

สัดส่วนผลตอบสนองของคานสะพานช่วงเดียวธรรมดาเนื่องจากรถบรรทุกไทยและน้ำหนักบรรทุกจร HL-93

Response Ratios of Simple Beam Bridges Due to Thai Trucks and HL-93 Live Loadings

สุนิติ สุภาพ และ ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250 โทร. 02-320-2777

บทคัดย่อ

การออกแบบสะพานในประเทศไทยนิยมอ้างอิงตามมาตรฐานการออกแบบที่กำหนดโดย American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) ซึ่งปัจจุบันได้กำหนดให้ออกแบบด้วยวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load and Resistance Factor Design : LRFD) โดยมีน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับการออกแบบสะพานเรียกว่า HL-93 อย่างไรก็ตามน้ำหนักบรรทุกจรไทยมีความแตกต่างจากน้ำหนักบรรทุกจรดังกล่าว บทความนี้ทำการศึกษาผลตอบสนองสูงสุดของคานสะพานช่วงเดียวธรรมดาที่มีความยาวช่วงตั้งแต่ 5-60 เมตร เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรไทยกับ HL-93 เพื่อเปรียบเทียบแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานสะพานพร้อมทั้งเสนอสัดส่วนของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบว่าแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดในแต่ละความยาวช่วงสะพานเกิดจากรถบรรทุกต่างชนิดกันและไม่จำเป็นต้องเกิดจากรถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมมากที่สุด จากผลการวิเคราะห์โครงสร้าง สัดส่วนแรงเฉือนและสัดส่วนโมเมนต์ดัดมีค่าแปรผันตามความยาวตั้งแต่ 0.89-1.34 และ 0.90-1.25 ตามลำดับ สัดส่วนที่เสนอสามารถนำไปปรับเพิ่มค่ากับ HL-93 เพื่อให้ผลตอบสนองสูงสุดสอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกจรไทยได้

Abstract

Bridge design practices in Thailand have commonly referred to the design specifications specified by the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). The design provisions of the current specifications employ the Load and Resistance Factor Design (LRFD) methodology. Furthermore, vehicular live loadings designated as HL-93 was developed in the specifications for

the design purposes. However, Thai truck weights are different from those highway live loadings. This article has studied the maximum responses of simple beam bridges with the length ranging from 5-60 meters due to Thai trucks and HL-93 loadings. This study aims to compare the maximum shear and bending moment of the simple beam bridges. The proper ratios of the shear, also bending moment, between Thai trucks and HL-93 are proposed. The results show that, in each span, the maximum shear and bending moment are induced by different types of trucks. Additionally, the heaviest trucks produce the maximum responses for some analysis cases. For various bridge span length, the shear ratios and the moment ratios are varied from 0.89 to 1.34 and 0.90 to 1.25, respectively. For bridge design practice in Thailand, these ratios could be applied as multiplier to HL-93, therefore, the maximum responses of simple beam bridge caused by the proportioned of HL-93 and Thai trucks are conformable.

1. บทนำ

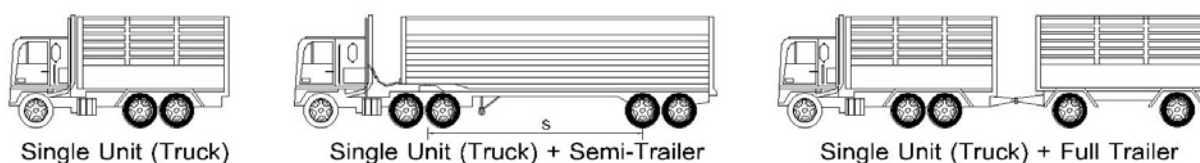
American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) ได้จัดทำมาตรฐานการออกแบบสะพานเรียกว่า AASHTO Standard Specifications [1] ซึ่งได้กำหนดน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับการออกแบบคือ HS20-44 ต่อมา AASHTO ได้จัดทำมาตรฐานการออกแบบสะพานอีกฉบับหนึ่งเรียกว่า AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [2] ซึ่งได้กำหนดน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับการออกแบบคือ HL-93 โดยรูปแบบน้ำหนักบรรทุกจรดังกล่าวทั้งหมดได้แสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 1 โดยในแต่ละมาตรฐานการออกแบบจะใช้รูปแบบน้ำหนักบรรทุกจรที่ทำให้เกิดผล

ตอบสนองสูงสุดบนโครงสร้างสะพาน อย่างไรก็ตามรถบรรทุกที่ใช้ในประเทศไทยในปัจจุบันได้กำหนดไว้ตามประกาศ ปี พ.ศ. 2548 [3] โดยกรมทางหลวงอีกทั้งยังมีประกาศ ฉบับอื่นๆ เพิ่มเติมอีกหลายฉบับ [4,5,6,7,8] ซึ่งรถบรรทุกตามประกาศ มีจำนวนรูปแบบและพิกัดน้ำหนักแตกต่างจากน้ำหนักบรรทุกจรตามมาตรฐาน AASHTO อีกทั้งระยะห่างระหว่างเพลายังแตกต่างกันออกไปอีกตามบริษัทผู้ผลิต อย่างไรก็ตามมาตรฐาน AASHTO อนุญาตให้ปรับค่าน้ำหนักบรรทุกจรตามสัดส่วนได้ หากน้ำหนักยานพาหนะมีค่าแตกต่างจากที่กำหนด [1,2] อีกทั้งในปัจจุบันการออกแบบโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO(LRFD) [2] นิยมใช้มากขึ้นผนวกกับการศึกษาพฤติกรรมของสะพานที่รับน้ำหนักรถบรรทุกไทยกับน้ำหนักบรรทุกจรตาม AASHTO(STD) [1] ได้ดำเนินการมาบ้างแล้ว [9,10,11] บทความนี้จึงได้ทำการศึกษาสัดส่วนผลตอบสนองสูงสุดของคานสะพานช่วงเดี่ยวธรรมดาที่มีความยาวช่วงแตกต่างกันเนื่องจากจรถบรรทุกไทยและน้ำหนักบรรทุกจร HL-93 เพื่อเปรียบเทียบแรงเฉือนสูงสุดและโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานสะพานและทำการหาสัดส่วนของแรงเฉือนสูงสุดและโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุกไทยกับน้ำหนักบรรทุกจร HL-93 พร้อมทั้งเสนอสัดส่วนดังกล่าวที่เหมาะสมเพื่อให้มีความสะดวกในทางปฏิบัติสำหรับการวิเคราะห์ออกแบบสะพานในประเทศไทยโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO(LRFD)

