

สัดส่วนผลตอบสนองสูงสุดของคานสะพานต่อเนื่อง 3 ช่วง เนื่องจากรถบรรทุกไทยและน้ำหนักบรรทุกจร HL-93

สุนิติ สุภาพ^{1*} และ ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด¹

มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

บทคัดย่อ

ปัจจุบัน AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) ได้กำหนดให้ออกแบบสะพานด้วยวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load and Resistance Factor Design : LRFD) โดยมีน้ำหนักบรรทุกจรเรียกว่า HL-93 ซึ่งแตกต่างไปจาก HS20-44 ซึ่งเป็นน้ำหนักบรรทุกจรเดิมและต่างไปจากน้ำหนักบรรทุกตามประกาศต่างๆ ของกรมทางหลวง บทความนี้จึงได้ศึกษาผลตอบสนองสูงสุดของสะพานระบบคานต่อเนื่อง 3 ช่วงซึ่งมีความยาวช่วงรวมตั้งแต่ 90-180 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกจรไทยเปรียบเทียบกับ HL-93 เพื่อหาสัดส่วนแรงเฉือนและสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุด ผลการศึกษาพบว่าแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดในแต่ละรูปแบบสะพานที่พิจารณาจากน้ำหนักบรรทุกจรไทยส่วนใหญ่เกิดจากรถบรรทุกแบบกึ่งพ่วงที่มีน้ำหนักบรรทุกรวม 45 ตัน จากผลการวิเคราะห์ที่โครงสร้างได้สัดส่วนแรงเฉือนและสัดส่วนโมเมนต์ดัดสำหรับแต่ละความยาวช่วงสะพานเมื่อเทียบกับ HL-93 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.974-1.413 และยังมีค่ามากกว่าสัดส่วนที่ได้จากการศึกษาสะพานช่วงเดี่ยวธรรมดาที่มีความยาวช่วงเท่ากันอย่างน้อยมีนัยสำคัญสูงสุดถึงร้อยละ 23.25 สัดส่วนที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นตัวคูณปรับค่ากำลังที่ต้องการของสะพานรับน้ำหนักบรรทุก HL-93 เพื่อให้ผลตอบสนองสูงสุดสอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกจรไทยได้

* Corresponding author : E-mail : suniti.suparp@yahoo.com

¹ อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

Maximum Response Ratios of Three-Span Continuous Bridge Girders Due to Thai Trucks and HL-93 Live Loadings

Suniti Suparp^{1*} and Panuwat Joyklad¹

Kasem Bundit University, Pattanakarn Rd, Suanluang, Bangkok 10250

Abstract

The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) has recently issued the design provisions using the method of Load and Resistance Factor Design (LRFD) for current bridge design practices. The vehicular live loadings designated as HL-93 has been introduced for the design purposes. Nevertheless, Thai truck loads rated by the Department of Highways are different from those of HL-93. This study was then focused on the maximum responses of three-span continuous bridge girders with the total length ranging from 90-180 meters due to Thai truck loads and those of HL-93. A comparison on the maximum shear ratios and bending moment ratios of the continuous bridge girders was made. The results revealed that, in each type of bridge configuration, the maximum shear and bending moment were primarily caused by the truck with semi-trailer having a total weight of 45 tons. From the structural analysis, the shear ratios and the moment ratios were found to vary between 0.974-1.413 via the various bridge girder span lengths. Furthermore, the ratios in some configurations of continuous bridge were found to be 23.25% larger than those from the previous study on the simply supported girder-type bridges having the same span length. These ratios could be applied as multipliers to HL-93 in order to obtain the required strength of bridges that is compatible to Thai truck loads.

* Corresponding author : E-mail : suniti.suparp@yahoo.com

¹ Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

การออกแบบสะพานในประเทศไทยนิยมอ้างอิงตามมาตรฐานที่กำหนดโดย American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) ซึ่งได้จัดทำมาตรฐานการออกแบบสะพานเรียกว่า AASHTO Standard Specifications [1] โดยกำหนดน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดสำหรับการออกแบบไว้คือ HS20-44 ต่อมา AASHTO ได้จัดทำมาตรฐานการออกแบบสะพานอีกฉบับหนึ่งเรียกว่า AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [2] ซึ่งกำหนดให้ออกแบบด้วยวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load and Resistance Factor Design : LRFD) และได้กำหนดน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับการออกแบบไว้เป็น HL-93 โดยรูปแบบน้ำหนักบรรทุกจรดังกล่าวทั้งหมดได้แสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 1 อย่างไรก็ตามการออกแบบโครงสร้างสะพานในประเทศไทยต้องพิจารณาน้ำหนักบรรทุกตามประกาศฯ ของกรมทางหลวง [3-8] ซึ่งมีรูปแบบและน้ำหนักบรรทุกแตกต่างจากน้ำหนักบรรทุกจรตาม AASHTO (STD) [1] และ AASHTO(LRFD) [2] ทั้งนี้ AASHTO อนุญาตให้ปรับค่าน้ำหนักบรรทุกจรตามสัดส่วนได้ อย่างไรก็ตามที่ผ่านมามีการปรับค่าน้ำหนักบรรทุกจรดังกล่าวได้จากผลการศึกษาในสะพานช่วงเดียวและสะพานต่อเนื่อง ซึ่งพิจารณาเฉพาะน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HS20-44 [9-12] เท่านั้น บทความนี้จึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของคานสะพานต่อเนื่อง 3 ช่วงตามประกาศฯ ของกรมทางหลวง เปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HL-93 โดยคานสะพานต่อเนื่องมีความยาวช่วงที่เท่ากันและไม่เท่ากันและได้คำนึงถึงผลของความแข็งเชิงดัด (Flexural Rigidity) ของคานในแต่ละช่วงด้วย เพื่อเปรียบเทียบแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานสะพานที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกไทยกับ HL-93 รวมทั้งเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการศึกษาในคานสะพานช่วงเดียวด้วย ผลการศึกษาค้างนี้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่

สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ออกแบบสะพานในประเทศไทยที่อ้างอิงตาม AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [2]

2. รูปแบบและน้ำหนักบรรทุกรถทุกไทย

ปี พ.ศ.2548 กรมทางหลวงได้กำหนดรูปแบบและน้ำหนักบรรทุกรถทุกไว้ในประกาศ [3] โดยได้กำหนดยานพาหนะซึ่งประกอบด้วยยานพาหนะชนิดรถเดี่ยว (Single Unit) ยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถกึ่งพ่วง (Semi-Trailer) และยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (Full Trailer) ดังรูปที่ 1 อนึ่ง กรมทางหลวงชนบทได้กำหนดยานพาหนะที่สามารถวิ่งบนถนนในเขตความรับผิดชอบของกรมทางหลวงชนบทเองได้เช่นเดียวกัน โดยได้ออกประกาศ [13] ที่มีรายละเอียดน้ำหนักบรรทุกและรูปแบบรถบรรทุกคล้ายกับประกาศฯ ของกรมทางหลวงฉบับปี พ.ศ.2548 ต่อมากรมทางหลวงได้ออกหนังสืออนุญาตและประกาศเพิ่มเติมอีกหลายฉบับ [4-8] ซึ่งได้กำหนดรูปแบบรถบรรทุกและยานพาหนะที่ใช้ขนส่งวัสดุขนาดใหญ่เพิ่มเติม กำหนดน้ำหนักบรรทุกลงเพลาและน้ำหนักบรรทุกรวมของรูปแบบรถแต่ละชนิดให้เหมาะสม รวมถึงกำหนดระยะห่างระหว่างสลักพ่วง (King Pin) กับศูนย์กลางของเพลาคือ 1 (ระยะ S ในรูปที่ 1) ของยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถกึ่งพ่วง (Semi-Trailer) ให้สัมพันธ์กับน้ำหนักบรรทุกลงเพลาอีกด้วย กล่าวโดยสรุปคือ ถ้าพิจารณารูปแบบรถบรรทุกตามประกาศทั้งหมดของกรมทางหลวง ตั้งแต่ปี พ.ศ.2548–2554 ข้างต้น สามารถสรุปรูปแบบรถบรรทุก น้ำหนักลงเพลา ระยะห่างระหว่างเพลาและน้ำหนักรวม ประกอบไปด้วยยานพาหนะชนิดรถเดี่ยว (Single Unit) 4 ประเภท ยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถกึ่งพ่วง (Semi-Trailer) 26 ประเภท และยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (Full-Trailer) อีก 14 ประเภท [14]



