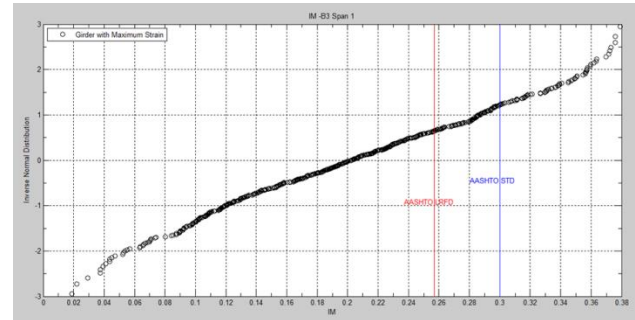
รูปที่ 19 ค่าทางสถิติของ GDF รวม ช่วงสะพานที่ 1 และค่า GDF (AASHTO)



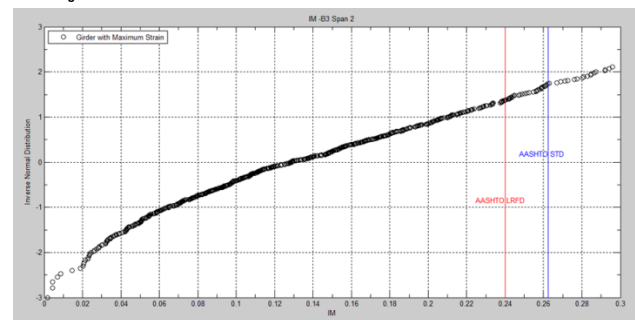
รูปที่ 20 ค่าทางสถิติของ GDF รวม ช่วงสะพานที่ 2 และค่า GDF (AASHTO)

จากกราฟในรูปที่ 19 และรูปที่ 20 จะเห็นได้ว่า แรงเนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุก ไม่ค่อยกระจายลงคานแต่ละคาน ทั้งนี้เนื่องจากแรงถูกบีบให้กระจุกตัวอยู่บริเวณที่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำโดยความแข็งแกร่งของทางเดินเท้า ดังจะเห็นได้จากกรณีของสะพานข้ามคลองลำต้นไทร ซึ่งมีลักษณะทางโครงสร้างเช่นเดียวกับช่วงสะพานที่ 2 ของสะพานข้ามคลองบางเสาธง เพียงแต่ไม่มีทางเดินเท้า โครงสร้างจึงไม่ได้ถูกบีบ แรงจึงสามารถกระจายได้ดีกว่า ผลของการที่โครงสร้างถูกบีบด้วยทางเดินเท้า ทำให้ค่าเฉลี่ยของ GDF รวม และค่าสูงสุดทางสถิติ มีค่าสูงขึ้นมาก โดยในกรณีนี้ GDF ตามมาตรฐาน AASHTO STANDARD ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่า GDF ตามสภาพการใช้งานจริงมากกว่า AASHTO LRFD

ค่าตัวคูณแรงกระทำ (IM) จากข้อมูลการตรวจวัดความเครียด คำนวณได้จากสมการที่ (9) โดยใช้หลักการเดียวกับสะพานข้ามคลองลำต้นไทรและสะพานข้ามคลองลำผักชี ซึ่งค่า IM ที่คำนวณได้มีการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบโค้งปกติ ดังแสดงในรูปที่ 21 และ รูปที่ 22 สำหรับช่วงสะพานที่ 1 Plank Girder 12 เมตร และช่วงสะพานที่ 2 Box Beam 20 เมตร ตามลำดับ