2. รูปแบบและน้ำหนักรถบรรทุก

ปี พ.ศ. 2548 กรมทางหลวงได้กำหนดรูปแบบและน้ำหนักรถบรรทุกจรตามประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวง

สัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน [3] ประกาศฉบับนี้ประกอบด้วย 3 หมวด ในหมวดที่ 1 บังคับใช้สำหรับยานพาหนะที่ใช้เดินบน (1) ทางหลวงสัมปทาน (2) ทางยกระดับบนทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 31 ตอนดอนเมือง-ทางหลวงหมายเลข 1 (อนุสรณ์สถานแห่งชาติ) สายดินแดง-บรรจบทางหลวงหมายเลข 1 (อนุสรณ์สถานแห่งชาติ) และ (3) ทางยกระดับบนทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 1 ตอนอนุสรณ์สถานแห่งชาติ-รังสิต สายกรุงเทพมหานคร-แม่สาย (เขตแดน) ในหมวดที่ 2 บังคับใช้สำหรับยานพาหนะที่ใช้เดินบนทางหลวงพิเศษและทางหลวงแผ่นดินสายอื่นที่มีได้กำหนดไว้ในหมวดที่ 1 ยานพาหนะที่กำหนดไว้ทั้ง 2 หมวดตามประกาศ ประกอบด้วยยานพาหนะชนิดรถเดี่ยว (Single Unit) ยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถกึ่งพ่วง (Semi-Trailer) และยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (Full Trailer) ดังรูปที่ 1 รูปแบบยานพาหนะทั้งสองหมวดเหมือนกันแต่น้ำหนักรวมและน้ำหนักลงเพลาที่กำหนดในหมวดที่ 1 จะน้อยกว่าหมวดที่ 2 ประมาณร้อยละ 10-20 สำหรับในหมวดที่ 3 ได้กำหนดรายละเอียดยานพาหนะที่ห้ามเดินบนทางหลวงเว้นแต่จะได้รับอนุญาตตามเงื่อนไขและมาตรการที่จำเป็นเพื่อรักษาทางหลวง ยานพาหนะดังกล่าวได้แก่ ยานพาหนะที่มีลักษณะเพลา ล้อ และยาง รวมถึงน้ำหนักหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่กำหนดในหมวดที่ 1 และ 2 ยานพาหนะที่ต้องขนส่งสิ่งของขนาดใหญ่ซึ่งไม่อาจแยกชิ้นส่วนได้ ยานพาหนะที่โดยสภาพมีลักษณะเป็นเครื่องจักรกล หรือยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถกึ่งพ่วงที่ประกอบด้วยรถกึ่งพ่วงมากกว่า 1 คันขึ้นไป



รูปที่ 1 รูปแบบยานพาหนะที่กำหนดไว้ในประกาศฯ ของกรมทางหลวง ปี พ.ศ. 2548 [3]

ปี พ.ศ. 2550 กรมทางหลวงออกหนังสืออนุญาตให้ยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (Full Trailer) เดินทางทางหลวงพิเศษและทางหลวงแผ่นดินได้ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2551 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2551 [4] โดยตัวรถลากจูงมี 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ชนิดเพลาท้าย (เพลาที่ 2 และเพลาที่ 3) เป็นเพลาคู่ ใช้ยางคู่ ต้องมีน้ำหนักลงเพลาคู่ท้าย 20,000 กิโลกรัม หรือน้ำหนักยานพาหนะรวมไม่เกิน 25,000 กิโลกรัม ตัวรถพ่วงมี 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 12 เส้น ชนิดเพลาหน้าใช้ยางคู่ เพลาท้าย (เพลาที่ 2 และเพลาที่ 3) เป็นเพลาคู่ (Tandem Axle) ใช้ยางคู่ ต้องมีน้ำหนักลงเพลาหน้าไม่เกิน 10,000 กิโลกรัม และมีน้ำหนักลงเพลาคู่ท้ายไม่เกิน 18,000 กิโลกรัม ทั้งนี้ เมื่อนำมาต่อพ่วงกับตัวรถลากจูงต้องมีระยะห่างระหว่างกึ่งกลางเพลาคู่ท้ายของรถลากจูงถึงกึ่งกลางเพลาท้ายของรถพ่วงไม่น้อยกว่า 9.75 เมตร ตามหนังสืออนุญาตฉบับนี้รูปแบบรถลากจูงเหมือนกับที่กำหนดในตามประกาศ ปี พ.ศ. 2548 หมวดที่ 2 ข้อ 15 แต่รูปแบบรถพ่วงได้กำหนดเพิ่มเติมขึ้นมาใหม่ โดยมีน้ำหนักยานพาหนะรวมไม่เกิน 53,000 กิโลกรัม

ปี พ.ศ. 2551 กรมทางหลวงออกประกาศ เรื่องหลักเกณฑ์การขออนุญาตให้ใช้ยานพาหนะเดินทางทางหลวงพิเศษทางหลวงแผ่นดิน และทางหลวงสัมปทาน ตามประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษทางหลวงแผ่นดิน และทางหลวงสัมปทาน ลงวันที่ 22 ธันวาคม 2548 [5] โดยกำหนดรายละเอียดการขออนุญาตสำหรับยานพาหนะตามที่ระบุในหมวดที่ 3 ตามประกาศ ปี พ.ศ. 2548 ในการขออนุญาตนอกจากจะต้องระบุวัตถุประสงค์แล้วยังต้องมีรายการคำนวณที่แสดงว่ายานพาหนะที่ขออนุญาตเมื่อเคลื่อนที่ผ่านสะพานต้องมีแรงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างสะพานทั้งแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดมีค่าไม่เกินตามที่กำหนดในประกาศ ฉบับนี้ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะและความยาวของโครงสร้างสะพาน

ปี พ.ศ. 2552 กรมทางหลวงออกประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินทางทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวง

สัมปทาน (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2552 [6] ซึ่งได้แก้ไขเพิ่มเติมจากประกาศ ปี พ.ศ. 2548 ในประกาศ ฉบับนี้ได้กำหนดระยะห่างระหว่างสลักพ่วง (King Pin) กับศูนย์กลางของเพลาที่ 1 (ระยะ S ในรูปที่ 1) ของยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (Semi-Trailer) ตั้งแต่ 4.50–8.00 เมตรและน้ำหนักบรรทุกรวมตั้งแต่ 45,000–49,000 กิโลกรัมที่สอดคล้องกับระยะห่างระหว่างสลักพ่วงดังกล่าว สำหรับยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (Full Trailer) ได้กำหนดระยะห่างระหว่างกึ่งกลางเพลาคู่ท้ายของรถลากจูงถึงกึ่งกลางเพลาคู่ท้ายของรถพ่วงต้องไม่น้อยกว่า 9.75 เมตร ซึ่งตั้งแต่ 1 ม.ค. 2556 เป็นต้นไป ยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (Semi-Trailer) และยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (Full Trailer) จะต้องมีน้ำหนักยานพาหนะรวมน้ำหนักบรรทุกไม่เกิน 50,500 กิโลกรัม และปลายปี พ.ศ. 2552 กรมทางหลวงได้ออกประกาศ (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2552 [7] และฉบับที่ 4 พ.ศ. 2554 [8] ซึ่งมีเนื้อหาคล้ายกัน โดยฉบับที่ 4 ได้กำหนดให้ตัวรถลากจูงและรถพ่วงแบบ Full50.5(2) (ดูตารางที่ 1) ที่เดิมกำหนดให้มีน้ำหนักยานพาหนะรวมน้ำหนักบรรทุกไม่เกิน 58,000 กิโลกรัมซึ่งตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2556 เป็นต้นไป ต้องมีน้ำหนักยานพาหนะรวมน้ำหนักบรรทุกไม่เกิน 50,500 กิโลกรัม และเมื่อเดินทางบนสะพานต้องเว้นระยะห่างจากยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (FULL TRAILER) ที่เดินทางอยู่ข้างหน้าไม่น้อยกว่า 200 เมตรซึ่งบังคับใช้ถึงวันที่ 31 ธันวาคม 2555

หากจะพิจารณารูปแบบรถบรรทุกตามประกาศทั้งหมดของกรมทางหลวง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548–2554 ข้างต้น สามารถสรุปเป็นรูปแบบรถบรรทุก น้ำหนักลงเพลา ระยะห่างระหว่างเพลาและน้ำหนักรวม โดยมีรูปแบบรถบรรทุกแบบยานพาหนะชนิดรถเดี่ยว (Single Unit) 4 ประเภท แบบยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (Semi-Trailer) 26 ประเภท และแบบยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (Full-Trailer) 14 ประเภท [9]

อนึ่ง กรมทางหลวงชนบทซึ่งเป็นอีกหน่วยงานหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับงานทางภายในประเทศ ได้กำหนดยานพาหนะที่สามารถเดินทางบนถนนในเขตความรับผิดชอบของกรมทางหลวงชนบทเองเช่นเดียวกัน โดยออกประกาศผู้อำนวยการทาง

หลวงชนบท เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงชนบท ในเขตความรับผิดชอบของกรมทางหลวงชนบท [12] ในประกาศฯ ฉบับนี้มีรายละเอียดน้ำหนักและรูปแบบรถบรรทุกคล้ายกับประกาศฯ ของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2548 [3]

3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาผลกระทบการออกแบบสะพานเนื่องจากความแตกต่างของรูปแบบและน้ำหนักของรถบรรทุกจริงกับน้ำหนักบรรทุกจรตามมาตรฐาน AASHTO(STD) หรือ HS20-44พบว่าในบางช่วงของความยาวสะพานหรือในบางประเภทของรถบรรทุก หน่วยแรงที่คำนวณได้จากHS20-44ให้ค่าที่ไม่มีความปลอดภัย [13,14] ซึ่งควรมีการปรับปรุงเพื่อให้สอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกจริงแต่ละพื้นที่ สำหรับประเทศไทย สมบัติและสมพร [15] ได้ศึกษาผลกระทบดังกล่าวโดยได้ตรวจสอบความปลอดภัยของคานสะพานเนื่องจากรถบรรทุกไทยวิ่งเป็นขบวนที่ระยะห่างระหว่างรถบรรทุกเท่าๆ กันและนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับ HS20-44 โดยได้ทำการเลือกรถบรรทุกที่เป็นที่นิยมในประเทศไทยจำนวน 7 ลักษณะ (จากทั้งหมด 72 ลักษณะตามประกาศของกรมทางหลวง) อย่างไรก็ดีในงานวิจัยนี้ได้จำกัดความยาวของคานสะพานไว้เพียง 37.16 เมตร ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าหน่วยแรงในคานสะพานเนื่องจากรถบรรทุกประเภทที่ 3 (รถกึ่งพ่วงหนัก 38 คัน) และ 6 (รถพ่วงหนัก 35 คัน) มีค่ามากกว่าผลการคำนวณจาก HS20-44 สูงสุดถึงร้อยละ 26 และ 23 ตามลำดับ สอดคล้องกับข้อแนะนำโดยกรมทางหลวงที่ให้เพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HS20-44อีกร้อยละ 30 ในขณะที่กรณีการและสมโพธิ [16] ได้ทำการเปรียบเทียบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานสะพานเนื่องจากรถสิบล้อไทยที่บรรทุกน้ำหนักเกินจาก 21 ตันไปเป็น 26, 28 และ 35 ตัน ตามลำดับเปรียบเทียบกับHS20-44 บนสะพานช่วงเดียวที่มีความยาวช่วงตั้งแต่ 10 ถึง 38 เมตรและจัดรถวิ่งเป็นขบวนติดกันโดยรูปแบบของรถบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์จำลองมาจากรถบรรทุกที่มีจำหน่ายอยู่ในประเทศไทย ผลการวิเคราะห์พบว่าสำหรับคานช่วงสั้นที่มีความยาวช่วงไม่เกิน 15 เมตร การออกแบบสะพาน

โดยใช้ HS20-44 สามารถใช้แทนรถสิบล้อไทยขนาด 21 ตันได้อย่างปลอดภัย ในขณะที่ความยาวช่วงที่มีความยาวช่วงที่มีค่าเกิน 15 เมตรเป็นต้นไป ค่าหน่วยแรงสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ HS20-44 จะมีความมากกว่าถึงร้อยละ 94.69สำหรับที่ความยาวช่วง 38 เมตร และหากทำการเพิ่มน้ำหนักของรถสิบล้อไทยให้เป็น 28 และ 35 ตันจะสร้างหน่วยแรงส่วนเกินเมื่อเปรียบเทียบกับ HS20-44 ที่ความยาวสูงสุดคือ 38 เมตร ถึงร้อยละ 170.64และ 238.30ตามลำดับ