รูปที่ 1 รูปแบบยานพาหนะที่กำหนดไว้ในประกาศฯ ของกรมทางหลวง

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาผลกระทบเนื่องจากความแตกต่างของรูปแบบและน้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุกจริงกับน้ำหนักบรรทุกจรตามมาตรฐาน AASHTO(STD) หรือ HS20-44 ในการออกแบบสะพาน พบว่าในบางความยาวช่วงของคานสะพานหรือในบางประเภทของรถบรรทุก หน่วยแรงที่คำนวณได้จาก HS20-44 ให้ค่าที่ไม่มีความปลอดภัย [15-16] ซึ่งควรต้องปรับปรุงเพื่อให้สอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกจริงในแต่ละพื้นที่ สำหรับประเทศไทย สมบัติและสมพร [17] ได้ศึกษาผลกระทบดังกล่าว โดยได้ตรวจสอบความปลอดภัยของคานสะพานเนื่องจากรถบรรทุกไทยวิ่งเป็นขบวนที่ระยะห่างระหว่างรถบรรทุกเท่าๆ กัน และนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับ HS20-44 โดยได้ทำการเลือกรถบรรทุกที่เป็นที่นิยมในประเทศไทยจำนวน 7 ลักษณะ (จากทั้งหมด 72 ลักษณะตามประกาศของกรมทางหลวง) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้จำกัดความยาวของคานสะพานไว้เพียง 37.16 เมตร ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าหน่วยแรงในคานสะพานเนื่องจากรถบรรทุกประเภทที่ 3 (รถกึ่งพ่วงหนัก 38 ตัน) และประเภทที่ 6 (รถพ่วงหนัก 35 ตัน) มีค่ามากกว่าผลการคำนวณจาก HS20-44 สูงสุดถึงร้อยละ 26 และ 23 ตามลำดับ สอดคล้องกับข้อเสนอแนะโดยกรมทางหลวงที่ให้เพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HS20-44 ในการออกแบบสะพานอีกร้อยละ 30 ในขณะที่กรณีการและสมโพธิ์ [18] ได้ทำการเปรียบเทียบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานสะพานเนื่องจากรถบรรทุกไทยที่บรรทุกน้ำหนักเกินจาก 21 ตันไปเป็น 26, 28 และ 35 ตัน ตามลำดับ เปรียบเทียบกับ HS20-44 บนสะพานช่วงเดียวที่มีความยาวช่วงตั้งแต่ 10 ถึง 38 เมตร และจัดรถวิ่งเป็นขบวนติดกันโดยรูปแบบของรถบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์จำลองมาจากรถบรรทุกที่มีจำหน่ายอยู่ในประเทศไทย ผลการวิเคราะห์พบว่าสำหรับคานสะพานช่วงสั้นที่มีความยาวช่วงไม่เกิน 15 เมตร การออกแบบ

สะพานโดยใช้ HS20-44 สามารถใช้แทนรถบรรทุกไทยขนาด 21 ตัน ได้อย่างปลอดภัย ในขณะที่ความยาวช่วงสะพานที่เกิน 15 เมตร เป็นต้นไป ค่าหน่วยแรงสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ HS20-44 จะมีค่ามากกว่าถึงร้อยละ 94.69 สำหรับที่ความยาวช่วง 38 เมตรและหากทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุกไทยให้เป็น 28 และ 35 ตัน จะทำให้เกิดหน่วยแรงส่วนเกินเมื่อเปรียบเทียบกับ HS20-44 ที่ความยาวช่วงสูงสุด 38 เมตร ถึงร้อยละ 170.64 และ 238.30 ตามลำดับ

จะเห็นว่า ตัวอย่างงานวิจัยทั้งสองข้างต้นมีประโยชน์ต่องานออกแบบสะพานในประเทศไทยอย่างมาก อย่างไรก็ตามถ้าหากมีการพิจารณาความยาวช่วงคานสะพานที่หลากหลายและขนาดต่างๆ ของรถบรรทุกที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน รวมถึงน้ำหนักแบบ UCL (ดูตารางที่ 1) ที่อาจให้ค่าวิกฤติสำหรับสะพานช่วงยาวได้ ซึ่งต่อมาสุนิติและภาณุวัฒน์ [9-12] ได้เปรียบเทียบแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในคานสะพานช่วงเดียวที่มีความยาวช่วงตั้งแต่ 5-60 เมตร และสะพานต่อเนื่อง 3 ช่วงที่มีความยาวช่วงเท่ากันและไม่เท่ากันที่มีความยาวสะพานรวมตั้งแต่ 90 เมตรถึง 180 เมตร เนื่องจากรถบรรทุกไทยตามประกาศของกรมทางหลวงตั้งแต่ปี พ.ศ.2548-2552 และน้ำหนักบรรทุกจร HS20-44 พบว่าแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดในแต่ละความยาวช่วงสะพานเกิดจากรถบรรทุกแบบต่างชนิดกันและไม่จำเป็นต้องเกิดจากรถบรรทุกที่มีน้ำหนักบรรทุกรวมมากที่สุด ผลการวิเคราะห์โครงสร้างดังกล่าวได้เสนอให้นำสัดส่วนแรงเฉือนและสัดส่วนโมเมนต์ดัดที่สัมพันธ์กับความยาวช่วงสะพานไปปรับเพิ่มค่ากับน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HS20-44 เพื่อให้สอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกไทย อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าการศึกษาที่ได้กล่าวมาทั้งหมดยังอ้างอิงรูปแบบน้ำหนักบรรทุกจรที่กำหนดโดยมาตรฐาน AASHTO(STD) ยังมิได้มีการพิจารณารูปแบบน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HL-93 ซึ่งกำหนดโดยมาตรฐาน

AASHTO(LRFD) รวมถึงการประยุกต์ใช้ในสะพานต่อเนื่องที่มีความยาวช่วงและความแข็งเชิงดัด (Flexural Rigidity) ของคานต่อเนื่องในแต่ละช่วงสะพานไม่เท่ากัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พิจารณาปัจจัยต่างๆ ข้างต้นดังกล่าว เพื่อจะทำให้เกิดการประยุกต์ผลการศึกษาไปใช้ได้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น

4. วิธีการศึกษา

4.1 การจำลองโครงสร้าง

คานสะพานที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นโครงสร้างสมมาตรรอบแกนกึ่งกลางของคานช่วงกลาง โดยเป็นแบบคานต่อเนื่อง 3 ช่วงที่มีความยาวช่วงเท่ากันและไม่เท่ากัน (Three-Equal and Unequal-Span Continuous Beams) ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีความยาวรวมตั้งแต่ 90 เมตรถึง 180 เมตร ซึ่งแนะนำโดย Federal Highway Administration (FHWA) [19] และมีค่าใกล้เคียงกับความยาวรวมของสะพานต่อเนื่องส่วนใหญ่ในประเทศไทย การกำหนดความยาวช่วงสะพานจะมีเงื่อนไขดังนี้ คือ (1) ความยาวช่วงริม (L_1) ≥ 30 เมตร (2) ความยาวช่วงกลาง (L_2) \geq ความยาวช่วงริม (L_1) (3) ความยาวช่วงกลาง (L_2) ≤ 100 เมตร และ (4) 90 เมตร \leq ความยาวช่วงกลาง (L_2) + 2 เท่าของความยาวช่วงริม (L_1) ≤ 180 เมตร

โดยทั่วไปโมเมนต์เฉื่อยของหน้าตัดในคานจะมีผลต่อค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดของคานในแต่ละช่วง ดังนั้นเพื่อให้ลักษณะของสะพานที่ทำการวิเคราะห์ครอบคลุมในทุกกรณีที่อาจจะเกิดขึ้น จึงกำหนดสัดส่วนโมเมนต์เฉื่อยของคานสะพานช่วงกลาง (I_2) กับคานสะพานช่วงริม (I_1) จำนวน 3 รูปแบบด้วยกัน โดยกำหนดสัญลักษณ์เป็น Con.1, Con.2 และ Con.3 ซึ่งหมายถึง สัดส่วน I_2/I_1 เท่ากับ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ อนึ่งหากความยาวช่วงสะพานเท่ากันทั้ง 3 ช่วง จะกำหนดให้สัดส่วน I_2/I_1 เท่ากับ 1 เท่านั้น เมื่อกำหนดเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้นทั้งหมด ทำให้ได้รูปแบบคานสะพานที่ทำการวิเคราะห์ 52 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 2

ในการศึกษาจะพิจารณาผลการวิเคราะห์เฉพาะผลตอบสนองของโครงสร้างได้แก่ โมเมนต์บวกสูงสุดภายในคานสะพานช่วง AB (M_{AB}^+) โมเมนต์บวกสูงสุดภายในคานสะพานช่วง BC (M_{BC}^+) แรงเฉือนสูงสุดภายใน

คานสะพานช่วง AB (V_{AB}) แรงเฉือนสูงสุดภายในคานสะพานช่วง BC (V_{BC}) รวมทั้งโมเมนต์ลบสูงสุดที่ฐานรองรับ B (M_B^-) รายละเอียดต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 โดยที่ M_{CD}^+ เท่ากับ M_{AB}^+ , M_C เท่ากับ M_B^- และ V_{CD} เท่ากับ V_{AB}