รูปที่ 21 ค่า IM ช่วงสะพานที่ 1 มีการกระจายตัวแบบโค้งปกติ

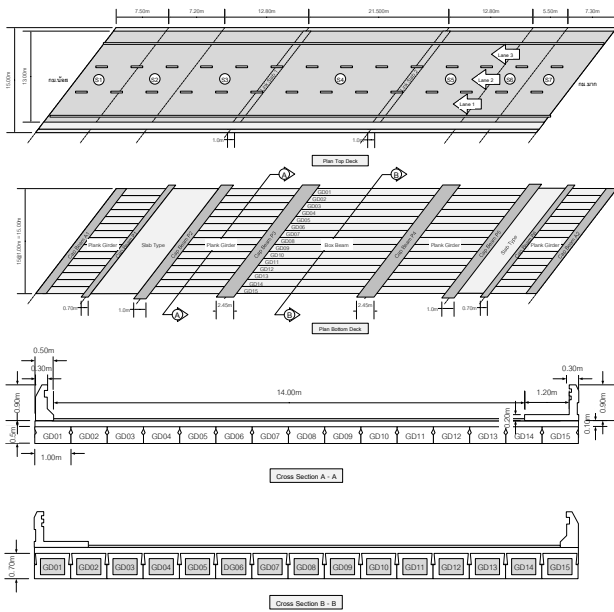


รูปที่ 22 ค่า IM ช่วงสะพานที่ 2 มีการกระจายตัวแบบโค้งปกติ

IM ของช่วงสะพานที่ 1 มีค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 20% ค่าสูงสุดทางสถิติอยู่ประมาณ 36% ซึ่งนับว่าสูงเมื่อเทียบกับค่า IM ตามมาตรฐาน AASHTO (AASHTO STANDARD IM = 0.3000 และ AASHTO LRFD IM = 0.2569 คำนวณสำหรับความยาวช่วงคาน 12 เมตร จากสมการที่ (5) และ (7) ตามลำดับ) IM ของช่วงสะพานที่ 2 มีค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 13% ค่าสูงสุดทางสถิติอยู่ประมาณ 28% ซึ่งก็นับว่าสูงเมื่อเทียบกับค่า IM ตามมาตรฐาน AASHTO (AASHTO STANDARD IM = 0.2623 และ AASHTO LRFD IM = 0.2399 คำนวณสำหรับความยาวช่วงคาน 20 เมตร จากสมการที่ 5.5 และ 5.7 ตามลำดับ) การเพิ่มขึ้นของ IM โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพิ่มขึ้นจาก 7% ของช่วงสะพาน Box Beam ในกรณีที่ไม่มีทางเดินเท้า (สะพานข้ามคลองลำผักชี) เป็น 13% ในกรณีที่มีทางเดินเท้า (สะพานข้ามคลองบางเสาธง) เป็นผลเนื่องมาจากความถี่ธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้างเนื่องจากความแข็งแกร่งของทางเดินเท้า ความถี่ธรรมชาติที่สูง เมื่อเกิดการกระตุ้นจะเกิดการแปรปรวนได้ง่าย ทำให้ IM โดยเฉลี่ยสูงขึ้น

4.4 ผลการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรของสะพานข้ามคลองบ้านระภาค

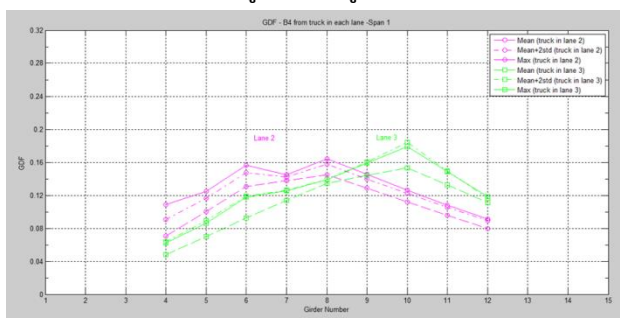
สะพานข้ามคลองบ้านระภาค มีลักษณะทางโครงสร้างเช่นเดียวกับสะพานข้ามคลองบางเสาธง แต่มีความต่างที่สะพานข้ามคลองบางระภาคมีมุมเฉียงประมาณ 30 องศา ดังแสดงในรูปที่ 23



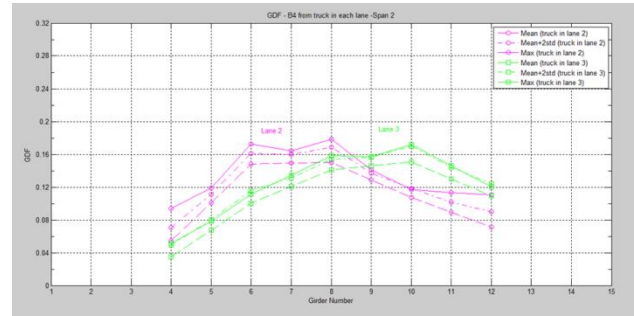
รูปที่ 23 ลักษณะทางกายภาพของสะพานข้ามคลองบ้านระภาค

ความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานข้ามคลองบ้านระภาค อย่างอิสระจำนวน 648 คัน ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ตามแนวทางการศึกษา พิจารณาที่ 2 บริเวณ ได้แก่ กึ่งกลางช่วงสะพานที่ 1 และกึ่งกลางช่วงสะพานที่ 2 ช่วงสะพานที่ 1 และช่วงสะพานที่ 2 มีความยาวช่วงคานจาก Bearing ถึง Bearing เท่ากับ 12 เมตร และ 20 เมตร ตามลำดับ สภาพการยึดรั้งบริเวณปลายช่วงคาน ช่วงสะพานที่ 1 ปลายช่วงสะพานด้านที่ติดกับตอม่อริมสภาพการยึดรั้งคานจะเป็น Free Bearing ยึดรั้งเฉพาะการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง ในขณะที่ปลายอีกด้านหนึ่ง มีลักษณะเป็น Fixed Bearing ยึดรั้งการเคลื่อนที่ทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ โดยอาจมีการเคลื่อนที่ในแนวราบได้เพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ ช่วงพื้นที่ต่อเนื่องที่เชื่อมระหว่างช่วงสะพานที่ 1 กับช่วงสะพานที่ 2 ยังต้านทานการหมุนอย่างอิสระของปลายคานช่วงสะพานที่ 1 อีกด้วย ส่วนช่วงสะพานที่ 2 ปลายช่วงสะพานทั้งสองด้าน มีลักษณะเป็น Fixed Bearing โดยมีช่วงพื้นที่ต่อเนื่องต้านทานการหมุนอย่างอิสระของปลายคานทั้งสองด้าน

จากข้อมูลรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพาน มีรถบรรทุกใช้ช่องจราจรที่ 2 และช่องจราจรที่ 3 จำนวน 602 และ 46 คัน ตามลำดับ กราฟแสดงค่าทางสถิติของ GDF ของแต่ละคาน แสดงไว้ในรูปที่ 24 และรูปที่ 25

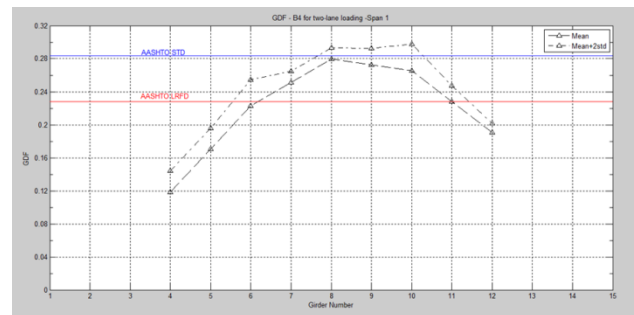


รูปที่ 24 ค่าทางสถิติของ GDF ช่วงสะพานที่ 1 แยกช่องจราจร

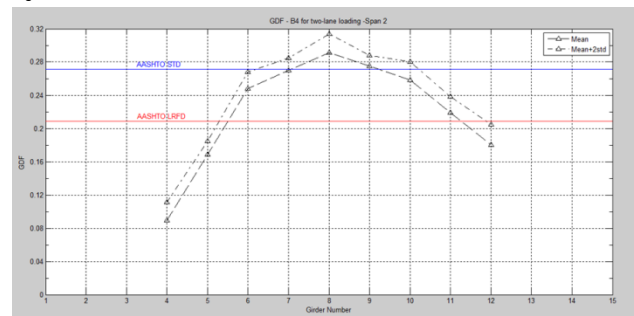


รูปที่ 25 ค่าทางสถิติของ GDF ช่วงสะพานที่ 2 แยกช่องจราจร

ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของ GDF รวม คำนวณได้จากสมการที่ (10) และ (11) ตามลำดับ กราฟแสดงค่าทางสถิติ แสดงไว้ในรูปที่ 26 และรูปที่ 27 พร้อมด้วย ค่า GDF ตามมาตรฐาน AASHTO STANDARD และ AASHTO LRFD GDF ตามมาตรฐาน AASHTO STANDARD และมาตรฐาน AASHTO LRFD คำนวณได้จากสมการที่ (2) และ (3) มีค่าเท่ากับ 0.2836 และ 0.2280 ตามลำดับ สำหรับ Plank Girder และ 0.2715 และ 0.2087 ตามลำดับ สำหรับ Box Beam



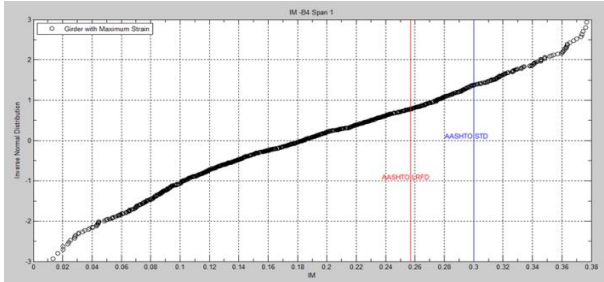
รูปที่ 26 ค่าทางสถิติของ GDF รวม ช่วงสะพานที่ 1 และค่า GDF (AASHTO)



