

การเปรียบเทียบแรงภายในของสะพานช่วงเดียวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกไทยกับน้ำหนักทางหลวง ตามมาตรฐาน AASHTO

A Comparison of Internal Forces of Simple Supported Bridges Due to Thai Truck Loads with AASHTO Highway Loads

สุนิติ สุภาพ¹ และ ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250 โทร. 02-320-2777

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร ปทุมธานี 12121 โทร. 02-986 9009

บทคัดย่อ

น้ำหนักบรรทุกทุกไทยมีความแตกต่างจากน้ำหนักทางหลวงที่กำหนดโดย American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) ซึ่งเป็นมาตรฐานการออกแบบสะพานที่นิยมใช้ในประเทศไทย บทความนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของคานสะพานช่วงเดียวธรรมดาที่มีความยาวช่วงตั้งแต่ 5-60 เมตร เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกไทยกับน้ำหนักทางหลวงตามมาตรฐาน AASHTO เพื่อเปรียบเทียบแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานสะพานพร้อมทั้งเสนอสัดส่วนของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบว่าแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดในแต่ละความยาวช่วงสะพานเกิดจากรถบรรทุกต่างชนิดกันและไม่จำเป็นต้องเกิดจากรถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมมากที่สุด จากผลการวิเคราะห์โครงสร้าง สัดส่วนแรงเฉือนและสัดส่วนโมเมนต์ดัดมีค่าแปรผันตามความยาวตั้งแต่ 1.12-1.89 และ 1.26-1.67 ตามลำดับ สัดส่วนที่เสนอสามารถนำไปปรับเพิ่มค่ากับน้ำหนักทางหลวงตามมาตรฐาน AASHTO เพื่อให้สอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกทุกไทยได้

Abstract

Thai truck weights are different from the highway live loadings specified by the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) standard specifications, which are popularly used for bridge design in Thailand. This article has studied the load-carrying behavior

of simple supported bridge with the length ranging from 5-60 meters due to Thai truck loads and the AASHTO highway loads. This study aims to compare the maximum shear and bending moment of the simple beam bridges. The appropriate ratios of the shear, also bending moment, between Thai truck loads and AASHTO loads are proposed. The results show that, in each span, the maximum shear and bending moment caused by different types of trucks. In addition, the largest trucks produce the maximum responses for some analysis cases. In associated with various bridge span length, the shear ratios and the moment ratios are varied from 1.12 to 1.89 and 1.26 to 1.67, respectively. For bridge design practice in Thailand, these ratios could be applied as multiplier to the AASHTO loads, therefore, the maximum shear and bending moment of simple beam bridge caused by the proportioned AASHTO loads and Thai truck loads are comparable.

1. บทนำ

ในการออกแบบโครงสร้างสะพานในประเทศไทย วิศวกรออกแบบส่วนใหญ่ได้ใช้น้ำหนักทางหลวงตามมาตรฐาน AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) [1] ซึ่งประกอบด้วยน้ำหนักบรรทุกทุก (HS20-44(Truck)) และน้ำหนักบรรทุกแบบ Uniform Concentrated Load (HS20-44(UCL)) ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยจะใช้รูปแบบน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดหน่วย

แรงบนสะพานมากกว่า รูปแบบน้ำหนักบรรทุกดังกล่าวได้กำหนดพิสัยน้ำหนักและระยะห่างระหว่างเพลาล้ำแล้ว จึงทำให้มีความสะดวกในการวิเคราะห์โครงสร้าง อย่างไรก็ตามรถบรรทุกที่ใช้ในประเทศไทยในปัจจุบันได้กำหนดไว้ตามประกาศ ปี พ.ศ. 2548 [2] โดยกรมทางหลวง อีกทั้งยังมีประกาศ ฉบับอื่นๆ เพิ่มเติมอีกหลายฉบับ [3,4,5] ซึ่งรถบรรทุกตามประกาศ มีจำนวนรูปแบบและพิสัยน้ำหนักแตกต่างจากน้ำหนักทางหลวงตามมาตรฐาน AASHTO อีกทั้งระยะห่างระหว่างเพลายังแตกต่างกันออกไปอีกตามบริษัทผู้ผลิต อย่างไรก็ตามมาตรฐาน AASHTO อนุญาตให้ปรับน้ำหนักทางหลวงตามสัดส่วนได้ หากน้ำหนักยานพาหนะมีค่าแตกต่างจากที่กำหนด [1] บทความนี้จึงได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบแรงภายในของคานสะพานช่วงเดียวธรรมดาที่มีความยาวช่วงแตกต่างกันเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในประเทศไทยตามประกาศ ของกรมทางหลวง เพื่อเปรียบเทียบแรงเฉือนสูงสุดและโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานสะพานและทำการหาสัดส่วนของแรงเฉือนสูงสุดและโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุกไทยกับน้ำหนักทางหลวงตามมาตรฐาน AASHTO พร้อมทั้งเสนอสัดส่วนดังกล่าวที่เหมาะสมเพื่อให้มีความสะดวกในทางปฏิบัติสำหรับการวิเคราะห์ออกแบบสะพานในประเทศไทย โดยใช้น้ำหนักทางหลวงตามมาตรฐาน AASHTO

2. รูปแบบและน้ำหนักบรรทุก

ปี พ.ศ. 2548 กรมทางหลวงได้กำหนดรูปแบบและน้ำหนักบรรทุกรถบรรทุกตามประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลามากกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน [2] 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 รูปแบบยานพาหนะทั้งสองหมวดเหมือนกันแต่น้ำหนักรวมและน้ำหนักลงเพลากำหนดในหมวดที่ 1 จะน้อยกว่าหมวดที่ 2 ประมาณ 10%-20% สำหรับในหมวดที่ 3 ได้กำหนดรายละเอียดยานพาหนะที่ห้ามเดินบนทางหลวงวันแต่จะได้รับอนุญาตตามเงื่อนไขและมาตรการที่จำเป็นเพื่อรักษาทางหลวง ยานพาหนะดังกล่าวได้แก่ ยานพาหนะที่มีลักษณะเพลาล้อและยาง รวมถึงน้ำหนักหรือน้ำหนักลงเพลามากเกินกว่าที่กำหนดในหมวดที่ 1 และ 2 ยานพาหนะที่ต้องขนส่งสิ่งของขนาดใหญ่ซึ่งไม่อาจแยกชิ้นส่วนได้ ยานพาหนะที่โดยสภาพมีลักษณะเป็นเครื่องจักรกล หรือยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถกึ่งพ่วงที่ประกอบด้วยรถกึ่งพ่วงมากกว่า 1 คันขึ้นไป