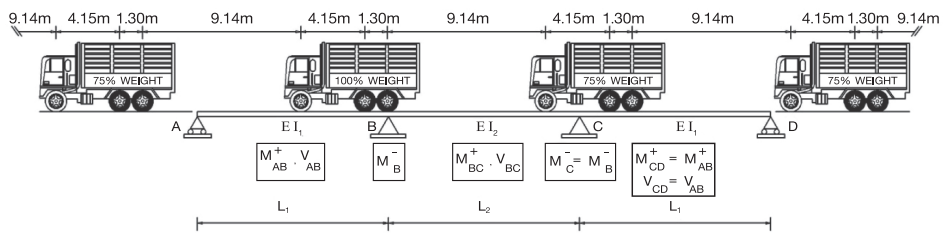
4.2 รถบรรทุกและรูปแบบการวางน้ำหนักบรรทุก

ในการศึกษา ได้ใช้น้ำหนักบรรทุกไทยตามประกาศฯ ของกรมทางหลวงปี พ.ศ.2548, 2550, 2552 และ 2554 [3-8] กับน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HL-93 ตามมาตรฐาน AASHTO(LRFD) ซึ่งประกอบด้วยรูปแบบน้ำหนักบรรทุกจร 3 ประเภทตามตารางที่ 1 โดยในการวิเคราะห์ที่โครงสร้างสะพาน จะเลือกใช้รถบรรทุกไทยบางรูปแบบที่มีผลต่อแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง เกณฑ์ที่ใช้ในการเลือกรถบรรทุกจะคำนึงถึง 3 ปัจจัยด้วยกัน คือ (1) น้ำหนักบรรทุกที่พิจารณาว่าหากรถบรรทุกประเภทเดียวกันมีความยาวช่วงรถหรือมีระยะห่างระหว่างเพลาท่ากันแล้วรถบรรทุกที่มีน้ำหนักบรรทุกมากกว่าก็จะทำให้เกิดแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงกว่า (2) ระยะห่างระหว่างเพลาน้อยเมื่อแล่นต่อกันบนสะพานจะทำให้มีน้ำหนักบรรทุกมากกระทำบนสะพานมากกว่ารถบรรทุกที่มีระยะห่างระหว่างเพลามากกว่า และ (3) ไม่พิจารณารูปแบบรถบรรทุกที่จะประกาศยกเลิกในวันที่ 31 ธันวาคม 2555

จากปัจจัยข้างต้น จะได้รถบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยมีรูปแบบและน้ำหนักบรรทุกไทยแบบยานพาหนะชนิดรถเดี่ยว (Single Unit) 2 ประเภท แบบยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถกึ่งพ่วง (Semi-Trailer) 9 ประเภท และแบบยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (Full-Trailer) 4 ประเภท เท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 1 อย่างไรก็ตามในประกาศฯ ของกรมทางหลวงไม่ได้กำหนดระยะห่างระหว่างเพลารถบรรทุกหรือระยะห่างระหว่างเพลารถของตัวรถลากจูงกับเพลารถพ่วง ซึ่งจากการรวบรวมข้อมูลรถบรรทุกที่มีใช้และผลิตในประเทศ [9,11] จึงนำข้อมูลเหล่านั้นมาใช้ในการกำหนดระยะห่างระหว่างเพลารถชนิดต่างๆ

การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกไทย ได้กำหนดให้รถบรรทุกเพียงคันเดียวและรถบรรทุกหลายคันเคลื่อนที่เป็นขบวนในแต่ละช่องจราจร ซึ่งกำหนดให้รถบรรทุกทุกประเภทมีระยะห่างระหว่างเพลาลังของรถคันหน้าถึงเพลานำรถของคันที่ตามมามีระยะเท่ากับ 9.14 เมตร (30 ฟุต) [1 : Appendix B] รถบรรทุกจะถูกจัดวางเป็นขบวนในลักษณะวิ่งไปในทิศทางและในช่องจราจรเดียวกันจำนวน 1 ช่องจราจร โดยมีจำนวนรถบรรทุกเคลื่อนที่เต็มช่วงความยาวสะพาน และจัดให้รถบรรทุกที่มีน้ำหนักขนาดร้อยละ 75 วางสลับกันในขบวน ดังแสดงในรูปที่ 2

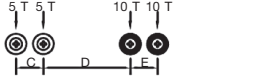
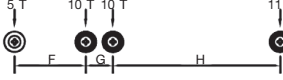
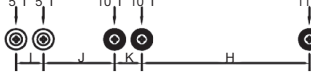
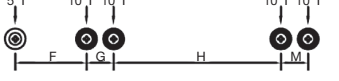

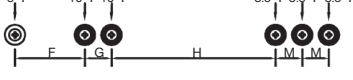
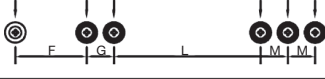
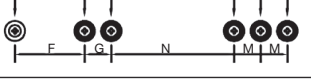
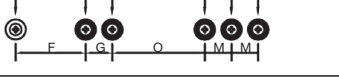
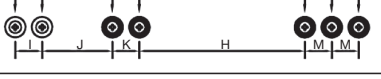
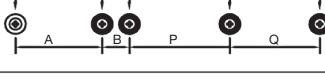
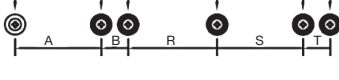
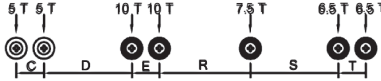
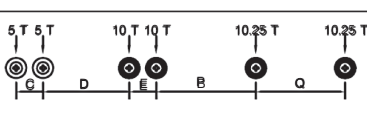
การวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อหาผลตอบสนองต่ำสุดหรือสูงสุดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ที่จะอาศัยหลักการของกรอบเส้นอิทธิพล (Influence-Based Enveloping Analysis) โดยได้นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาเป็นเครื่องมือช่วยในการคำนวณ ซึ่งจะช่วยจัดน้ำหนักบรรทุกเพื่อให้เกิดผลตอบสนองต่ำสุดหรือสูงสุดได้ตามเส้นอิทธิพลของผลตอบสนองนั้นๆ ทั้งนี้การวิเคราะห์โครงสร้างจะรวมผลของแรงกระแทก (Dynamic Impact Effects) ตาม AASHTO(LRFD) เข้าไปในน้ำหนักรถบรรทุกไทยและน้ำหนักบรรทุกจร HL-93 ด้วย



รูปที่ 2 คานสะพานต่อเนื่องและรูปแบบการวางน้ำหนักบรรทุกเป็นขบวน

ตารางที่ 1 รูปแบบและน้ำหนักรถบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์

รูปแบบรถ (น้ำหนักบรรทุก รวม:ตัน)	น้ำหนักต่อเพล (ตัน)	ตามมาตรฐาน/ประกาศฯ	หมายเหตุ
HS20-44(Truck) (33.13)	3.57 T (35 kN) 14.78 T (145 kN) 14.78 T (145 kN) 	AASHTO(STD)	1. HS20-44 คือ รูปแบบรถที่ให้ค่าผลตอบสนองสูงสุดที่ได้จากรูปแบบรถระหว่าง HS20-44(Truck) และ HS20-44(UCL)
HS20-44(UCL) (0.95L+8.16 or 11.83)	CONCENTRATED LOAD 8.16 T (80 kN) FOR MOMENT 11.83 T (116 kN) FOR SHEAR UNIFORM LOAD 0.95 T/m (9.3 kN/m) 	AASHTO(STD)	
HL-93(Tandem) (0.95L+22.42)	11.21 T (110 kN) 11.21 T (110 kN) UNIFORM LOAD 0.95 T/m (9.3 kN/m) 	AASHTO(LRFD)	2. HL-93 คือ รูปแบบรถที่ให้ค่าผลตอบสนองสูงสุดที่ได้จากรูปแบบรถระหว่าง HL-93(Tandem) HL93(Truck) และ HL-93(Truck)
HL-93(Truck) (0.95L+33.13)	3.57 T (35 kN) 14.78 T (145 kN) 14.78 T (145 kN) UNIFORM LOAD 0.95 T/m (9.3 kN/m) 	AASHTO(LRFD)	
HL-93 (Continuous) (0.95L+59.63)	(0.9)(3.57 T) (0.9)(14.78 T) (0.9)(14.78 T) UNIFORM LOAD (0.9)(0.95 T/m) 	AASHTO(LRFD)	
Truck25 (25)	5 T 10 T 10 T 	ปทล.(2548) หมวด 2 ข้อ 15	