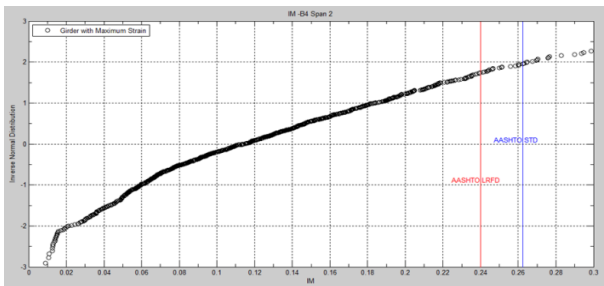
รูปที่ 27 ค่าทางสถิติของ GDF รวม ช่วงสะพานที่ 2 และค่า GDF (AASHTO)

จากกราฟในรูปที่ 26 และรูปที่ 27 จะเห็นได้ว่า แรงเนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุก ไม่ค่อยกระจายลงคานแต่ละคาน ทั้งนี้เนื่องจากแรงถูกบีบให้กระจุกตัวอยู่บริเวณที่มีน้ำหนักรถบรรทุกกระทำด้วยความแข็งเกร็งของทางเดินเท้า นอกจากนี้ ผลของมุมเฉียงของสะพานซึ่งในกรณีของสะพานข้ามคลองบ้านระภาค มีค่ามุมเฉียงถึง 30 องศา ยิ่งทำให้แรงยิ่งกระจุกตัว ดังจะเห็นได้จาก เมื่อเปรียบเทียบกับสะพานข้ามคลองบางเสาธง ซึ่งมีลักษณะทางโครงสร้างเหมือนสะพานข้ามคลองบ้านระภาคทุกประการ ยกเว้นสะพานข้ามคลองบางเสาธงไม่มีมุมเฉียง สะพานข้ามคลองบางเสาธงจะกระจายแรงได้ดีกว่าสะพานข้ามคลองบ้านระภาค การที่โครงสร้างถูกบีบด้วยทางเดินเท้าและมุมเฉียง ทำให้ค่าเฉลี่ยของ GDF รวม และค่าสูงสุดทางสถิติ มีค่าสูงมากขึ้นอีก โดยในกรณีนี้ GDF ตามมาตรฐาน AASHTO STANDARD ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่า GDF ตามสภาพการใช้งานจริงมากกว่า AASHTO LRFD

ค่าตัวคูณแรงกระแทก (IM) จากข้อมูลการตรวจวัดความเครียด คำนวณได้จากสมการที่ (9) โดยใช้หลักการเดียวกับทั้งสามสะพานก่อนหน้านี้ ซึ่งค่า IM ที่คำนวณได้มีการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบโค้งปกติ ดังแสดงในรูปที่ 28 และรูปที่ 29 สำหรับช่วงสะพานที่ 1 Plank Girder 12 เมตร และช่วงสะพานที่ 2 Box Beam 20 เมตร ตามลำดับ



รูปที่ 28 ค่า IM ช่วงสะพานที่ 1 มีการกระจายตัวแบบโค้งปกติ



รูปที่ 29 ค่า IM ช่วงสะพานที่ 2 มีการกระจายตัวแบบโค้งปกติ

IM ของช่วงสะพานที่ 1 มีค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 19% ค่าสูงสุดทางสถิติอยู่ประมาณ 35% ซึ่งนับว่าสูงเมื่อเทียบกับค่า IM ตามมาตรฐาน AASHTO (AASHTO STANDARD IM = 0.3000 และ AASHTO LRFD IM = 0.2569) คำนวณสำหรับความยาวช่วงคาน 12 เมตร จากสมการที่ (5) และ (7) ตามลำดับ) IM ของช่วงสะพานที่ 2 มีค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 11% ค่าสูงสุดทางสถิติอยู่ประมาณ 26% ซึ่งก็นับว่าสูงเมื่อเทียบกับค่า IM ตามมาตรฐาน AASHTO (AASHTO STANDARD IM = 0.2623 และ AASHTO LRFD IM = 0.2399) คำนวณสำหรับความยาวช่วงคาน 20 เมตร จากสมการที่ (5) และ (7) ตามลำดับ) ค่าทางสถิติของ IM ของสะพานข้ามคลองบ้านระกาศมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าทางสถิติของ IM ของสะพานข้ามคลองบางเสาธง ทั้งนี้เนื่องจากความถี่ธรรมชาติพื้นฐาน ซึ่งถูกกระตุ้นได้ง่าย ของทั้งสองสะพานนี้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยไม่ได้ขึ้นอยู่กับมุมเฉียงของสะพาน ซึ่งมีผลกับความถี่ธรรมชาติในโหมดที่สูงขึ้น แต่เป็นโหมดที่กระตุ้นให้เกิดได้ยากกว่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐาน

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรภายใต้สภาวะใช้งานของ สะพานข้ามคลองลำตันไทร สะพานข้ามคลองลำผักชี สะพานข้ามคลองบางเสาธง และสะพานข้ามคลองบ้านระกาศ สามารถสรุปได้ 2 ประเด็นดังนี้

ประเด็นที่ 1 ด้านความสามารถในการให้บริการ – สะพานทั้ง 4 แห่งยังคงมีความสามารถในการให้บริการที่ดี ค่าความเครียดสูงที่สุดเนื่องจากการจราจรของรถบรรทุก ที่ตรวจวัดได้ในสภาวะใช้งานจริง ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ความต่อเนื่องของโครงสร้างทั้งในทิศทางตามแนวและตามขวางของสะพาน เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำ ทำให้เห็นถึงความสมบูรณ์ของโครงสร้าง

ประเด็นที่ 2 ด้านการออกแบบ – พิจารณาจากสองปัจจัยหลักที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างส่วนบน ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรง และค่าตัวคูณแรงกระแทก

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรง จะขึ้นอยู่กับกรวยค้ำคานสะพานและมุมเฉียงของสะพาน แต่จะไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนช่วงต่อเนื่องของสะพาน ในช่วงสะพานที่มีการยึดค้ำคานเนื่องจากช่วงพื้นต่อเนื่องเพียงอย่างเดียวและสะพานไม่มีมุมเฉียง แรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกจะกระจายลงคานต่างๆได้ดี ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรงของคานที่รับน้ำหนักสูงสุดจะมีค่าต่ำกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรงของคานที่รับน้ำหนักสูงสุดของช่วงสะพานที่มีการยึดค้ำคานเพิ่มเติมขึ้นเนื่องจากทางเท้าและสะพานมีมุมเฉียง

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรงตามที่แนะนำโดยมาตรฐานการออกแบบสะพาน AASHTO LRFD (2007 SI) และ AASHTO STANDARD (2002) สำหรับสะพาน Box Beam 20 เมตร และ Plank Girder 12 เมตร พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรงตาม AASHTO LRFD ให้ค่าที่ต่ำกว่า AASHTO STANDARD โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรงตามที่ได้ตรวจวัดจริงของสะพานประเภทนี้ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรงตาม AASHTO LRFD ให้ค่าที่เดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรงของคานที่รับน้ำหนักสูงสุดของช่วงสะพานที่มีการยึดค้ำคานต่อเนื่องเพียงอย่างเดียวและสะพานไม่มีมุมเฉียง ส่วนช่วงสะพานที่มีการยึดค้ำคานเพิ่มเติมขึ้นเนื่องจากทางเท้าและสะพานมีมุมเฉียง ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรงของคานที่รับน้ำหนักสูงสุดจะใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรงตาม AASHTO STANDARD ในส่วนของค่าตัวคูณแรงกระแทก ผลการศึกษาที่ได้เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรง

ทั้ง Box Beam และ Plank Girder ตามแบบมาตรฐานของสำนักสำรวจและออกแบบ ออกแบบและก่อสร้างตามมาตรฐาน AASHTO STANDARD จึงอาจกล่าวได้ว่า การนำเอา Box Beam และ Plank Girder ซึ่งแต่เดิมใช้สำหรับการก่อสร้างสะพานช่วงเดียว มาทำการก่อสร้างให้เป็นสะพานช่วงต่อเนื่อง ตามแบบก่อสร้างในครั้งนี้ มีความปลอดภัย นอกจากนี้ ยังอาจกล่าวได้ว่า ในการออกแบบสะพานประเภท Box Beam และ Plank Girder ที่มีการยึดค้ำคานสูง มีทางเท้า สะพานมีมุมเฉียงมาก การเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแรงตามมาตรฐาน AASHTO STANDARD ให้ผลในเชิงอนุรักษ์ (Conservative) มากกว่า AASHTO LRFD

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมทางหลวง (2559). โครงการตรวจวัดสะพาน Box Beam และ Plank Girder ประเภทพื้นต่อเนื่องของกรมทางหลวงเพื่อปรับปรุงการออกแบบ. สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.
- [2] AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges (17th Edition, 2002)
- [3] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (SI Units, 4th Edition, 2007)
- [4] Kim, S., and Nowak, A.S. (1997). "Load Distribution and Impact Factors for I-Girder Bridges." J. Bridge Engrg., ASCE, 2(3), 97-104.