ปี พ.ศ. 2550 กรมทางหลวงออกหนังสืออนุญาตให้ยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (Full Trailer) เดินบนทางหลวงพิเศษและทางหลวงแผ่นดินได้ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2551 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2551 [3] โดยตัวรถลากจูงมี 3 เพล 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ชนิดเพลาท้าย (เพลาคู่ที่ 2 และเพลาคู่ที่ 3) เป็นเพลาคู่ ใช้ยางคู่ ต้องมีน้ำหนักลงเพลาคู่ท้าย 20,000 กิโลกรัม หรือน้ำหนักยานพาหนะรวมไม่เกิน 25,000 กิโลกรัม ตัวรถพ่วงมี 3 เพล 6 ล้อ ยาง 12 เส้น ชนิดเพลาน้ำใช้ยางคู่ เพลาคู่ท้าย (เพลาคู่ที่ 2 และเพลาคู่ที่ 3) เป็นเพลาคู่ (Tandem Axle) ใช้ยางคู่ ต้องมีน้ำหนักลงเพลาน้ำไม่เกิน 10,000 กิโลกรัม และมีน้ำหนักลงเพลาคู่ท้ายไม่เกิน 18,000 กิโลกรัม ทั้งนี้ เมื่อนำมาต่อพ่วงกับตัวรถลากจูงต้องมีระยะห่างระหว่างกึ่งกลางเพลาคู่ท้ายของรถลากจูงถึงกึ่งกลางเพลาคู่ท้ายของรถพ่วงไม่น้อยกว่า 9.75 เมตร ตามหนังสืออนุญาตฉบับนี้รูปแบบรถลากจูงเหมือนกับที่กำหนดในตามประกาศ

ปี พ.ศ. 2548 หมวดที่ 2 ข้อ 15 แต่รูปแบบรถพ่วงได้กำหนดเพิ่มเติมขึ้นมาใหม่ โดยมีน้ำหนักยานพาหนะรวมไม่เกิน 53,000 กิโลกรัม

ปี พ.ศ. 2551 กรมทางหลวงออกประกาศ เรื่องหลักเกณฑ์การขออนุญาตให้ใช้ยานพาหนะเดินบนทางหลวงพิเศษทางหลวงแผ่นดิน และทางหลวงสัมปทาน ตามประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษทางหลวงแผ่นดิน และทางหลวงสัมปทาน ลงวันที่ 22 ธันวาคม 2548 [4] โดยกำหนดรายละเอียดการขออนุญาตสำหรับยานพาหนะตามที่ระบุในหมวดที่ 3 ตามประกาศ ปี พ.ศ. 2548 ในการขออนุญาต นอกจากจะต้องระบุวัตถุประสงค์แล้วจะต้องมีรายการคำนวณที่แสดงว่ายานพาหนะที่ขออนุญาตเมื่อเคลื่อนที่ผ่านสะพานต้องมีแรงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างสะพานทั้งแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดมีค่าไม่เกินตามที่กำหนดในประกาศ ฉบับนี้ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะและความยาวของโครงสร้างสะพาน

ปี พ.ศ. 2552 กรมทางหลวงออกประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2552 [5] ซึ่งได้แก้ไขเพิ่มเติมจากประกาศ ปี พ.ศ. 2548 ในประกาศ ฉบับนี้ได้กำหนดระยะห่างระหว่างสลักพ่วง (King Pin) กับศูนย์กลางของเพลาคู่ที่ 1 (ระยะ S ในรูปที่ 1) ของยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถกึ่งพ่วง (Semi-Trailer) ตั้งแต่ 4.50–8.00 เมตรและน้ำหนักบรรทุกรวมตั้งแต่ 45,000–49,000 กิโลกรัมที่สอดคล้องกับระยะห่างระหว่างสลักพ่วงดังกล่าว สำหรับยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (Full Trailer) ได้กำหนดระยะระหว่างกึ่งกลางเพลาคู่ท้ายของรถลากจูงถึงกึ่งกลางเพลาคู่ท้ายของรถพ่วงต้องไม่น้อยกว่า 9.75 เมตร ซึ่งตั้งแต่ 1 ม.ค. 2556 เป็นต้นไป ยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถกึ่งพ่วง (Semi-Trailer) และยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (Full Trailer) จะต้องมียานพาหนะรวมน้ำหนักบรรทุกไม่เกิน 50,500 กิโลกรัม และปลายปี พ.ศ. 2552 กรมทางหลวงได้ออก

ประกาศ (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2552 [6] โดยกำหนดให้ตัวรถลากจูงและรถพ่วง (Full Trailer) แบบ Full50.5(2) (ตามตารางที่ 1) เมื่อเดินบนสะพานต้องเว้นระยะห่างจากยานพาหนะชนิดเดียวกันที่เดินรถอยู่ข้างหน้าไม่น้อยกว่า 200 เมตร ซึ่งบังคับใช้ถึงวันที่ 31 ธันวาคม 2554

หากจะพิจารณารูปแบบรถบรรทุกตามประกาศทั้งหมดของกรมทางหลวง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548–2552 ข้างต้น สามารถสรุปเป็นรูปแบบรถบรรทุก น้ำหนักลงเพลา ระยะห่างระหว่างเพลาและน้ำหนักรวม โดยมีรูปแบบรถบรรทุกทุกแบบ ยานพาหนะชนิดรถเดี่ยว (Single Unit) 4 ประเภท แบบ ยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถกึ่งพ่วง (Semi-Trailer) 26 ประเภท และแบบยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (Full-Trailer) 14 ประเภท [7]

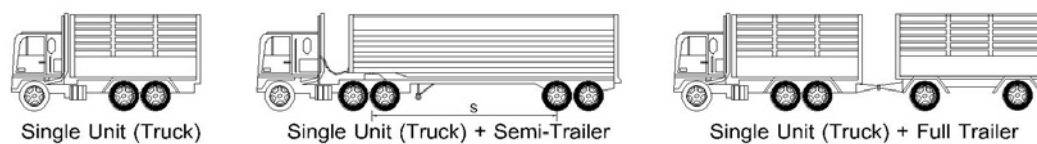
อนึ่ง กรมทางหลวงชนบทซึ่งเป็นอีกหน่วยงานหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับงานทางภายในประเทศ ได้กำหนดยานพาหนะที่สามารถเดินบนถนนในเขตความรับผิดชอบของกรมทางหลวงชนบทเองเช่นเดียวกัน โดยออกประกาศผู้อำนวยการทางหลวงชนบท เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงชนบท ในเขตความรับผิดชอบของกรมทางหลวงชนบท [8] ในประกาศ ฉบับนี้มีรายละเอียดน้ำหนักและรูปแบบรถบรรทุกคล้ายกับประกาศ ของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2548 [2]