ตัวอย่างงานวิจัยทั้งสองข้างต้นมีประโยชน์ต่องานออกแบบงานสะพานในประเทศไทยอย่างมาก อย่างไรก็ตามถ้าหากมีการพิจารณาความยาวช่วงคานที่หลากหลายและขนาดของรถบรรทุกที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน รวมถึงน้ำหนักแบบ UCL(ดูตารางที่ 1) ซึ่งอาจให้ค่าวิกฤติสำหรับสะพานช่วงยาวจะทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กว้างขวางมากยิ่งขึ้นซึ่งต่อมาสุณิธิและคณะ [9,10,11]ได้เปรียบเทียบแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในคานสะพานช่วงเดียวที่มีความยาวช่วงตั้งแต่ 5-60 เมตร และสะพานต่อเนื่อง 3 ช่วงที่มีความยาวช่วงเท่ากันและไม่เท่ากันที่มีความยาวสะพานรวมตั้งแต่ 90 เมตรถึง 180 เมตร เนื่องจากรถบรรทุกไทยตามประกาศของกรมทางหลวงตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548-2552 และน้ำหนักบรรทุกจร HS20-44 พบว่าแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดในแต่ละความยาวช่วงสะพานเกิดจากรถบรรทุกประเภทต่างชนิดกันและไม่จำเป็นต้องเกิดจากรถบรรทุกที่มีน้ำหนักบรรทุกรวมมากที่สุด จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างได้เสนอสัดส่วนแรงเฉือนและสัดส่วนโมเมนต์ดัดที่สัมพันธ์กับความยาวช่วงสะพานโดยสัดส่วนที่เสนอนี้สามารถนำไปปรับเพิ่มค่ากับน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HS20-44 เพื่อให้สอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกไทยได้ จะเห็นได้ว่า การศึกษาที่ได้กล่าวมาทั้งหมดยังอ้างอิงรูปแบบน้ำหนักบรรทุกจรที่กำหนดโดยมาตรฐานAASHTO(STD)

4. วิธีการศึกษา

4.1 การจำลองโครงสร้างและการจัดวางน้ำหนักบรรทุก

แบบจำลองโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นคานสะพานช่วงเดี่ยวธรรมดา (Simple Beam Bridge) มีช่วงความยาวที่แตกต่างกันคือ 5-10 เมตร (เพิ่มทีละ 1 เมตร) และ 10-60 เมตร (เพิ่มทีละ 2.5 เมตร)

การจัดวางน้ำหนักบรรทุกจร ได้ให้รถบรรทุกเพียงคันเดียวและรถบรรทุกหลายคันเคลื่อนที่เป็นขบวนในแต่ละช่องจราจร ซึ่งกำหนดให้รถบรรทุกทุกประเภทมีระยะห่างระหว่างเพลาหลังของรถคันหน้าถึงเพลาหน้ารถของคันที่ตามมามีระยะเท่ากับ 9.14 เมตร (30 ฟุต)[1 : Appendix B] รถบรรทุกจะถูกจัดวางเป็นขบวนในลักษณะวิ่งไปในทิศทางและในช่องจราจรเดียวกันจำนวน 1 ช่องจราจร โดยมีจำนวนรถบรรทุกเคลื่อนที่เต็มช่วงความยาวสะพาน และจัดให้รถบรรทุกที่มีน้ำหนักขนาดเท่ากับร้อยละ 75 ของน้ำหนักรถบรรทุกประเภทนั้นๆ วางสลับกันในขบวน ดังแสดงในรูปที่ 2

4.2 รถบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง

ในการศึกษา จะใช้น้ำหนักรถบรรทุกไทยตามประกาศ ปี พ.ศ. 2548 [3] โดยกรมทางหลวง รวมทั้งประกาศฯ เพิ่มเติมของปี พ.ศ. 2550 [4] และปี พ.ศ. 2552 [6,7,8] กับน้ำหนักบรรทุกจร HL-93 โดยจะเลือกใช้รถบรรทุกไทยบางรูปแบบที่มีผลต่อแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเกณฑ์ที่ใช้ในการเลือกรถบรรทุกจะคำนึงถึง 3 ปัจจัยด้วยกัน คือ (1) น้ำหนักรถบรรทุก กล่าวคือหากรถบรรทุกประเภทเดียวกันนั้นมีความยาวช่วงรถหรือมีระยะห่างระหว่างเพลาเท่ากันแล้วรถบรรทุกที่มีน้ำหนักมากกว่าก็จะทำให้เกิดแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงกว่า (2) ระยะห่างระหว่างเพลา กล่าวคือหากรถบรรทุกมีระยะห่างระหว่างเพลาเมื่อเคลื่อนต่อกันบนสะพานจะทำให้มีน้ำหนักมากระทำบนสะพานมากกว่าขบวนรถบรรทุกที่มีระยะห่างระหว่างเพลามากกว่า และ (3) ไม่พิจารณารูปแบบรถบรรทุกที่จะยกเลิกก่อนวันที่ 31 ธันวาคม 2555 จากปัจจัยข้างต้น จะได้รถบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดยมีรูปแบบและน้ำหนักรถบรรทุกแบบ AASHTO (LRFD) 2 ประเภท คือ HL-93 (Tandem) HL-93 (Truck) (ไม่พิจารณา HL-93 (Continuous) ซึ่งใช้สำหรับคานต่อเนื่อง) รถบรรทุกไทยแบบยานพาหนะชนิดรถเดี่ยว (Single Unit) 2 ประเภท แบบยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถกึ่งพ่วง (Semi-Trailer) 9 ประเภท และแบบยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (Full-Trailer) 4 ประเภทเท่าที่แสดงในตารางที่ 1 อย่างไรก็ตามในประกาศฯ ของกรมทางหลวงไม่ได้กำหนดระยะห่างระหว่างเพลาของรถบรรทุกหรือ

ระยะห่างระหว่างเพลาของตัวรถลากจูงกับเพลาของตัวรถพ่วง ซึ่งจากการรวบรวมข้อมูลรถบรรทุกที่มีใช้และผลิตในประเทศ [11] จึงได้นำข้อมูลเหล่านั้นมาใช้ในการกำหนดระยะห่างระหว่างเพลาของรถบรรทุกชนิดต่างๆ

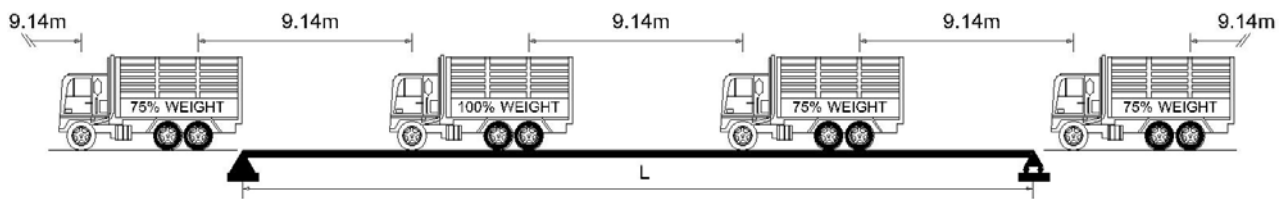
การวิเคราะห์โครงสร้างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่จะอาศัยหลักการของเส้นอิทธิพล (Influence Line) โดยได้นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาเป็นเครื่องมือช่วยในการคำนวณ ทั้งนี้การวิเคราะห์โครงสร้างจะรวมผลของแรงกระแทก (Dynamic Impact Effects) ตามมาตรฐาน AASHTO (LRFD) เข้าไปในน้ำหนักรถบรรทุกไทยและน้ำหนักรถบรรทุกจร HL-93 ด้วย