รูปแบบรถ (น้ำหนักบรรทุก รวม:ตัน)	น้ำหนักต่อเพลลา (ตัน)	ตามมาตรฐาน/ ประกาศฯ	หมายเหตุ																																										
Truck30 (30)		ปทล.(2548) หมวด 2 ข้อ 18	93(Continuous) 3. ระยะห่างระหว่าง เพลลาที่กำหนดใน รูปแบบรถชนิด ต่างๆ																																										
Semi36 (36)		ปทล.(2548) หมวด 2 ข้อ 19(2)																																											
Semi41 (41)		ปทล.(2548) หมวด 2 ข้อ 19(2)																																											
Semi45(1) (45)		ปทล.(2548) หมวด 2 ข้อ 19(4)	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Axle Distance (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>A</td><td>4025</td></tr> <tr><td>B</td><td>1250</td></tr> <tr><td>C</td><td>1300</td></tr> <tr><td>D</td><td>3300</td></tr> <tr><td>E</td><td>1250</td></tr> <tr><td>F</td><td>3025</td></tr> <tr><td>G</td><td>1250</td></tr> <tr><td>H</td><td>6825</td></tr> <tr><td>I</td><td>1300</td></tr> <tr><td>J</td><td>3025</td></tr> <tr><td>K</td><td>1250</td></tr> <tr><td>L</td><td>5825</td></tr> <tr><td>M</td><td>1250</td></tr> <tr><td>N</td><td>4825</td></tr> <tr><td>O</td><td>3325</td></tr> <tr><td>P</td><td>4775</td></tr> <tr><td>Q</td><td>4300</td></tr> <tr><td>R</td><td>3325</td></tr> <tr><td>S</td><td>4025</td></tr> <tr><td>T</td><td>1250</td></tr> </tbody> </table>	Axle Distance (mm)		A	4025	B	1250	C	1300	D	3300	E	1250	F	3025	G	1250	H	6825	I	1300	J	3025	K	1250	L	5825	M	1250	N	4825	O	3325	P	4775	Q	4300	R	3325	S	4025	T	1250
Axle Distance (mm)																																													
A	4025																																												
B	1250																																												
C	1300																																												
D	3300																																												
E	1250																																												
F	3025																																												
G	1250																																												
H	6825																																												
I	1300																																												
J	3025																																												
K	1250																																												
L	5825																																												
M	1250																																												
N	4825																																												
O	3325																																												
P	4775																																												
Q	4300																																												
R	3325																																												
S	4025																																												
T	1250																																												
Semi50 (50)		ปทล.(2548) หมวด 2 ข้อ 19(4)																																											
Semi50.5(1) (50.5)		ปทล.(2548) หมวด 2 ข้อ 19(5)																																											
Semi49 (49)		ปทล.(2552) ข้อ 19/3(1)																																											
Semi47 (47)		ปทล.(2552) ข้อ 19/3(2)																																											
Semi45(2) (45)		ปทล.(2552) ข้อ 19/3(3)																																											
Semi50.5(2) (50.5)		ปทล.(2552) ข้อ 19/4																																											
Full47 (47)		ปทล.(2584) หมวด 2 ข้อ 20(2)	93(Continuous) 4. ปทล.คือ ประกาศฯ กรม ทางหลวง และ L คือ ความยาว ช่วงสะพาน																																										
Full50.5(1) (50.5)		ปทล.(2552) ข้อ 20/1 (เริ่มใช้ 1 ม.ค. 56)																																											
Full50.5(2) (50.5)		ปทล.(2552) ข้อ 20/2 (เริ่มใช้ 1 ม.ค. 56)																																											
Full50.5(3) (50.5)		ปทล.(2552) ข้อ 20/3 (เริ่มใช้ 1 ม.ค. 56)																																											

ตารางที่ 2 รูปแบบคานสะพานต่อเนื่อง 3 ช่วงที่ใช้ในการวิเคราะห์

รูปแบบ สะพาน	ความยาวช่วงสะพาน (เมตร)		สัดส่วน I_2/I_1	รูปแบบ สะพาน	ความยาวช่วงสะพาน (เมตร)		สัดส่วน I_2/I_1
	L_1	L_2			L_1	L_2	
30-30I1	30	30	Con.1	40-60I1	40	60	Con.1
30-40I1	30	40	Con.1	40-60I2	40	60	Con.2
30-40I2	30	40	Con.2	40-60I3	40	60	Con.3
30-40I3	30	40	Con.3	40-70I1	40	70	Con.1
30-50I1	30	50	Con.1	40-70I2	40	70	Con.2
30-50I2	30	50	Con.2	40-70I3	40	70	Con.3
30-50I3	30	50	Con.3	40-80I1	40	80	Con.1
30-60I1	30	60	Con.1	40-80I2	40	80	Con.2
30-60I2	30	60	Con.2	40-80I3	40	80	Con.3
30-60I3	30	60	Con.3	40-90I1	40	90	Con.1
30-70I1	30	70	Con.1	40-90I2	40	90	Con.2
30-70I2	30	70	Con.2	40-90I3	40	90	Con.3
30-70I3	30	70	Con.3	40-100I1	40	100	Con.1
30-80I1	30	80	Con.1	40-100I2	40	100	Con.2
30-80I2	30	80	Con.2	40-100I3	40	100	Con.3
30-80I3	30	80	Con.3	50-50I1	50	50	Con.1
30-90I1	30	90	Con.1	50-60I1	50	60	Con.1
30-90I2	30	90	Con.2	50-60I2	50	60	Con.2
30-90I3	30	90	Con.3	50-60I3	50	60	Con.3
30-100I1	30	100	Con.1	50-70I1	50	70	Con.1
30-100I2	30	100	Con.2	50-70I2	50	70	Con.2
30-100I3	30	100	Con.3	50-70I3	50	70	Con.3
40-40I1	40	40	Con.1	50-80I1	50	80	Con.1
40-50I1	40	50	Con.1	50-80I2	50	80	Con.2
40-50I2	40	50	Con.2	50-80I3	50	80	Con.3
40-50I3	40	50	Con.3	60-60I1	60	60	Con.1

5. ผลการศึกษา

5.1 สัดส่วนแรงเฉือนสูงสุดและสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุด

จากรูปแบบการจำลองโครงสร้างและการจัดวางน้ำหนักบรรทุกรูปแบบต่างๆ สามารถวิเคราะห์ผลตอบสนองของคานสะพานต่อเนื่องได้ เนื่องจากโครงสร้างที่ทำการวิเคราะห์มีความสมมาตร ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะ M_{AB}^+ , M_B^- , M_{BC}^+ , V_{AB} และ V_{BC} เท่านั้น จากนั้นจึงนำผลตอบสนองสูงสุดที่ได้จาก HL-93 ไปเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากน้ำหนักบรรทุกทุกไทยแต่ละ

รูปแบบแล้วบันทึกค่าสัดส่วนที่สูงที่สุดในแต่ละรูปแบบ โครงสร้างสะพาน จะได้เป็นสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดและสัดส่วนแรงเฉือนสูงสุดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกไทยตามประกาศของกรมทางหลวงกับ HL-93 ดังแสดงตามตารางที่ 3 จากผลการวิเคราะห์พบว่าสัดส่วนดังกล่าวส่วนใหญ่ได้มาจากรถบรรทุกแบบ Semi45(2) ยกเว้นในช่องตารางที่มีตัวอักษรยกกำกับไว้ โดยตัวอักษร ก ข และ ค หมายถึงค่าสัดส่วนดังกล่าวนั้นเกิดจากรถบรรทุกแบบ Full50.5(1), Semi49 และ Semi50.5(1) ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ค่าสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดเนื่องจากรถบรรทุกไทยกับ HL-93

รูปแบบโครงสร้างสะพาน	สัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุด			สัดส่วนแรงเฉือนสูงสุด	
	M_{AB}^+	M_B^-	M_{BC}^+	V_{AB}	V_{BC}
30-30I1	0.999 ^ก	1.009	0.974	1.159	1.149
30-40I1	1.006 ^ก	1.101	1.029	1.191	1.105
30-40I2	1.004 ^ก	1.085	1.023	1.178	1.108 ^ข
30-40I3	1.000 ^ก	1.092	1.027	1.170	1.110 ^ข
30-50I1	1.000 ^ก	1.189	1.099	1.228	1.087
30-50I2	1.000	1.136	1.120	1.211	1.095
30-50I3	1.000	1.131	1.130	1.198	1.099
30-60I1	1.003 ^ก	1.193	1.162	1.244	1.101
30-60I2	1.003 ^ก	1.271	1.159	1.256	1.110
30-60I3	1.001 ^ก	1.227	1.158	1.237	1.114
30-70I1	0.999 ^ก	1.171	1.158	1.266	1.137
30-70I2	1.003 ^ก	1.227	1.155	1.274	1.147
30-70I3	1.002 ^ก	1.275	1.153	1.279	1.153
30-80I1	0.995 ^ก	1.190	1.159	1.297	1.172
30-80I2	1.003 ^ก	1.242	1.165	1.302	1.182
30-80I3	1.002 ^ก	1.282	1.168	1.304	1.187
30-90I1	0.994 ^ก	1.215	1.172	1.329	1.214
30-90I2	1.005 ^ก	1.253	1.179	1.299	1.224
30-90I3	1.005 ^ก	1.284	1.183	1.330	1.230
30-100I1	0.989 ^ก	1.241	1.179	1.368	1.254
30-100I2	1.000 ^ก	1.281	1.186	1.368	1.262
30-100I3	1.000 ^ก	1.310	1.191	1.365	1.268