3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

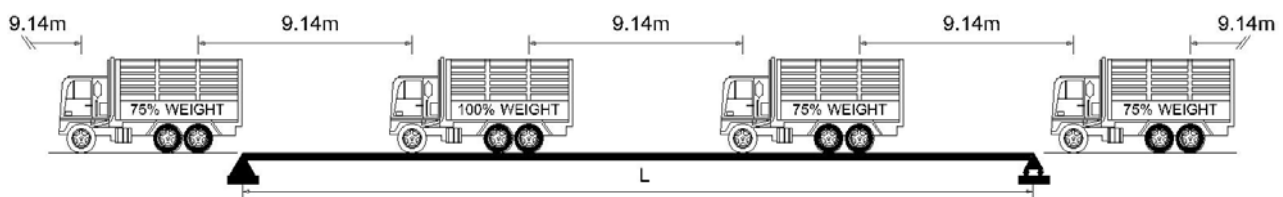
การศึกษาผลกระทบการออกแบบสะพานเนื่องจากความแตกต่างของรูปแบบและน้ำหนักของรถบรรทุกจริงกับน้ำหนักทางหลวงตามมาตรฐาน AASHTO พบว่าในบางช่วงของความยาวสะพานหรือในบางประเภทของรถบรรทุก หน่วยแรงที่คำนวณได้จากน้ำหนักทางหลวงตามมาตรฐาน AASHTO ให้ค่าที่ไม่มีความปลอดภัย [9,10] ซึ่งควรมีการปรับปรุงเพื่อให้สอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกจริงแต่ละพื้นที่ สำหรับประเทศไทย สมบัติและสมพร [11] ได้ศึกษาผลกระทบดังกล่าว โดยได้ตรวจสอบความปลอดภัยของคานสะพานเนื่องจาก

รถบรรทุกไทยจึงเป็นขบวนที่ระยะห่างระหว่างรถบรรทุกเท่าๆ กันและนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับ HS20-44 โดยได้ทำการเลือกรถบรรทุกที่เป็นที่นิยมในประเทศไทยจำนวน 7 ลักษณะ (จากทั้งหมด 72 ลักษณะตามประกาศของกรมทางหลวง) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้จำกัดความยาวของคานสะพานไว้เพียง 37.16 เมตร ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าหน่วยแรงในคานสะพานเนื่องจากรถบรรทุกประเภทที่ 3 (รถกึ่งพ่วงหนัก 38 ตัน) และ 6 (รถพ่วงหนัก 35 ตัน) มีค่ามากกว่าผลการคำนวณจาก HS20-44 สูงสุดถึง 26% และ 23% ตามลำดับ สอดคล้องกับข้อแนะนำโดยกรมทางหลวงที่ให้เพิ่มน้ำหนักบรรทุกของ AASHTO อีก 30% ในขณะที่กรณีการและสมโพธิ์ [12] ได้ทำการเปรียบเทียบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานสะพานเนื่องจากรถสิบล้อไทยที่บรรทุกน้ำหนักเกินจาก 21 ตันไปเป็น 26, 28 และ 35 ตัน ตามลำดับ เปรียบเทียบกับ HS20-44 บนสะพานช่วงเดียวที่มีความยาวช่วงตั้งแต่ 10 ถึง 38 เมตรและจัดรถวิ่งเป็นขบวนติดกันโดยรูปแบบของรถบรรทุก

ที่ใช้ในการวิเคราะห์จำลองมาจากรถบรรทุกที่มีจำหน่ายอยู่ในประเทศไทย ผลการวิเคราะห์พบว่าสำหรับคานช่วงสั้นที่มีความยาวช่วงไม่เกิน 15 เมตร การออกแบบสะพานโดยใช้ HS20-44 สามารถใช้แทนรถสิบล้อไทยขนาด 21 ตัน ได้อย่างปลอดภัย ในขณะที่ความยาวช่วงที่มีค่าเกิน 15 เมตร เป็นต้นไปค่าหน่วยแรงสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ HS20-44 จะมีค่ามากกว่าถึง 94.69% สำหรับที่ความยาวช่วง 38 เมตรและหากทำการเพิ่มน้ำหนักของรถสิบล้อไทยให้เป็น 28 และ 35 ตัน จะสร้างหน่วยแรงส่วนเกินเมื่อเปรียบเทียบกับ HS20-44 ที่ความยาวสูงสุดคือ 38 เมตร ถึง 170.64% และ 238.30% ตามลำดับ ตัวอย่างงานวิจัยทั้งสองข้างต้นมีประโยชน์ต่องานออกแบบงานสะพานในประเทศไทยอย่างมาก อย่างไรก็ตามถ้าหากมีการพิจารณาความยาวช่วงคานที่หลากหลายและขนาดของรถบรรทุกที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน รวมถึงน้ำหนักแบบ UCL ซึ่งอาจให้ค่าวิกฤติสำหรับสะพานช่วงยาว จะทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 1 รูปแบบยานพาหนะที่กำหนดไว้ในประกาศฯ ของกรมทางหลวง ปี พ.ศ. 2548 [2]



รูปที่ 2 คานสะพานและรูปแบบการวางน้ำหนักบรรทุกเป็นขบวน (Truck Train Loading)

4. วิธีการศึกษา

4.1 การจำลองโครงสร้างและการจัดวางน้ำหนักบรรทุก

คานสะพานที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นแบบคานช่วงเดี่ยวธรรมดา (Simple Supported Beam) มีช่วงความยาวที่แตกต่างกันคือ 5-10 เมตร (เพิ่มทีละ 1 เมตร) และ 10-60 เมตร (เพิ่มทีละ 2.5 เมตร)