5. ผลการศึกษา

5.1 แรงเฉือนสูงสุดและโมเมนต์ดัดสูงสุด

จากการวิเคราะห์คานสะพานช่วงเดียวธรรมดาเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร HL-93 และน้ำหนักรถบรรทุกไทยตามตารางที่ 1 พบว่าแรงเฉือนสูงสุดและโมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดที่บริเวณฐานรองรับและที่บริเวณกึ่งกลางคานตามลำดับ และมีความมากขึ้นเมื่อความยาวช่วงคานมากขึ้นรูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนสูงสุดกับช่วงความยาวสะพาน เมื่อพิจารณาช่วงความยาวสะพาน 15 เมตร จะเห็นว่าแรงเฉือนสูงสุดเกิดจากรถบรรทุกแบบ Full 50.5 (1) โดยที่ช่วงความยาวอื่นๆ เกิดจากรถลากจูงและรถกึ่งพ่วง (Semi-Trailer) รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดสูงสุดกับช่วงความยาวสะพาน จะเห็นว่าโมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดจากรถบรรทุกแบบ Full 50.5 (2) ที่ความยาวช่วงสะพาน 25 และ 30 เมตร และแบบ Full 47 ที่ความยาวช่วงสะพาน 35 เมตร โดยที่ช่วงความยาวอื่นๆ โมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดจากรถลากจูงและรถกึ่งพ่วง (Semi-Trailer) จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าแรงเฉือนสูงสุดและโมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดจากรถบรรทุกต่างชนิดกันในแต่ละความยาวช่วงสะพานและไม่จำเป็นต้องเกิดจากรถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมมากที่สุด

จากรูปที่ 3 จะเห็นว่าค่าแรงเฉือนสูงสุดที่ได้จากรถบรรทุกไทยมีค่ามากกว่า HL-93 (Max.) ร้อยละ 33.7 ที่ความยาวช่วงสะพาน 60 เมตร ในทำนองเดียวกัน จากรูปที่ 4 จะเห็นว่าค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จากรถบรรทุกไทยมีค่ามากกว่า HL-93 (Max.) ร้อยละ 25.3 ที่ความยาวช่วงสะพาน 60 เมตร

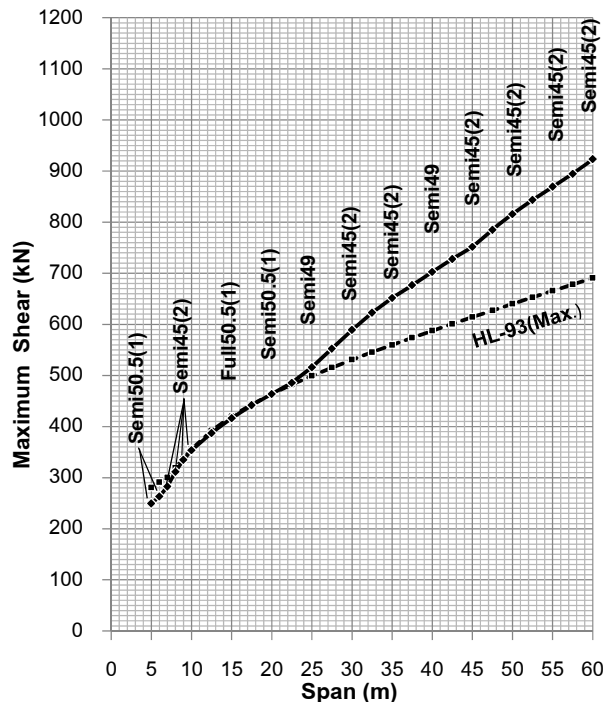


รูปที่ 2 คานสะพานและรูปแบบการวางน้ำหนักบรรทุกเป็นขบวน (Truck Train Loading)

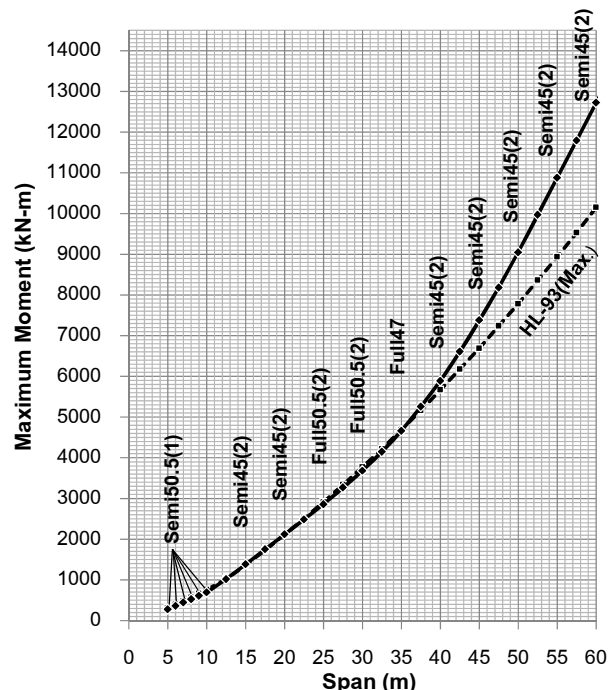
ตารางที่ 1 รูปแบบและน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์