รูปแบบโครงสร้างสะพาน	สัดส่วนโมเมนต์คัตสูงสุด			สัดส่วนแรงเฉือนสูงสุด	
	M_{AB}^+	M_B^-	M_{BC}^+	V_{AB}	V_{BC}
40-40I1	1.059	1.171	1.020	1.094 ^ฏ	1.137
40-50I1	1.059	1.213	1.108	1.121 ^ฏ	1.094
40-50I2	1.053	1.219	1.127	1.105 ^ฏ	1.103
40-50I3	1.047	1.230	1.137	1.095 ^ฏ	1.106
40-60I1	1.062	1.319	1.161	1.150 ^ฏ	1.108
40-60I2	1.055	1.276	1.158	1.128 ^ฏ	1.116
40-60I3	1.051	1.272	1.157	1.115 ^ฏ	1.120
40-70I1	1.057	1.259	1.152	1.187 ^ฏ	1.143
40-70I2	1.056	1.329	1.152	1.159 ^ฏ	1.154
40-70I3	1.052	1.316	1.152	1.142 ^ฏ	1.159
40-80I1	1.062	1.261	1.162	1.232	1.177
40-80I2	1.059	1.355	1.167	1.195	1.187
40-80I3	1.054	1.386	1.171	1.171 ^ฏ	1.192
40-90I1	1.057	1.267	1.175	1.278	1.219
40-90I2	1.056	1.338	1.182	1.236	1.230
40-90I3	1.053	1.395	1.185	1.207	1.235
40-100I1	1.062	1.287	1.181	1.330	1.257
40-100I2	1.061	1.353	1.188	1.283	1.267
40-100I3	1.058	1.404	1.193	1.250	1.272
50-50I1	1.152	1.266	1.114	1.088	1.114 ^ค
50-60I1	1.156	1.321	1.160	1.094 ^ค	1.106
50-60I2	1.145	1.331	1.157	1.080	1.114
50-60I3	1.135	1.291	1.156	1.077	1.119
50-70I1	1.155	1.361	1.229	1.119	1.143
50-70I2	1.147	1.360	1.152	1.100	1.152
50-70I3	1.136	1.364	1.152	1.088	1.157
50-80I1	1.157	1.340	1.164	1.149	1.178
50-80I2	1.151	1.413	1.169	1.125	1.186
50-80I3	1.142	1.410	1.173	1.123	1.191
60-60I1	1.177	1.395	1.159	1.119	1.129

หมายเหตุ : ช่องที่มีตัวอักษรยก ก, ข, ค และช่องที่ไม่ได้กำหนดตัวอักษร หมายถึงค่าสัดส่วนดังกล่าวนั้น
เกิดจากรถบรรทุกแบบ Full50.5(1), Semi49, Semi50.5(1) และ Semi45(2) ตามลำดับ

5.2 การเปรียบเทียบสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดของคานสะพานต่อเนื่องกับคานสะพานช่วงเดียว

ค่าสัดส่วนผลตอบสนองโครงสร้างสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์คานสะพานต่อเนื่อง ได้นำมาเปรียบเทียบกับสัดส่วนสูงสุดที่ได้จากคานสะพานช่วงเดียว โดยสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดเนื่องจากรถบรรทุกไทยกับ HL-93 ของคานสะพานช่วงเดียวได้นำมาจากสุนิติและคณะ [14]

จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมด M_{AB}^+ , M_B^- , M_{BC}^+ , V_{AB} และ V_{BC} นำมาสรุปเป็นตารางแยกตามสัดส่วนโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคานต่อเนื่องดังแสดงในตารางที่ 4 ถึงตารางที่ 8 ตามลำดับ และนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนดังกล่าวสูงสุดกับความยาวช่วงสะพานดังรูปที่ 3 ถึงรูปที่ 7 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณารูปที่ 3 และสะพานช่วงที่ 1 จะเห็นว่าค่าสัดส่วนโมเมนต์ดัด M_{AB}^+ สูงสุดของคานสะพานต่อเนื่องจะมีค่ามากกว่าสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จากคานสะพานช่วงเดียวในความยาวช่วงสะพานที่ 30 เมตร อยู่ร้อยละ 3.13 เมื่อถึงความยาวช่วงสะพานที่ 50 เมตรค่าสัดส่วนจะเกือบเท่ากัน เมื่อพิจารณาไปจนถึงที่ความยาวช่วงสะพานที่ 60 เมตร ค่าสัดส่วนจะมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 6.07 จะเห็นว่าเมื่อพิจารณาในภาพรวมตลอดความยาวช่วงสะพาน สัดส่วนโมเมนต์ดัด M_{AB}^+ ของคานสะพานต่อเนื่องกับคานสะพานช่วงเดียวมีความแตกต่างกันไม่มากนัก

เมื่อพิจารณารูปที่ 4 และสะพานช่วงที่ 2 จะเห็นว่าค่าสัดส่วนโมเมนต์ดัด M_B^- สูงสุดของคานสะพานต่อเนื่องจะมีค่ามากกว่าสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จากคานสะพานช่วงเดียวอย่างมีนัยสำคัญ (ความแตกต่างมากกว่าร้อยละ 5) ที่ความยาวช่วงสะพานตั้งแต่ 40 ถึง 70 เมตร สำหรับความยาวช่วงสะพานอื่นๆ สัดส่วน

โมเมนต์ดัด M_B^- ของคานสะพานต่อเนื่องกับคานสะพานช่วงเดียวมีค่าใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5 และสะพานช่วงที่ 2 จะเห็นว่าค่าสัดส่วนโมเมนต์ดัด M_{BC}^+ สูงสุดของคานสะพานต่อเนื่องจะมีค่าน้อยกว่าสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จากคานสะพานช่วงเดียวประมาณร้อยละ 0.15 และ 16.63 ที่ความยาวช่วงสะพาน 30 เมตรและ 100 เมตร ตามลำดับ จะเห็นว่าที่ทุกความยาวช่วงสะพาน ค่าสัดส่วนโมเมนต์ดัด M_{BC}^+ สูงสุดของคานสะพานต่อเนื่องจะน้อยกว่าที่ได้จากคานสะพานช่วงเดียวที่มีความยาวช่วงเท่ากัน

เมื่อพิจารณารูปที่ 6 และสะพานช่วงที่ 1 จะเห็นว่าค่าสัดส่วนแรงเฉือน V_{AB} สูงสุดของคานสะพานต่อเนื่องจะมีค่ามากกว่าสัดส่วนแรงเฉือนสูงสุดที่ได้จากคานสะพานช่วงเดียวในความยาวช่วงสะพานที่ 30 เมตร อยู่ร้อยละ 23.25 เมื่อถึงความยาวช่วงสะพานที่ประมาณ 45 เมตรค่าสัดส่วนจะเกือบเท่ากัน และที่ความยาวช่วงสะพานที่ 60 เมตร ค่าสัดส่วนจะมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 16.28 จะเห็นว่าเมื่อความยาวช่วงสะพานเพิ่มมากขึ้นค่าสัดส่วนแรงเฉือน V_{AB} สูงสุดของคานสะพานต่อเนื่องจะลดลง ส่วนคานสะพานช่วงเดียวค่าสัดส่วนแรงเฉือน V_{AB} สูงสุดจะเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณารูปที่ 7 และช่วงที่ 2 ของสะพาน จะเห็นว่าค่าสัดส่วนแรงเฉือน V_{BC} สูงสุดของคานสะพานต่อเนื่องจะมีค่ามากกว่าสัดส่วนแรงเฉือนสูงสุดที่ได้จากคานสะพานช่วงเดียวในความยาวช่วงสะพานที่ 30 เมตร อยู่ร้อยละ 3.52 เมื่อถึงความยาวช่วงสะพานที่ประมาณ 35 เมตรค่าสัดส่วนจะเกือบเท่ากัน จากนั้นค่าสัดส่วนแรงเฉือน V_{BC} ของคานสะพานต่อเนื่องจะน้อยกว่าที่ได้จากคานสะพานช่วงเดียวจนถึงความยาวช่วงสะพาน 100 เมตร โดยร้อยละความแตกต่างของสัดส่วนแรงเฉือน V_{BC} จะมีแนวโน้มมากขึ้น

ตารางที่ 4 สัดส่วนโมเมนต์ชนิดบวกสูงสุดที่บริเวณกึ่งกลางคานสะพานช่วงที่ 1 (M_{AB}^+)

รูปแบบโครงสร้างสะพาน	ความยาวสะพานช่วงที่ 1 (m)			
	30	40	50	60
Con.1	1.006	1.062	1.157	1.177
Con.2	1.005	1.061	1.151	*
Con.3	1.005	1.058	1.142	*
สัดส่วนสูงสุด (คานต่อเนื่อง)	1.006	1.062	1.157	1.177
สัดส่วนสูงสุด (คานช่วงเดียว)	0.975	1.039	1.162	1.253
ร้อยละความแตกต่าง	3.13	2.20	-0.44	-6.07