การจัดวางน้ำหนักทางหลวง ได้ให้รถบรรทุกเพียงคันเดียวและรถบรรทุกหลายคันเคลื่อนที่เป็นขบวนในแต่ละช่องจราจร ซึ่งกำหนดให้รถบรรทุกทุกประเภทมีระยะห่างระหว่างเพลาหลังของรถคันหน้าถึงเพลาหน้ารถของคันที่ตามมามีระยะเท่ากับ 9.14 เมตร (30 ฟุต) [1 : Appendix B] รถบรรทุกจะถูกจัดวางเป็นขบวนในลักษณะวิ่งไปในทิศทางและในช่องจราจรเดียวกันจำนวน 1 ช่องจราจร โดยมีจำนวนรถบรรทุกเคลื่อนที่เต็มช่วงความยาวสะพาน และจัดให้รถบรรทุกที่มีน้ำหนักขนาด 75% วางสลับกันในขบวน ดังแสดงในรูปที่ 2

4.2 รถบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง

ในการศึกษา จะใช้น้ำหนักรถบรรทุกไทยตามประกาศ ปี พ.ศ. 2548 [2] โดยกรมทางหลวง รวมทั้งประกาศฯ เพิ่มเติมของปี พ.ศ. 2550 [3] และปี พ.ศ. 2552 [5,6] กับน้ำหนักทางหลวงตามมาตรฐาน AASHTO โดยจะเลือกใช้รถบรรทุกบางรูปแบบที่มีผลต่อแรงเฉือนและโมเมนต์คดสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง เกณฑ์ที่ใช้ในการเลือกรถบรรทุกจะคำนึงถึง 3 ปัจจัยด้วยกัน คือ (1) น้ำหนักรถบรรทุก กล่าวคือหากรถบรรทุกประเภทเดียวกันนั้นมีความยาวช่วงรถหรือมีระยะห่างระหว่างเพลาเท่ากันแล้วรถบรรทุกที่มีน้ำหนักมากกว่าจะทำให้เกิดแรงเฉือนและโมเมนต์คดสูงกว่า (2) ระยะห่างระหว่างเพลา กล่าวคือหากรถบรรทุกมีระยะห่างระหว่างเพลาอย่างน้อยเมื่อแล่นต่อกันบนสะพานจะทำให้มีน้ำหนักมากกระทำบนสะพานมากกว่าขบวนรถบรรทุกที่มีระยะห่างระหว่างเพลามากกว่า อย่างไรก็ตามในการศึกษาจะพิจารณาระยะห่างระหว่างเพลามากที่สุดและน้อยที่สุด (Maximum and Minimum Axle Distance) ด้วย และ (3) ไม่พิจารณารูปแบบรถบรรทุกที่จะยกเลิกก่อนวันที่ 31 ธันวาคม 2555 จากปัจจัยข้างต้น จะได้รถบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยมีรูปแบบและ

น้ำหนักรถบรรทุกแบบ AASHTO (Truck และ UCL) 2 ประเภท แบบยานพาหนะชนิดรถเดี่ยว (Single Unit) 2 ประเภท แบบยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถกึ่งพ่วง (Semi-Trailer) 9 ประเภท และแบบยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (Full-Trailer) 4 ประเภท เท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 1

เนื่องจากในประกาศฯ ของกรมทางหลวงไม่ได้กำหนดระยะห่างระหว่างเพลาของรถบรรทุกหรือของตัวรถลากจูง (กำหนดเฉพาะของตัวรถพ่วงเท่านั้น) อีกทั้งบริษัทผู้ผลิตรถบรรทุกแต่ละรายกำหนดระยะห่างระหว่างเพลาแตกต่างกันออกไป ในการศึกษาจึงได้รวบรวมข้อมูลระยะห่างระหว่างเพลาของรถบรรทุกแต่ละรูปแบบที่มีใช้และผลิตในประเทศไทยตามตารางที่ 1 ระยะห่างระหว่างเพลาของรถบรรทุกชนิดต่างๆ ได้กำหนดเป็นช่วงระยะห่างระหว่างเพลาที่น้อยที่สุด (Minimum Axle Distance) และระยะห่างระหว่างเพลามากที่สุด (Maximum Axle Distance) สำหรับวิเคราะห์โครงสร้าง

การวิเคราะห์โครงสร้างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ จะอาศัยหลักการของเส้นอิทธิพล (Influence Line) โดยได้นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาเป็นเครื่องมือช่วยในการคำนวณ ทั้งนี้การวิเคราะห์โครงสร้างจะไม่รวมผลของแรงกระแทก (Dynamic Impact Effect) เนื่องจากสมมติให้ค่าแรงกระแทกระหว่างน้ำหนักทางหลวงตามมาตรฐาน AASHTO และรถบรรทุกไทยมีค่าเท่ากัน

5. ผลการศึกษา

5.1 แรงเฉือนสูงสุดและโมเมนต์คดสูงสุด

จากการวิเคราะห์คานสะพานช่วงเดี่ยวธรรมดาเนื่องจากน้ำหนักทางหลวงตามมาตรฐาน AASHTO และน้ำหนักรถบรรทุกไทยตามตารางที่ 1 พบว่าแรงเฉือนสูงสุดและโมเมนต์คดสูงสุดเกิดที่บริเวณฐานรองรับและที่บริเวณกึ่งกลางคานตามลำดับ และมีค่ามากขึ้นเมื่อความยาวช่วงคานมากขึ้น รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนสูงสุดกับช่วงความยาวสะพาน เมื่อพิจารณาช่วงความยาวสะพาน 15 เมตร จะเห็นว่าแรงเฉือนสูงสุดเกิดจากรถบรรทุกแบบ Full50.5(1) และแบบ Semi45(2) โดยที่ช่วงความยาวอื่นๆ เกิดจากรถลาก

จูงและรถกึ่งพ่วง (Semi-Trailer) รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดสูงสุดกับช่วงความยาวสะพาน เมื่อพิจารณาช่วงความยาวสะพาน 25 และ 30 เมตร จะเห็นว่าโมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดจากรถบรรทุกแบบ Semi45(2) และแบบ Full50.5(2) โดยที่ช่วงความยาวอื่นๆ โมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดจากรถลากจูงและรถกึ่งพ่วง (Semi-Trailer) จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าแรงเฉือนสูงสุดและโมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดจากรถบรรทุกต่างชนิดกันในแต่ละความยาวช่วงสะพานและไม่จำเป็นต้องเกิดจากรถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมมากที่สุด

จากรูปที่ 3 และรูปที่ 4 จะเห็นว่าค่าแรงเฉือนสูงสุดและโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จากรถบรรทุกที่มีระยะห่างระหว่างเพลาน้อยที่สุดจะมากกว่าที่ได้จากรถบรรทุกที่มีระยะห่างระหว่างเพลามากที่สุดเท่ากับ 4.4% สำหรับแรงเฉือนสูงสุดและ 4.3% สำหรับโมเมนต์ดัดสูงสุด ที่ความยาวช่วงสะพาน 60 เมตร