รูปแบบรถ (น้ำหนักรวม : ตัน)	น้ำหนักต่อเพล (ตัน)	ตามมาตรฐาน/ ประกาศฯ	หมายเหตุ																						
HS20-44(Truck) (33.13)		AASHTO [1]	1. HS20-44(Max.) คือรูปแบบรถที่ให้ค่าแรงภายในสูงสุดที่ได้จากรูปแบบรถระหว่าง																						
HS20-44(UCL) (0.95L+8.16/11.83)		AASHTO [1]																							
HL-93(Tandem) (0.95L+22.42)		AASHTO [2]																							
HL-93(Truck) (0.95L+33.13)		AASHTO [2]																							
HL-93(Continuous) (0.95L+59.63)		AASHTO [2]	2. HL-93(Max.) คือรูปแบบรถที่ให้ค่าแรงภายในสูงสุดที่ได้จากรูปแบบรถระหว่าง																						
Truck25 (25)		ปทล.(2548) หมวด 2 ข้อ 15	3. ระยะห่างระหว่างเพลที่กำหนดในรูปเบบริดชนิดต่างๆ																						
Truck30 (30)		ปทล.(2548) หมวด 2 ข้อ 18																							
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)																							
Semi50 (50)		ปทล.(2548) หมวด 2 ข้อ 19(4)																							
Semi50.5(1) (50.5)		ปทล.(2548) หมวด 2 ข้อ 19(5)																							
				<table><tr><th colspan="2">Axle Distance (mm)</th></tr><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></table>	Axle Distance (mm)		A	4025	B	1250	C	1300	D	3300	E	1250	F	3025	G	1250	H	6825	I	1300	J
Axle Distance (mm)																									
A	4025																								
B	1250																								
C	1300																								
D	3300																								
E	1250																								
F	3025																								
G	1250																								
H	6825																								
I	1300																								
J	3025																								

รูปแบบรถ (น้ำหนักรวม : ตัน)	น้ำหนักต่อเพล (ตัน)	ตามมาตรฐาน/ ประกาศฯ	หมายเหตุ	
Semi49 (49)		ปทล.(2552) ข้อ 19/3(1)	K	1250
Semi47 (47)		ปทล.(2552) ข้อ 19/3(2)	L	5825
Semi45(2) (45)		ปทล.(2552) ข้อ 19/3(3)	M	1250
Semi50.5(2) (50.5)		ปทล.(2552) ข้อ 19/4	N	4825
Full47 (47)		ปทล.(2548) หมวด 2 ข้อ 20(2)	O	3325
Full50.5(1) (50.5)		ปทล.(2552) ข้อ 20/1 (เริ่มใช้ 1 ม.ค. 56)	Axle Distance (mm)	
Full50.5(2) (50.5)		ปทล.(2552) ข้อ 20/2 (เริ่มใช้ 1 ม.ค. 56)	P	4775
Full50.5(3) (50.5)		ปทล.(2552) ข้อ 20/3 (เริ่มใช้ 1 ม.ค. 56)	Q	4300
			R	3325
			S	4025
			T	1250
			4. ปทล.คือ ประกาศฯ กรมทาง หลวง และ L คือ ความยาวช่วง สะพาน	



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนสูงสุดกับความยาวช่วงสะพาน



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดสูงสุดกับความยาวช่วงสะพาน

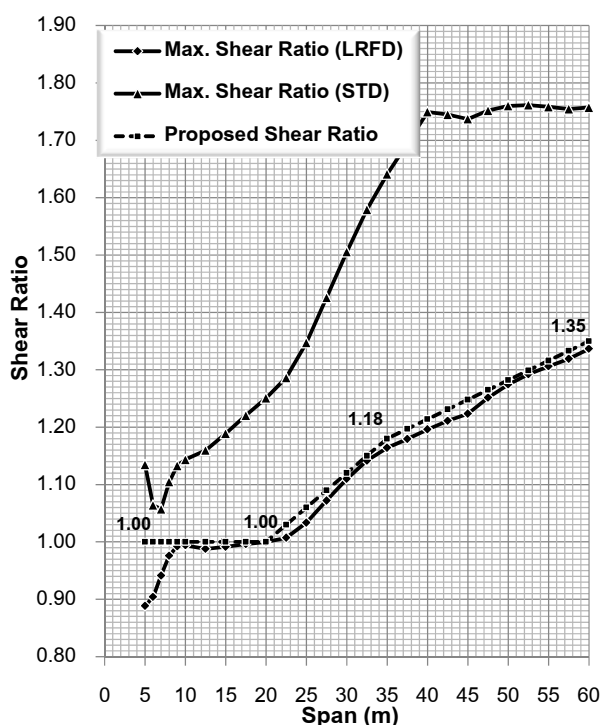
5.2 สัดส่วนแรงเฉือนและสัดส่วนโมเมนต์ดัด

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน เมื่อนำแรงเฉือนสูงสุดและโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จากรถบรรทุกไทยเปรียบเทียบกับที่ได้จาก HL-93(Max.) จะได้สัดส่วนแรงเฉือนสูงสุดและสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดสำหรับรถบรรทุกไทยกับ HL-93(Max.) จากนั้นจึงนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงเฉือนสูงสุด (SR) และสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุด (MR) กับความยาวช่วงสะพาน (L: เมตร) ดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6 พบว่า สัดส่วนแรงเฉือนสูงสุดและสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดมีค่ามากกว่า 1.00 สำหรับความยาวช่วงสะพานที่เกิน 20 เมตร และ 12.5 เมตร ตามลำดับ แสดงว่าหากใช้น้ำหนักบรรทุกจร HL-93 ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน จะต้องปรับเพิ่มหรือลดค่าแรงเฉือนหรือโมเมนต์ดัดที่ได้เพื่อให้สอดคล้องกับที่ได้จากน้ำหนักบรรทุกตามประกาศฉบับต่างๆ ของกรมทางหลวง อนึ่ง สัดส่วนแรงเฉือนสูงสุดและสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดสำหรับรถบรรทุกไทยเมื่อเปรียบเทียบกับ HS20-44(Max.) ที่ได้จาก [11] ได้นำมาแสดงไว้ในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ด้วย โดย สัดส่วนแรงเฉือนสูงสุดและสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างรถบรรทุกไทยกับ HS20-44(Max.) จะ

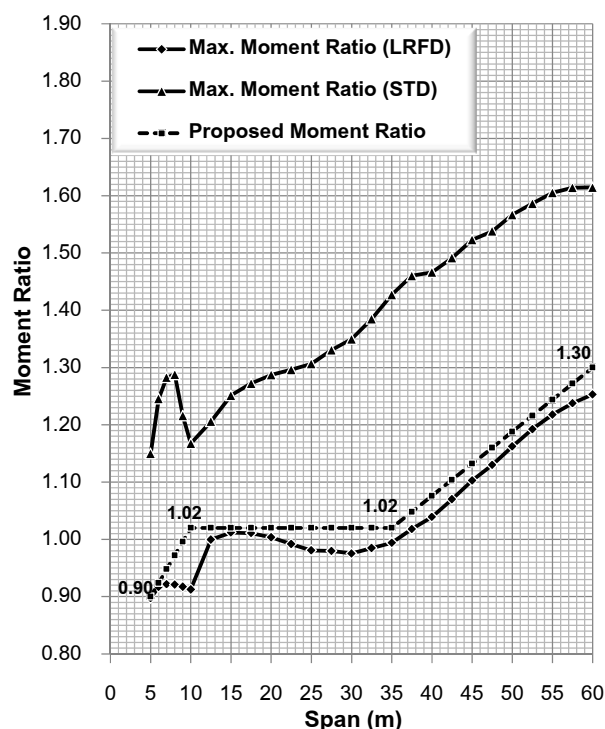
มากกว่าที่เปรียบเทียบกับ HL-93(Max.) อยู่ร้อยละ 31.3 และ 28.8 ตามลำดับ ที่ความยาวช่วงสะพาน 60 เมตร