* ความยาวช่วงสะพานเท่ากันทั้ง 3 ช่วง จะกำหนดให้สัดส่วน I_2/I_1 เท่ากับ 1 เท่านั้น

ตารางที่ 5 สัดส่วนโมเมนต์ชนิดลบสูงสุดที่บริเวณฐานรองรับ B (M_B)

รูปแบบโครงสร้างสะพาน	ความยาวสะพานช่วงที่ 2 (m)							
	30	40	50	60	70	80	90	100
Con.1	1.009	1.171	1.266	1.395	1.361	1.340	1.267	1.287
Con.2	*	1.085	1.219	1.331	1.360	1.413	1.338	1.353
Con.3	*	1.092	1.230	1.291	1.364	1.410	1.395	1.404
สัดส่วนสูงสุด (คานต่อเนื่อง)	1.009	1.171	1.266	1.395	1.364	1.413	1.395	1.404
สัดส่วนสูงสุด (คานช่วงเดียว)	0.975	1.039	1.162	1.253	1.295	1.350	1.385	1.431
ร้อยละความแตกต่าง	3.44	12.69	8.94	11.33	5.35	4.66	0.74	-1.89

* ความยาวช่วงสะพานเท่ากันทั้ง 3 ช่วง จะกำหนดให้สัดส่วน I_2/I_1 เท่ากับ 1 เท่านั้น

ตารางที่ 6 สัดส่วนโมเมนต์ชนิดบวกสูงสุดที่บริเวณกึ่งกลางคานสะพานช่วงที่ 2 (M_{BC}^+)

รูปแบบโครงสร้างสะพาน	ความยาวสะพานช่วงที่ 2 (m)							
	30	40	50	60	70	80	90	100
Con.1	0.974	1.029	1.114	1.162	1.229	1.164	1.175	1.181
Con.2	*	1.023	1.127	1.159	1.155	1.169	1.182	1.188
Con.3	*	1.027	1.137	1.158	1.153	1.173	1.185	1.193
สัดส่วนสูงสุด (คานต่อเนื่อง)	0.974	1.029	1.137	1.162	1.229	1.173	1.185	1.193
สัดส่วนสูงสุด (คานช่วงเดียว)	0.975	1.039	1.162	1.253	1.295	1.350	1.385	1.431
ร้อยละความแตกต่าง	-0.15	-0.97	-2.16	-7.26	-5.08	-13.11	-14.43	-16.63

* ความยาวช่วงสะพานเท่ากันทั้ง 3 ช่วง จะกำหนดให้สัดส่วน I_2/I_1 เท่ากับ 1 เท่านั้น

ตารางที่ 7 สัดส่วนแรงเฉือนสูงสุดในช่วงที่ 1 (V_{AB})

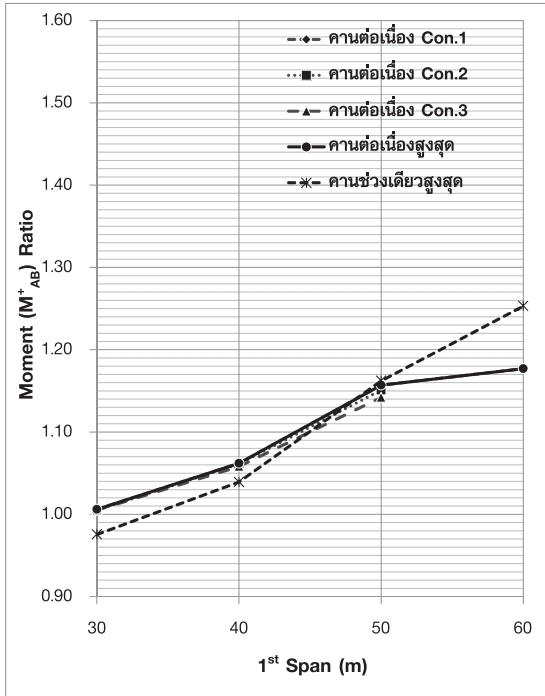
รูปแบบโครงสร้างสะพาน	ความยาวสะพานช่วงที่ 1 (m)			
	30	40	50	60
Con.1	1.368	1.330	1.149	1.119
Con.2	1.368	1.283	1.125	*
Con.3	1.365	1.250	1.123	*
สัดส่วนสูงสุด (คานต่อเนื่อง)	1.368	1.330	1.149	1.119
สัดส่วนสูงสุด (คานช่วงเดียว)	1.110	1.196	1.274	1.337
ร้อยละความแตกต่าง	23.25	11.20	-9.84	-16.28

* ความยาวช่วงสะพานเท่ากันทั้ง 3 ช่วง จะกำหนดให้สัดส่วน I_2/I_1 เท่ากับ 1 เท่านั้น

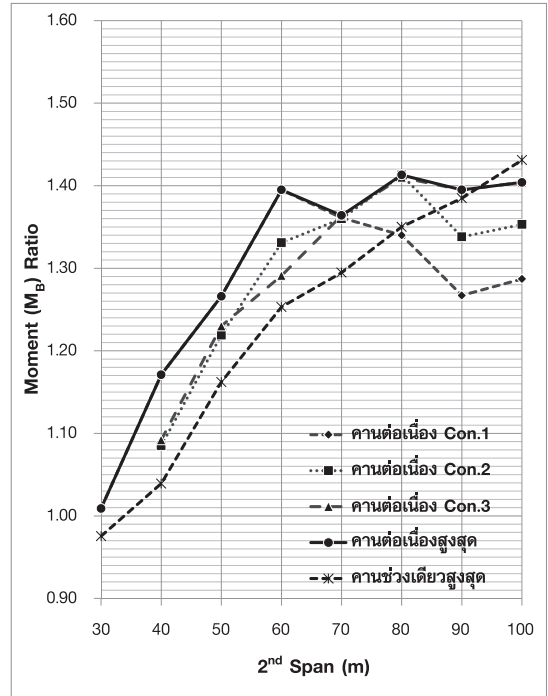
ตารางที่ 8 สัดส่วนแรงเฉือนสูงสุดในช่วงที่ 2 (V_{BC})

รูปแบบโครงสร้างสะพาน	ความยาวสะพานช่วงที่ 2 (m)							
	30	40	50	60	70	80	90	100
Con.1	1.149	1.137	1.114	1.129	1.143	1.178	1.219	1.257
Con.2	*	1.108	1.103	1.116	1.154	1.187	1.230	1.267
Con.3	*	1.110	1.106	1.120	1.159	1.192	1.235	1.272
สัดส่วนสูงสุด (คานต่อเนื่อง)	1.149	1.137	1.114	1.129	1.159	1.192	1.235	1.272
สัดส่วนสูงสุด (คานช่วงเดียว)	1.110	1.196	1.274	1.337	1.411	1.463	1.521	1.564
ร้อยละความแตกต่าง	3.52	-4.94	-12.58	-15.53	-17.88	-18.51	-18.81	-18.65

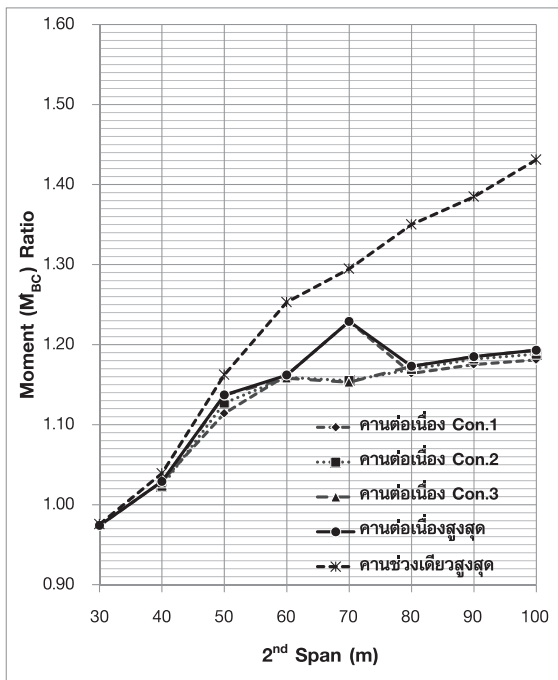
* ความยาวช่วงสะพานเท่ากันทั้ง 3 ช่วง จะกำหนดให้สัดส่วน I_2/I_1 เท่ากับ 1 เท่านั้น