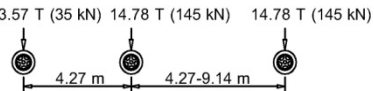
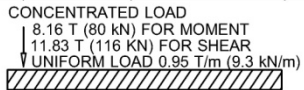
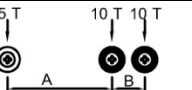
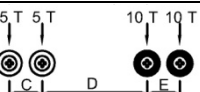
5.2 สัดส่วนแรงเฉือนและสัดส่วนโมเมนต์ดัด

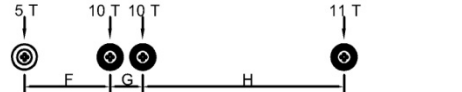
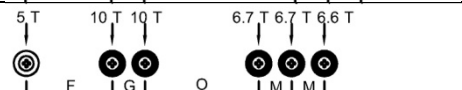
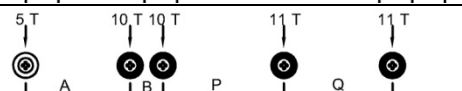
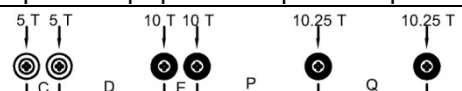
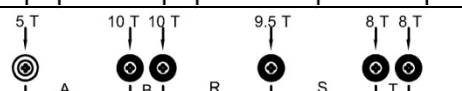
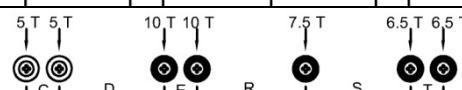
จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน เมื่อนำแรงเฉือนสูงสุดและโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จากรถบรรทุกไทยเปรียบเทียบกับที่ได้จากน้ำหนักทางหลวงตามมาตรฐาน AASHTO (HS20-44(Max.)) จะได้สัดส่วนแรงเฉือนสูงสุดและสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดสำหรับรถบรรทุกไทยกับ HS20-44(Max.) จากนั้นจึงนำมาเขียนกราฟแสดง

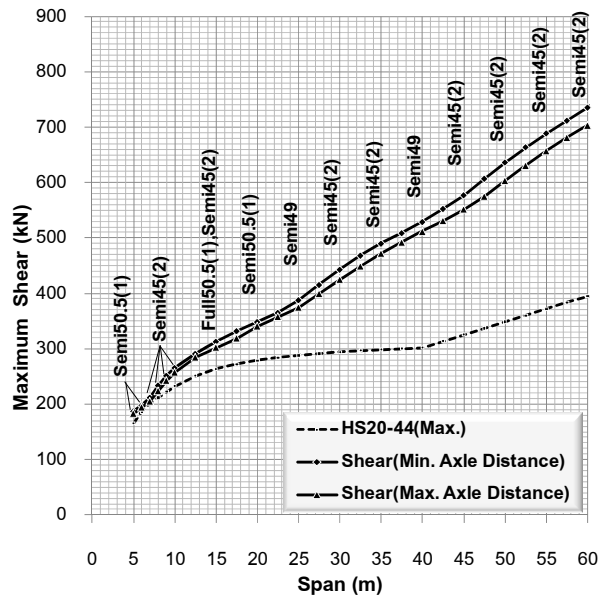
ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงเฉือนสูงสุด (SR) และสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุด (MR) กับความยาวช่วงสะพาน (L:เมตร) ดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6 พบว่าสัดส่วนแรงเฉือนสูงสุดและสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดในแต่ละช่วงความยาวสะพานมีค่ามากกว่า 1.00 แสดงว่าหากใช้น้ำหนักทางหลวงตามมาตรฐาน AASHTO ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานจะต้องเพิ่มค่าแรงเฉือนหรือโมเมนต์ดัดที่ได้ขึ้นไปอีกเพื่อให้สอดคล้องกับที่ได้จากน้ำหนักรถบรรทุกตามประกาศฉบับต่างๆ ของกรมทางหลวง โดยสัดส่วนแรงเฉือนสูงสุดและโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จากรถบรรทุกที่มีระยะห่างระหว่างเพลาน้อยที่สุดจะมากกว่าที่ได้จากรถบรรทุกที่มีระยะห่างระหว่างเพลามากที่สุดประมาณ 5% ที่ความยาวช่วงสะพาน 60 เมตร

ตารางที่ 2 แสดงสัดส่วนแรงเฉือนและสัดส่วนโมเมนต์ดัดที่เสนอสำหรับคูณเพิ่มกับแรงเฉือนสูงสุดและโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จาก HS20-44(Max.) ตามลำดับ สัดส่วนที่เสนอจะพิจารณาให้ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์มากที่สุดและให้มีความสะดวกใช้งานในทางปฏิบัติด้วย สำหรับแต่ละช่วงความยาวสะพานที่กำหนด สัดส่วนดังกล่าวสามารถพิจารณาเป็นค่าคงที่หรือแปรผันตรงกับความยาวช่วงสะพานซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการอย่างง่ายได้และแสดงเป็นกราฟในรูปที่ 5 และรูปที่ 6

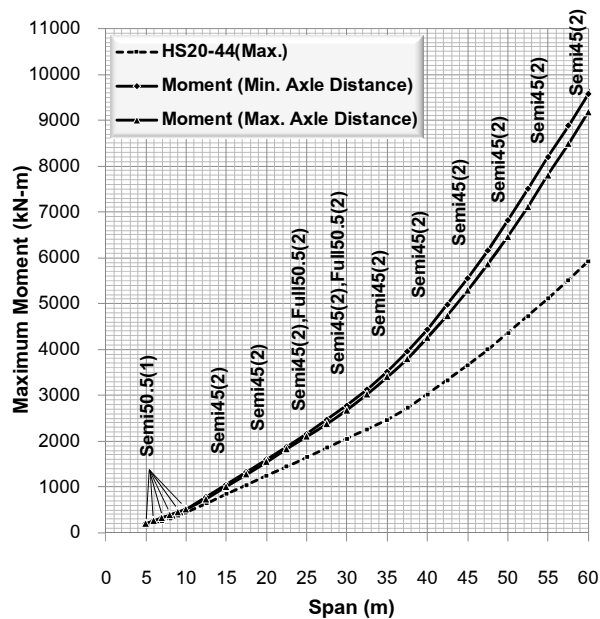
ตารางที่ 1 รูปแบบและน้ำหนักรถบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์