ตารางที่ 2 แสดงสัดส่วนแรงเฉือนและสัดส่วนโมเมนต์ดัดที่เสนอสำหรับคูณปรับเพิ่มหรือลดค่าแรงเฉือนสูงสุดและโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จาก HL-93(Max.) สัดส่วนที่เสนอจะพิจารณาให้ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์มากที่สุดและให้มีความสะดวกใช้งานในทางปฏิบัติด้วยสำหรับแต่ละช่วงความยาวสะพานที่กำหนด สัดส่วนดังกล่าวสามารถพิจารณาเป็นค่าคงที่หรือแปรผันตรงกับความยาวช่วงสะพานซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการอย่างง่ายได้และแสดงเป็นกราฟในรูปที่ 5 และรูปที่ 6

แม้ว่าการหาสัดส่วนแรงเฉือนและสัดส่วนโมเมนต์ดัดแบบแปรผันตรงและเพิ่มขึ้นตามความยาวช่วงสะพานตามที่เสนออาจมีความยุ่งยากกว่าการกำหนดสัดส่วนดังกล่าวแบบคงที่ที่ความยาวช่วงใดช่วงหนึ่ง แต่สัดส่วนที่ได้เมื่อนำไปปรับเพิ่มค่ากับน้ำหนักบรรทุกจร HL-93(Max.) แล้วจะให้ผลตอบสนองของโครงสร้างที่ใกล้เคียงกับที่ได้จากรถบรรทุกไทยมากกว่า



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงเฉือนสูงสุดกับความยาวช่วงสะพาน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดกับความยาวช่วงสะพาน

ตารางที่ 2 การเสนอสัดส่วนแรงเฉือนและสัดส่วน โมเมนต์คัต

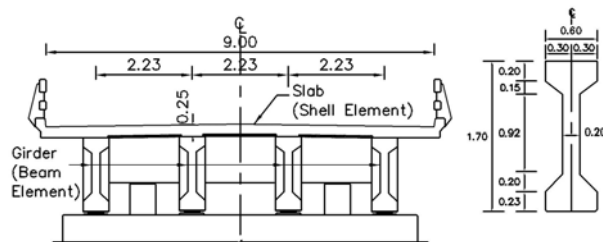
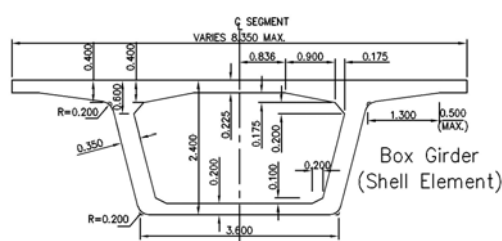
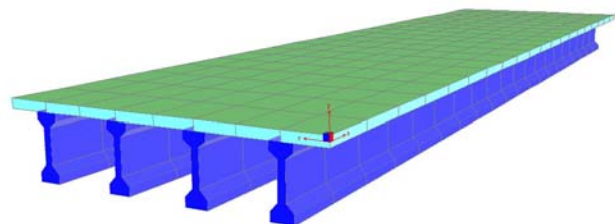
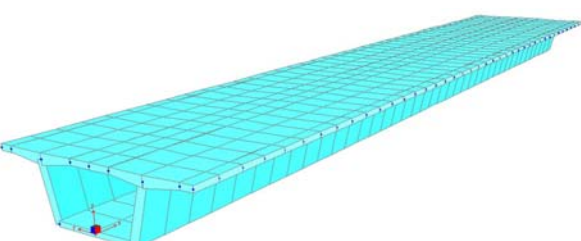
ความยาวช่วง (L : เมตร)	5 - 10	10 - 20	20 - 35	35 - 60
สัดส่วนแรงเฉือน (SR)	1.00	1.00	0.0120L+0.7600 (อยู่ระหว่าง 1.00-1.18)	0.0068L+0.9420 (อยู่ระหว่าง 1.18-1.35)
สัดส่วนโมเมนต์คัต (MR)	0.0240L+0.7800 (อยู่ระหว่าง 0.90-1.02)	1.02	1.02	0.0112L+0.6280 (อยู่ระหว่าง 1.02-1.30)

6. การตรวจสอบสัดส่วนผลตอบแทน

จากการศึกษาเปรียบเทียบพร้อมทั้งเสนอสัดส่วนแรงเฉือน (SR) และสัดส่วนโมเมนต์คัต (MR) นั้นได้มาจากการวิเคราะห์ คานสะพานซึ่งจำลองเป็นแบบชิ้นส่วนคาน 1 มิติ (1D-Beam Element) ดังนั้นจึงควรทำการตรวจสอบสัดส่วนดังกล่าวอีกครั้งด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างอย่างละเอียด (Refined Analysis) โดยจำลองโครงสร้างแบบ 3 มิติ ทั้งนี้ได้เลือก โครงสร้างสะพานที่สามารถรองรับได้ 2 ช่องจราจรจำนวน 2 รูปแบบคือ Slab-Beam ความยาวช่วงสะพาน 30 เมตรและ Box

Girder ความยาวช่วงสะพาน 40 เมตร ลักษณะสะพานและการ จำลองโครงสร้างแสดงไว้ในดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 แสดงผลการตรวจสอบแรงภายในที่เกิดขึ้น สูงสุด พบว่าสัดส่วนแรงภายในที่ได้จากการวิเคราะห์อย่างละเอียดจะน้อยกว่าสัดส่วนที่เสนอ ยกเว้นสัดส่วนแรงเฉือน และโมเมนต์คัตสำหรับคานตัวนอกของสะพาน Slab-Beam ซึ่งมากกว่าร้อยละ 21.4 และ 21.6 ตามลำดับ สำหรับสัดส่วน โมเมนต์คัตสำหรับคานตัวในของสะพาน Slab-Beam มีค่า มากกว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้


รูปที่ 7 ลักษณะและการจำลองโครงสร้างสะพาน Slab-Beam

รูปที่ 8 ลักษณะและการจำลองโครงสร้างสะพาน Box Girder


ตารางที่ 3 ผลการตรวจสอบสัดส่วนแรงภายในที่เกิดขึ้นสูงสุด

Analysis Types	Slab-Girder Bridge						Box Girder Bridge	
	SR (Internal Girder)	SR (External Girder)	SR (Through Section)	MR (Internal Girder)	MR (External Girder)	MR (Through Section)	SR (Through Section)	MR (Through Section)
3D-Refined	1.11	1.36	1.09	1.07	1.24	0.98	1.06	1.04
Proposed	1.12	1.12	1.12	1.02	1.02	1.02	1.21	1.08
%Difference	-0.9	21.4	-2.7	4.9	21.6	-3.9	-12.4	-3.7

7. สรุปและข้อเสนอแนะ

บทความนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของสะพานช่วงเดียวธรรมดาเนื่องจากรถบรรทุกไทยตามประกาศฯ ของกรมทางหลวง [3,4,6,7,8] เปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุกจร HL-93 โดยคานสะพานมีความยาวช่วงตั้งแต่ 5-60 เมตร จากการศึกษาพบว่าแรงเฉือนและโมเมนต์คดสูงสุดในแต่ละช่วงความยาวสะพานจะเกิดจากรถบรรทุกต่างชนิดกันและรถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมมากที่สุดไม่จำเป็นต้องทำให้เกิดแรงเฉือนหรือโมเมนต์คดสูงสุด จากนั้นจึงทำการหาสัดส่วนแรงเฉือน (SR) และสัดส่วนโมเมนต์คด (MR) เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกบรรทุกไทยกับน้ำหนักบรรทุกจร HL-93 ที่สัมพันธ์กับความยาวช่วงสะพาน เพื่อเป็นการเปรียบเทียบและนำไปปรับค่าผลตอบแทนที่ได้จากน้ำหนักบรรทุกจร HL-93 สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบสะพานในประเทศไทยโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO(LRFD) จากผลการศึกษาได้เสนอสัดส่วนแรงเฉือน (SR) ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ (1) $SR=1.00$ เมื่อ $5 \leq L \leq 20$ (2) $SR=0.0120L+0.7600$ เมื่อ $20 \leq L \leq 35$ และ (3) $SR=0.0068L+0.9420$ เมื่อ $35 \leq L \leq 60$ สำหรับสัดส่วนโมเมนต์คด (MR) สามารถแบ่งเป็น 3 ช่วงเช่นเดียวกัน คือ (1) $MR=0.0240L+0.7800$ เมื่อ $5 \leq L \leq 10$ และ (2) $MR=1.02$ เมื่อ $10 \leq L \leq 35$ และ (3) $MR=0.0112L+0.6280$ เมื่อ $35 \leq L \leq 60$ โดยสัดส่วนแรงเฉือนสูงสุดและโมเมนต์คดสูงสุดที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างรถบรรทุกไทยกับ HS20-44(Max.) จะมากกว่าที่เปรียบเทียบกับ HL-93(Max.) อยู่ร้อยละ 31.3 และ 28.8 ตามลำดับอย่างไรก็ตามควรตรวจสอบสัดส่วนดังกล่าวอีกครั้งด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างอย่างละเอียดให้มากขึ้น รวมถึงควรศึกษาโดยใช้คาน

สะพานต่อเนื่องด้วย ซึ่งผลที่ได้สามารถนำมาเป็นข้อมูลในการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบสะพานในประเทศไทยในอนาคตได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] AASHTO. (2002). AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges. 17th. AASHTO. Washington DC.
- [2] AASHTO. (2007). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 4th. AASHTO. Washington DC.
- [3] ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลากินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 122 ตอนพิเศษ 150 ง. 28 ธันวาคม 2548. หน้า 19-25
- [4] กรมทางหลวง. หนังสืออนุญาตที่ ทล0606/9704. 21 ธันวาคม 2550.
- [5] กรมทางหลวง. ประกาศกรมทางหลวงที่ ทล0643/530. หลักเกณฑ์การขออนุญาตให้ใช้ยานพาหนะเดินบนทางหลวงพิเศษทางหลวงแผ่นดิน และทางหลวงสัมปทาน ตามประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษทางหลวงแผ่นดิน และทางหลวงสัมปทาน ลงวันที่ 22 ธันวาคม 2548. 30 กันยายน 2551.
- [6] ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลากินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทาง

หลวงเสียดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2552. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 126 ตอนพิเศษ 92 ง. 30 มิถุนายน 2552. หน้า 2-7

[7] ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลากินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2552. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 126 ตอนพิเศษ 174 ง. 30 พฤศจิกายน 2552. หน้า 116-117

[8] ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลากินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน (ฉบับที่ 4) พ.ศ. 2554. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 128 ตอนพิเศษ 161 ง. 30 ธันวาคม 2554. หน้า 9-10

[9] สุนิติ สุภาพและภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด, 2554. การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของสะพานช่วงเดียวแบบรองรับธรรมดาเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกไทย. วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต, ปีที่ 1 ฉบับที่ 1 (มกราคม-มิถุนายน)

[10] สุนิติ สุภาพและภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด, 2554. การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของสะพานต่อเนื่องสามช่วงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกไทย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16, ชลบุรี.

[11] สุนิติ สุภาพและภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด, 2554. การเปรียบเทียบแรงภายในของสะพานช่วงเดียวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกไทยกับน้ำหนักบรรทุกจรตามมาตรฐาน AASHTO. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, ปีที่ 22 ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2554

[12] ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงชนบท เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลากินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียดินบนทางหลวงชนบท ในเขตความรับผิดชอบ

ของกรมทางหลวงชนบท. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 122 ตอนพิเศษ 151 ง. 29 ธันวาคม 2548. หน้า 9-13

[13] 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.

[14] Barker, R. M. and Puckett, J. A. (2005) Design of highway bridge : An LRFD approach. 2nd. John Wiley and Son, Inc.

[15] สมบัติ ศรีธเนศและสมพร อรรถเสริณวงศ์, การตรวจสอบความปลอดภัยของโครงสร้างส่วนบนโครงการดอนเมืองโทลล์เวย์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกไทย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5, 24-26 มีนาคม 2542.

[16] กรรณิการ์ ริมดุสิตและสมโพธิ วิวิธเกียรติก, การเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนของคานสะพานช่วงเดียวที่เกิดจากรถบรรทุกสี่ล้อและรถบรรทุกมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกา. การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 43, สาขาวิศวกรรมศาสตร์-สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2548.