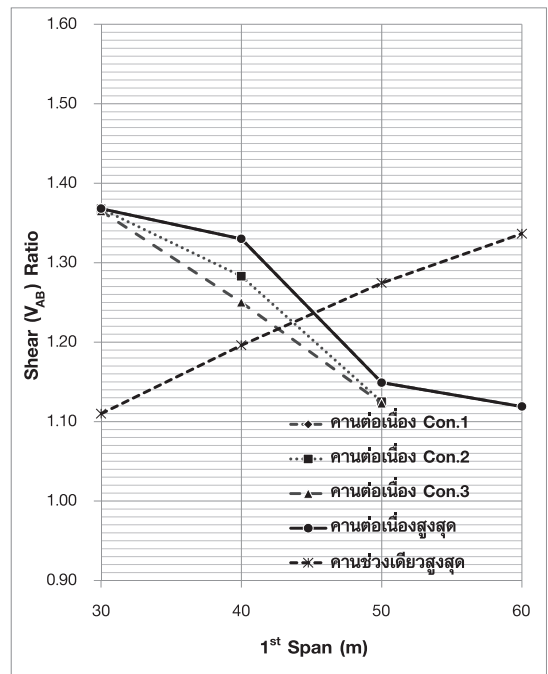
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมเมนต์บวกสูงสุดของ สะพานช่วงที่ 1 (M_{AB}^+) กับความยาวช่วงสะพาน ช่วงที่ 1



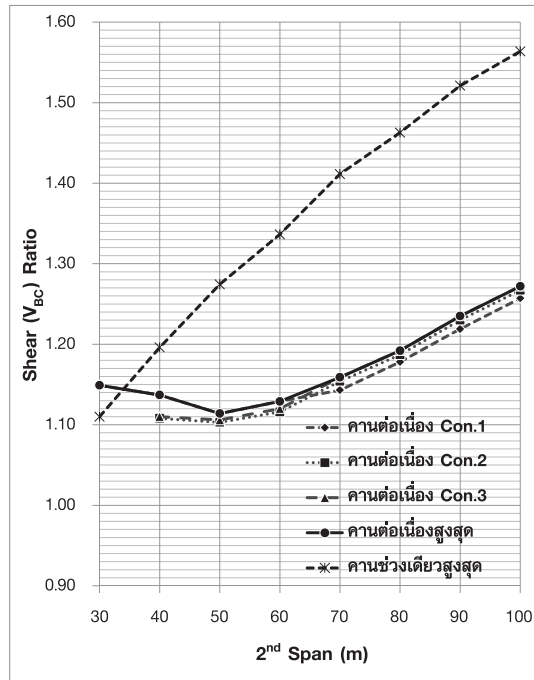
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมเมนต์ลบสูงสุดที่ ฐานรองรับ B (M_B^-) กับความยาวช่วงสะพาน ช่วง ที่ 2



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมเมนต์บวกสูงสุดของ สะพานช่วงที่ 2 (M_{BC}^+) กับความยาวช่วงสะพาน ช่วง ที่ 2



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงเฉือนสูงสุดใน ช่วงที่ 1 (V_{AB}) กับความยาวช่วงสะพาน ช่วงที่ 1



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงเฉือนสูงสุดในช่วงที่ 2 (V_{BC}) กับความยาวช่วงสะพานช่วงที่ 2

6. อภิปรายผล

ในทางปฏิบัติ ตัวปรับค่าน้ำหนักบรรทุกจรมักใช้ค่าคงที่ค่าเดียวซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับความยาวช่วงสะพาน อย่างไรก็ตาม การใช้งานลักษณะดังกล่าวไม่อาจสะท้อนผลตอบสนองทุกชนิดที่เทียบเท่ารถบรรทุกไทยได้ หากใช้สัดส่วนของผลตอบสนองค่าใดค่าหนึ่งเพื่อปรับค่าน้ำหนักบรรทุกจรถก็อาจส่งผลให้การประมาณผลตอบสนองอื่นน้อยหรือมากเกินไป ซึ่งจะทำการประมาณค่าแรงภายในเพื่อการออกแบบชิ้นส่วนนั้นได้ผลออกมาในด้านที่ไม่ปลอดภัยหรือไม่ประหยัดได้ ดังนั้นเมื่อต้องการผลตอบสนองชนิดใดเพื่อการออกแบบ ควรใช้สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับผลตอบสนองชนิดนั้นๆ [12] อย่างไรก็ตามหากเปรียบเทียบตัวปรับค่าน้ำหนักบรรทุกจรถที่ได้มาจากคานสะพานต่อเนื่องกับคานสะพานช่วงเดียว พบว่าหากต้องการวิเคราะห์คานต่อเนื่องด้วยสัดส่วนดังกล่าวที่ใช้ในคานสะพานช่วงเดียวสำหรับการพิจารณาผลตอบสนอง M_{AB}^+ , M_{BC}^+ , V_{AB} และ V_{BC} จะให้ค่าความแตกต่างที่ยอมรับได้ (มีค่ามากกว่าไม่เกินร้อยละ 5) ยกเว้น M_B^- ที่ความยาว

ช่วงที่ 2 มากกว่า 40 เมตร ถึง 70 เมตร และ V_{AB} ที่ความยาวช่วงที่ 1 น้อยกว่า 40 เมตร อย่างไรก็ตามแม้ว่าคานสะพานช่วงเดียวจะไม่เกิดโมเมนต์ลบ แต่การศึกษาครั้งนี้เป็นการเปรียบเทียบเพื่อให้เห็นความแตกต่างของสัดส่วนดังกล่าว เพราะในทางปฏิบัติสัดส่วนเพิ่มอาจใช้ค่าเดียวกันได้ หนึ่งจะสังเกตเห็นว่าผลกระทบเนื่องจากความไม่เท่ากันของความแข็งแรงตัดของหน้าตัดสะพานแต่ละช่วง จะส่งผลต่อความแตกต่างของสัดส่วนผลตอบสนองของคานต่อเนื่อง (เมื่อเทียบกับสัดส่วนของคานที่มีหน้าตัดคงที่ : Con.1) บ้างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ยกเว้นผลตอบสนอง M_B^- ที่มีความแตกต่างของสัดส่วนดังกล่าว (ระหว่าง Con.3 กับ Con.1) มากที่สุดอยู่ประมาณร้อยละ 10.10

จากสัดส่วนผลตอบสนองสูงสุดของ M_{AB}^+ , M_{BC}^+ , M_{BC}^- , V_{AB} และ V_{BC} ที่ได้จาก HL-93 (มีค่าเท่ากับ 1.177, 1.413, 1.229, 1.368 และ 1.272 ตามลำดับ) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัดส่วนผลตอบสนองสูงสุดทั้งหมดดังกล่าวที่ได้จาก HS20-44 [12] (มีค่าเท่ากับ 1.611, 1.758, 1.603, 1.796 และ 1.802 ตามลำดับ) จะเห็นว่ามีค่าลดลงร้อยละ

26.94, 19.62, 23.33, 23.83 และ 29.40 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในภาพรวมและเปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุกทุกไทยแล้วจะเห็นว่า น้ำหนักบรรทุกจรแบบ HL-93 จะให้สัดส่วนผลตอบสนองสูงสุดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่ได้จากน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HS20-44 แสดงให้เห็นว่าน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HL-93 จะทำให้เกิดผลตอบสนอง (ค่าของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด) เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุกทุกไทยมากขึ้นประมาณร้อยละ 20 ถึง 30

7. สรุปและข้อเสนอแนะ

บทความนี้ได้ศึกษาสัดส่วนผลตอบสนองสูงสุดของคานสะพานต่อเนื่อง 3 ช่วงที่มีความยาวแต่ละช่วงไม่เท่ากัน และมีความยาวช่วงรวมตั้งแต่ 90 เมตรถึง 180 เมตรเนื่องจากรถบรรทุกไทยตามประกาศฯ ของกรมทางหลวงตั้งแต่ปี พ.ศ.2548-2554 โดยคำนึงถึงผลของความแข็งเชิงดัด (Flexural Rigidity) และนำมาเปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HL-93 ตามมาตรฐาน AASHTO(LRFD) จากการศึกษาพบว่าแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดในแต่ละช่วงความยาวสะพานส่วนใหญ่จะเกิดจากรถบรรทุกแบบ Semi45(2) จากนั้นจึงทำการหาสัดส่วนแรงเฉือนและสัดส่วนโมเมนต์ดัดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกไทยกับ HL-93 ที่สัมพันธ์กับความยาวช่วงสะพาน จะเห็นว่าสัดส่วนโมเมนต์ดัดและสัดส่วนแรงเฉือนจะมากกว่าสัดส่วนเดียวกันที่ได้จากคานช่วงเดียวสูงสุดร้อยละ 12.69 และ 23.25 ตามลำดับ ในกรณีที่ความแข็งเชิงดัดของแต่ละช่วงสะพานไม่เท่ากัน จะส่งผลต่อความแตกต่างของสัดส่วนผลตอบสนองคานต่อเนื่องเพียงบ้างเล็กน้อย (เมื่อเทียบกับสัดส่วนของคานที่มีหน้าตัดคงที่) โดยค่ามากที่สุดประมาณร้อยละ 10.10 เมื่อพิจารณาในภาพรวมและเปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุกทุกไทยแล้วจะเห็นว่าน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HL-93 จะให้สัดส่วนผลตอบสนองสูงสุดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่ได้จากน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HS20-44 ประมาณร้อยละ 20 ถึง 30 อย่างไรก็ตามเพื่อให้สัดส่วนดังกล่าวมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้นควรตรวจสอบสัดส่วนดังกล่าวอีกครั้งด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างอย่างละเอียด โดยจำลองโครงสร้างแบบ 3 มิติซึ่งผลที่ได้จะนำมาเป็นข้อมูลในการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบสะพานในประเทศไทยในอนาคตได้