รูปแบบรถ (น้ำหนักรวม : ตัน)	น้ำหนักต่อเพล (ตัน)	ตามมาตรฐาน/ ประกาศฯ	หมายเหตุ
HS20-44(Truck) (33.13)		AASHTO [1]	1. HS20-44(Max.) คือรูปแบบรถที่ให้ค่าแรงภายในสูงสุดที่ได้จากรูปแบบรถระหว่าง HS20-44(Truck) และ HS20-44(UCL) 2. ระยะห่างระหว่างเพลาน้อยที่สุดและมากที่สุด (Minimum and Maximum)
HS20-44(UCL) (0.95L+8.16/11.83)		AASHTO [1]	
Truck25 (25)		ปทล.(2548) หมวด 2 ข้อ 15	
Truck30 (30)		ปทล.(2548) หมวด 2 ข้อ 18	

รูปแบบรถ (น้ำหนักรวม : ตัน)	น้ำหนักต่อเพล (ตัน)	ตามมาตรฐาน/ ประกาศฯ	หมายเหตุ																																																																	
Semi36 (36)		ปทล.(2548) หมวด 2 ข้อ 19(2)	<table><tr><th rowspan="2"></th><th colspan="2">Axle Distance (mm)</th></tr><tr><th>Min.</th><th>Max.</th></tr><tr><td>A</td><td>4025</td><td>5075</td></tr><tr><td>B</td><td>1250</td><td>1350</td></tr><tr><td>C</td><td>1300</td><td>1900</td></tr><tr><td>D</td><td>3300</td><td>3600</td></tr><tr><td>E</td><td>1250</td><td>1350</td></tr><tr><td>F</td><td>3025</td><td>3575</td></tr><tr><td>G</td><td>1250</td><td>1350</td></tr><tr><td>H</td><td>6825</td><td>7025</td></tr><tr><td>I</td><td>1300</td><td>1900</td></tr><tr><td>J</td><td>3025</td><td>3575</td></tr><tr><td>K</td><td>1250</td><td>1350</td></tr><tr><td>L</td><td>5825</td><td>6025</td></tr><tr><td>M</td><td>1250</td><td>1350</td></tr><tr><td>N</td><td>4825</td><td>5025</td></tr><tr><td>O</td><td>3325</td><td>3525</td></tr><tr><td>P</td><td>4775</td><td>4825</td></tr><tr><td>Q</td><td>4300</td><td>4300</td></tr><tr><td>R</td><td>3325</td><td>4475</td></tr><tr><td>S</td><td>4025</td><td>5075</td></tr><tr><td>T</td><td>1250</td><td>1350</td></tr></table>		Axle Distance (mm)		Min.	Max.	A	4025	5075	B	1250	1350	C	1300	1900	D	3300	3600	E	1250	1350	F	3025	3575	G	1250	1350	H	6825	7025	I	1300	1900	J	3025	3575	K	1250	1350	L	5825	6025	M	1250	1350	N	4825	5025	O	3325	3525	P	4775	4825	Q	4300	4300	R	3325	4475	S	4025	5075	T	1250	1350
	Axle Distance (mm)																																																																			
	Min.	Max.																																																																		
A	4025	5075																																																																		
B	1250	1350																																																																		
C	1300	1900																																																																		
D	3300	3600																																																																		
E	1250	1350																																																																		
F	3025	3575																																																																		
G	1250	1350																																																																		
H	6825	7025																																																																		
I	1300	1900																																																																		
J	3025	3575																																																																		
K	1250	1350																																																																		
L	5825	6025																																																																		
M	1250	1350																																																																		
N	4825	5025																																																																		
O	3325	3525																																																																		
P	4775	4825																																																																		
Q	4300	4300																																																																		
R	3325	4475																																																																		
S	4025	5075																																																																		
T	1250	1350																																																																		
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)																																																																		
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.(2548) หมวด 2 ข้อ 20(2)	3. ความกว้างเพลของรถบรรทุกชนิดต่างๆ																																																																	
Full50.5(3) (50.5)		ปทล.(2552) ข้อ 20/3 (เริ่มใช้ 1 ม.ค. 56)	เท่ากับ 1800 mm																																																																	
Full50.5(1) (50.5)		ปทล.(2552) ข้อ 20/1 (เริ่มใช้ 1 ม.ค. 56)	4. ความกว้างน้ำหนักบรรทุกคงที่ของ HS20-44(UCL)																																																																	
Full50.5(2) (50.5)		ปทล.(2552) ข้อ 20/2 (เริ่มใช้ 1 ม.ค. 56)	เท่ากับ 3000 mm																																																																	
			5. ปทล.คือ ประกาศฯ กรมทางหลวง , L คือ ความยาวช่วงสะพาน																																																																	



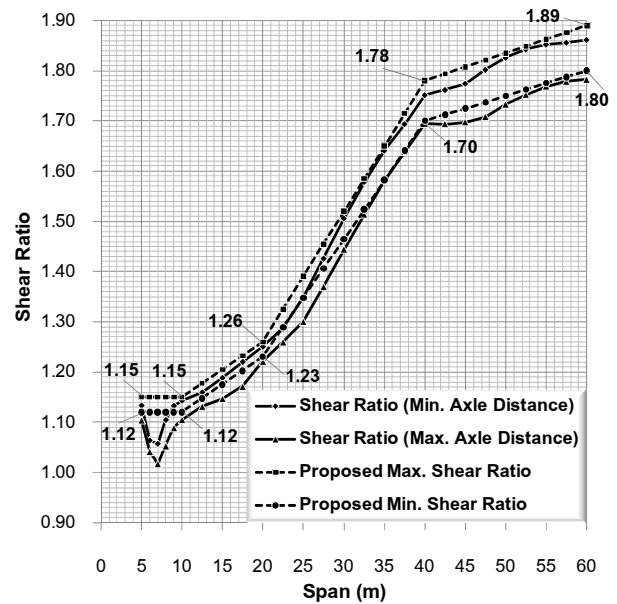
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนสูงสุดกับความยาวช่วงสะพาน



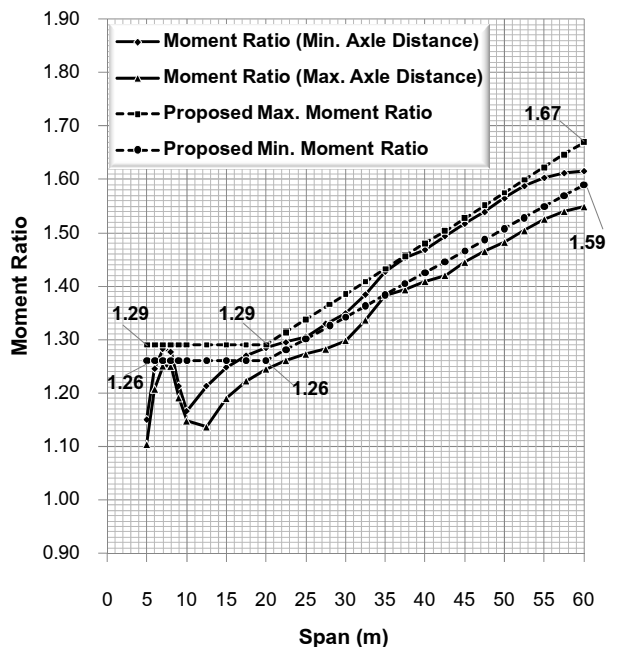
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดสูงสุดกับความยาวช่วงสะพาน

แม้ว่าการหาสัดส่วนแรงเฉือนและสัดส่วนโมเมนต์ดัดแบบแปรผันตรงและเพิ่มขึ้นตามความยาวช่วงสะพานตามที่เสนออาจมีความยุ่งยากกว่าการกำหนดสัดส่วนดังกล่าวแบบคงที่ที่ความยาวช่วงใดช่วงหนึ่ง แต่สัดส่วนที่ได้เมื่อนำไปปรับเพิ่มค่ากับน้ำหนักทางหลวงตามมาตรฐาน AASHTO

(HS20-44(Max.)) แล้วจะให้ผลตอบแทนของโครงสร้างที่ใกล้เคียงกับที่ได้จากรถบรรทุกไทยมากกว่า



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงเฉือนสูงสุดกับความยาวช่วงสะพาน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดกับความยาวช่วงสะพาน

6. การตรวจสอบสัดส่วนแรงภายใน

การศึกษาเปรียบเทียบพร้อมทั้งเสนอสัดส่วนแรงเฉือน (SR) และสัดส่วนโมเมนต์คัต (MR) นั้นได้มาจากการวิเคราะห์คาน สะพานซึ่งจำลองเป็นแบบชิ้นส่วนคาน 1 มิติ (1D-Beam Element) ดังนั้นจึงทำการตรวจสอบสัดส่วนดังกล่าวอีกครั้ง ด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างอย่างละเอียด (Refined Analysis) โดยจำลองโครงสร้างแบบ 3 มิติ ทั้งนี้ได้เลือกโครงสร้าง สะพานที่สามารถรองรับได้ 2 ช่องจราจรจำนวน 2 รูปแบบคือ

Slab-Beam ความยาวช่วงสะพาน 30 เมตรและ Box Girder ความยาวช่วงสะพาน 40 เมตร ลักษณะสะพานและการจำลอง โครงสร้างแสดงไว้ในดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ

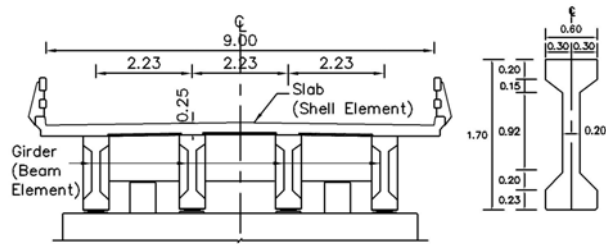
ตารางที่ 3 แสดงผลการตรวจสอบแรงภายในที่เกิดขึ้น สูงสุด พบว่าสัดส่วนแรงภายในที่ได้จากการวิเคราะห์ห้อย่าง ละเอียดจะน้อยกว่าสัดส่วนที่เสนอยกเว้นสัดส่วนแรงเฉือน สำหรับคานตัวนอกของสะพาน Slab-Beam และสำหรับ สะพาน Box Girder ซึ่งมากกว่า 3.3% และ 0.6% ตามลำดับ

ตารางที่ 2 การเสนอสัดส่วนแรงเฉือนและสัดส่วนโมเมนต์คัต

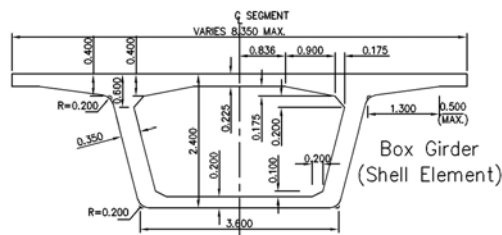
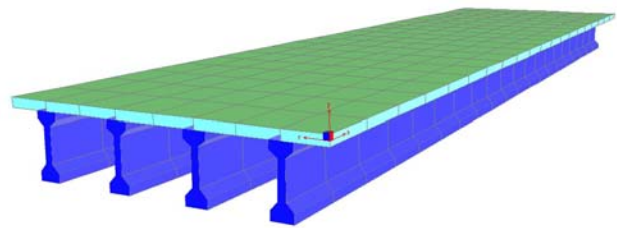
ความยาวช่วง (L : เมตร)	สัดส่วนแรงเฉือน (SR)		สัดส่วนโมเมนต์คัต (MR)	
	ระยะห่างระหว่างเพลามากที่สุด (Maximum Axle Distance)	ระยะห่างระหว่างเพลาน้อยที่สุด (Maximum Axle Distance)	ระยะห่างระหว่างเพลามากที่สุด (Maximum Axle Distance)	ระยะห่างระหว่างเพลาน้อยที่สุด (Maximum Axle Distance)
5 - 10	1.12	1.15	1.26	1.29
10 - 20	0.0110L+1.010 (มีค่าระหว่าง 1.12-1.23)	0.0110L+1.040 (มีค่าระหว่าง 1.15-1.26)		
20 - 40	0.0235L+0.760 (มีค่าระหว่าง 1.23-1.70)	0.0260L+0.740 (มีค่าระหว่าง 1.26-1.78)	0.0083L+1.095 (มีค่าระหว่าง 1.26-1.59)	0.0095L+1.100 (มีค่าระหว่าง 1.29-1.67)
40 - 60	0.0050L+1.500 (มีค่าระหว่าง 1.70-1.80)	0.0055L+1.560 (มีค่าระหว่าง 1.78-1.89)		

ตารางที่ 3 ผลการตรวจสอบสัดส่วนแรงภายในที่เกิดขึ้นสูงสุด

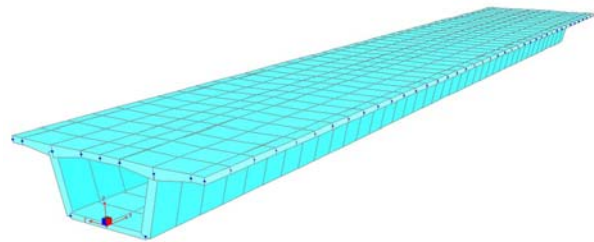
Analysis Types	Slab-Girder Bridge				Box Girder Bridge	
	SR (Internal Girder)	SR (External Girder)	MR (Internal Girder)	MR (External Girder)	SR	MR
3D-Refined	1.28	1.57	1.32	1.38	1.79	1.46
Proposed	1.52	1.52	1.39	1.39	1.78	1.48
%Difference	-15.8	3.3	-5.0	-0.7	0.6	-1.4



รูปที่ 7 ลักษณะและการจำลองโครงสร้างสะพาน Slab-Beam



รูปที่ 8 ลักษณะและการจำลองโครงสร้างสะพาน Box Girder



7. สรุปและข้อเสนอแนะ

บทความนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของสะพานช่วงเดียวธรรมดาเนื่องจากรถบรรทุกไทยตามประกาศฯ ของกรมทางหลวง [2,3,5,6] เปรียบเทียบกับน้ำหนักทางหลวงตามมาตรฐาน AASHTO โดยคันสะพานมีความยาวช่วงตั้งแต่ 5-60 เมตร จากการศึกษาพบว่าแรงเฉือนและโมเมนต์คดสูงสุดในแต่ละช่วงความยาวสะพานจะเกิดจากรถบรรทุกต่างชนิดกัน และรถบรรทุกที่มีน้ำหนักมากที่สุดไม่จำเป็นต้องทำให้เกิดแรงเฉือนหรือโมเมนต์คดสูงสุด จากนั้นจึงทำการหาสัดส่วนแรงเฉือน (SR) และสัดส่วนโมเมนต์คด (MR) เนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุกไทยกับน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO ที่สัมพันธ์กับความยาวช่วงสะพาน เพื่อเป็นการเปรียบเทียบและนำไปปรับค่าน้ำหนักทางหลวงตามมาตรฐาน AASHTO สำหรับการวิเคราะห์ออกแบบสะพานภายในประเทศไทย จากผลการศึกษาสำหรับรูปแบบรถบรรทุกที่มีระยะห่างระหว่างเพลาน้อยที่สุด (Minimum Axle Distance) สัดส่วนแรงเฉือน (SR) สามารถแบ่งเป็น 4 ช่วง คือ (1) $SR=1.15$ เมื่อ $5 \leq L \leq 10$ (2) $SR=0.0110L+1.040$ เมื่อ $10 \leq L \leq 20$ (3) $SR=0.0260L+0.740$ เมื่อ $20 \leq L \leq 40$ และ (4) $SR=0.0055L+1.560$ เมื่อ $40 \leq L \leq 60$ สำหรับสัดส่วน

โมเมนต์คด (MR) สามารถแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ (1) $MR=1.29$ เมื่อ $5 \leq L \leq 20$ และ (2) $MR=0.0095L+1.100$ เมื่อ $20 \leq L \leq 60$ โดยสัดส่วนแรงเฉือนและสัดส่วนโมเมนต์คดสำหรับรูปแบบรถบรรทุกที่มีระยะห่างระหว่างเพลามากที่สุด (Maximum Axle Distance) จะน้อยกว่าประมาณ 5% ที่ความยาวช่วงสะพาน 60 เมตร อย่างไรก็ตามควรตรวจสอบสัดส่วนดังกล่าวอีกครั้งด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างอย่างละเอียดให้มากขึ้น รวมถึงควรศึกษาโดยใช้คันสะพานต่อเนื่องด้วย ซึ่งผลที่ได้สามารถนำมาเป็นข้อมูลในการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบสะพานในประเทศไทยในอนาคตได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] AASHTO. (2002). AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges. 17th. AASHTO. Washington DC.
- [2] ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลากินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 122 ตอนพิเศษ 150 ง. 28 ธันวาคม 2548. หน้า 19-25

- [3] กรมทางหลวง. หนังสืออนุญาตที่ คค0606/9704. 21 ธันวาคม 2550.
- [4] กรมทางหลวง. ประกาศกรมทางหลวงที่ คค0643/530. หลักเกณฑ์การขออนุญาตให้ใช้ยานพาหนะเดินบนทางหลวงพิเศษทางหลวงแผ่นดิน และทางหลวงสัมปทาน ตามประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษทางหลวงแผ่นดิน และทางหลวงสัมปทาน ลงวันที่ 22 ธันวาคม 2548. 30 กันยายน 2551.
- [5] ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2552. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 126 ตอนพิเศษ 92 ง. 30 มิถุนายน 2552. หน้า 2-7
- [6] ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2552. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 126 ตอนพิเศษ 174 ง. 30 พฤศจิกายน 2552. หน้า 116-117
- [7] จุฬารัตน์ สุริโย, มาริณี หมาดเสน, อนุพงศ์ คำเชื้อ, (2552). การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของสะพานช่วงเดียวแบบรองรับธรรมดาเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกไทย. ปรินธิยานพนธ์. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
- [8] ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงชนบท เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงชนบท ในเขตความรับผิดชอบของกรมทางหลวงชนบท. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 122 ตอนพิเศษ 151 ง. 29 ธันวาคม 2548. หน้า 9-13
- [9] 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.
- [10] Barker, R. M. and Puckett, J. A. (2005) Design of highway bridge : An LRFD approach. 2nd. John Wiley and Son, Inc.
- [11] สมบัติ ศรีธเนศและสมพร อรรถเศรษฐัง, การตรวจสอบความปลอดภัยของโครงสร้างส่วนบนโครงการคอนกรีตเมืองโกลด์เวย์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกไทย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5, 24-26 มีนาคม 2542.
- [12] กรรณิการ์ ริมดุสิตและสมโพธิ วิวิธเกตุวงศ์, การเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนของคานสะพานช่วงเดียวที่เกิดจากรถบรรทุกสี่ล้อและรถบรรทุกมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกา. การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 43, สาขาวิศวกรรมศาสตร์-สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2548.