8. เอกสารอ้างอิง

1. AASHTO, 2002, AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges, 17th Edition, AASHTO, Washington DC.
2. AASHTO, 2007, AASHTO LRFD Bridge Specifications for Highway Bridges, 4th Edition, AASHTO, Washington DC.
3. Department of Highways, 2005, "Declaration of Director of Motorways, Director of The National Highways, and Director of Concession Highways: Forbidding any vehicles with weight, net weight carrying, over weight on each axle, or any damaged on the highways, motorways, and concession highways", The Government Gazette, Special session at No. 122. 150ง. Dec 28, 2005. pp.19-25 (In Thai)
4. Department of Highways, 2007, "Permitted certificate of คค0606/9704", Dec 21, 2007. (In Thai)
5. Department of Highways, 2008. "Declaration of Department of Highways at คค0643/530: Regulation of permission for driving any vehicles on motorways, national highways, and concession highways by the Declaration of Department of motorways, national highways, and concession highways on Dec 22, 2005", Sep 30, 2008. (In Thai)
6. Department of Highways, 2009(a), "Declaration of Director of Motorways, Director of The National Highways, and Director of Concession Highways: Forbidding any vehicles with weight, net weight carrying, over weight on each axle, or any damaged on the highways, motorways, and concession highways (Vol.2) in 2009", The Government Gazette, Special session at No. 126. 92ง. Jun 30, 2009. pp.2-7 (In Thai)
7. Department of Highways, 2009(b), "Declaration of Director of Motorways, Director of The National Highways, and Director of Concession Highways: Forbidding any vehicles with weight, net weight carrying, over weight on each axle, or any damaged

on the highways, motorways, and concession highways (Vol.3) in 2009”, The Government Gazette, Special session at No. 126. 174จ. Nov 30, 2009. pp. 116-117 (In Thai)

8. Department of Highways, 2011, “Declaration of Director of Motorways, Director of The National Highways, and Director of Concession Highways: Forbidding any vehicles with weight, net weight carrying, over weight on each axle, or any damaged on the highways, motorways, and concession highways (Vol.4) in 2009”, The Government Gazette, Special session at No. 128. 161จ. Dec 30, 2011. pp. 9-10 (In Thai)

9. Suparp, S. and Joyklad, P., 2011, “A Study on Load-Carrying Behavior of Simple-Supported Bridge Due to Thai Truck Loads”. Kasem Bundit Engineering Journal, Vol. 1, No. 1 (January-June 2011), pp. 33-48. (In Thai)

10. Suparp, S. and Joyklad, P., 2011, “A Study on Load-Carrying Behavior of Three-Span Continuous Bridge Due to Thai Truck Loads”, Proceeding of the 16th National Convention on Civil Engineering, May 2011, Pattaya, Chonburi, Thailand, pp. STR0067. (In Thai)

11. Suparp, S. and Joyklad, P., 2011, “A Comparison of Internal Forces of Simple Supported Bridges Due to Thai Truck Loads with AASHTO Highway Loads”, Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand, Vol. 22, No. 1, 2011, pp. 25-35. (In Thai)

12. Suparp, S. and Joyklad, P., 2011, “A Comparison of Maximum Responses of Three-Span Continuous Bridges Due to Thai Trucks with AASHTO Highway Live Loadings”, KMUTT Research and Development Journal, Vol. 34, No. 3, 2011, pp. 317-334. (In Thai)

13. Department of Rural Roads, 2005, “Declaration of Director of Rural Roads: Forbidding any vehicles with weight, net weight carrying, over weight on each axle, or any damaged on the highways occupied by Department of Rural Roads”, The Government Gazette, Special session at No. 122. 151จ. Dec 29, 2005, pp. 9-13. (In Thai)

14. Suparp, S. and Joyklad, P., 2011, Response Ratios of Simple Beam Bridges Due to Thai Trucks and HL-93 Live Loadings. Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand, Vol. 23, No. 3, 2012. (In Thai)

15. Barker, R. M. and Puckett, J. A., 2005. Design of Highway Bridge : An LRFD Approach. 2nd Edition. New Jersey : John Wiley and Son, Inc.

16. Tabsh, S. W. and Tabatabai, M., 2001, “Live Load Distribution in Girder Bridges Subject to Oversized Trucks”, Journal of Bridge Engineering, Vol. 6, No. 1, Jan-Feb.

17. Sritanet, S and Attasaeranewong, S., 1999, “Structural Safety of Superstructure of Don Muang Tollway Project Due to Thai Truck Loads”, Proceeding of the 16th National Convention on Civil Engineering, May 1999, Pattaya, Chonburi, Thailand. (In Thai)

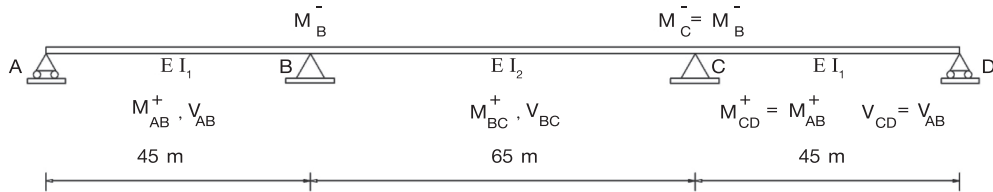
18. Vivithkeyoonwong S. and Rimdusit, S., 2005, “A Comparison of Bending Moments and End Shears of Simple Span Bridge Girders Due to The Ten-Wheel Truck with the AASHTO Standard Truck”, Proceeding of the 43th Kasetsart University Annual Conference, Bangkok, Thailand. (In Thai)

19. FHWA, 1980. Integral, No-Joint Structures and Required Provisions for Movement. FHWA Technical Advisory T5140.13, Federal Highway Administration, Washington DC, October 3.

9. ภาคผนวก : การประยุกต์ใช้งาน

จากผลการศึกษาข้างต้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับ ตัวอย่างคานสะพานต่อเนื่อง 3 ช่วงดังรูปที่ 8 โดยสะพาน

ช่วง AB, BC และ CD มีความยาวช่วงเท่ากับ 45, 65 และ 45 เมตร ตามลำดับ โดยกำหนดให้ สัดส่วน I_2/I_1 เท่ากับ 1.50



รูปที่ 8 ตัวอย่างคานสะพานต่อเนื่อง 3 ช่วง

จากน้ำหนักรถบรรทุกไทยจำนวน 15 รูปแบบ และ HL-93 จำนวน 3 รูปแบบ สามารถวิเคราะห์หาสัดส่วน โมเมนต์ดัดสูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดเนื่องจากน้ำหนักรถ

บรรทุกไทยตามประกาศของกรมทางหลวงกับ HL-93 ได้ และนำมาสรุปไว้ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าสัดส่วนผลตอบสนองของโครงสร้างสูงสุดของสะพานตัวอย่าง

ผลตอบสนองของโครงสร้าง	ความยาวช่วงสะพาน (m)	สัดส่วนสูงสุด	ร้อยละความแตกต่างจากผลการศึกษา	
			สะพานช่วงเดียว	สะพานต่อเนื่อง
M_{AB}^+	45	1.109	+0.7	0.0
M_B^-	65	1.318	+3.5	-4.5
M_{BC}^+	65	1.158	-9.1	-3.1
V_{AB}	45	1.120	-9.3	-9.6
V_{BC}	65	1.130	-17.8	-1.2

หมายเหตุ : สัดส่วนสูงสุดของสะพานช่วงเดียวกับสะพานต่อเนื่องที่ได้จากผลการศึกษามีการพิจารณาได้จากรูปที่ 3 ถึงรูปที่ 7

จากการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดของตัวอย่างคานสะพานต่อเนื่อง พบว่า ค่าสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดของ M_{AB}^+ , M_B^- , M_{BC}^+ , V_{AB} และ V_{BC} ที่ได้จะอยู่ภายใต้กราฟสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดของโครงสร้างสะพานต่อเนื่อง 3 ช่วง อย่างไรก็ตาม ค่าสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ฐานรองรับ B (M_B^-) จะมากกว่าที่ได้จาก

โครงสร้างสะพานช่วงเดียวเพียงร้อยละ 3.5 จากผลที่ได้ จะเห็นว่า สัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดของคานต่อเนื่องที่ได้จากการศึกษาข้างต้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับเพิ่มค่ากำลังออกแบบของน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HL-93 ตามมาตรฐาน AASHTO(LRFD) เพื่อให้สอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกไทยได้