



AN APPROACH OF BRIDGE STRENGTHENING FOR CAST-IN-SITU
REINFORCED CONCRETE SLABS LOADED BY THAI TRUCKS

The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage

แนวทางการเสริมกำลังสะพานแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่เพื่อรองรับรถบรรทุกไทย

AN APPROACH OF BRIDGE STRENGTHENING FOR CAST-IN-SITU
REINFORCED CONCRETE SLABS LOADED BY THAI TRUCKS

ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด¹ และสุนิติ สุภาพ²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)

107 ถนนรังสิต-นครนายก อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

²สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต (พัฒนาการ)

1761 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับน้ำหนักของสะพานช่วงเดียวคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่ซึ่งมีความยาวช่วงตั้งแต่ 5 ถึง 10 เมตร เนื่องจากรถบรรทุกไทยตามประกาศของกรมทางหลวงกับน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับการออกแบบสะพานที่กำหนดโดย American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) รวมถึงศึกษาแนวทางการเสริมกำลังดัดของหน้าตัดด้วยการเสริมแผ่นเหล็กและทำการประเมินมูลค่าการเสริมกำลัง จากการศึกษาพบว่าโมเมนต์ดัดประลัยสูงสุดเนื่องจากรถบรรทุกไทยมีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดที่ได้จาก HS20-44(Max.) โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 23 จากการศึกษายังพบอีกว่ามูลค่าการเสริมกำลังมีค่าเฉลี่ยประมาณ 2,755 บาท/ตร.ม. ซึ่งผลที่ได้สามารถนำมาเป็นข้อมูลอ้างอิงในจัดทำแผนการเสริมกำลังสะพานเพื่อให้สามารถรับน้ำหนักรถบรรทุกไทยได้โดยยังคงมีความปลอดภัยตามมาตรฐาน AASHTO

คำสำคัญ: รถบรรทุกไทย, สัดส่วนโมเมนต์ดัด, สะพานแผ่นพื้นคอนกรีต, การเสริมกำลังสะพาน

Abstract

This article comparatively studied the load-carrying behavior of simply supported cast-in-situ reinforced concrete slab bridges with the length ranging from 5–10 meters due to Thai truck loads and design live loads specified by the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) standard specifications. This article also investigated the strengthening approach by using steel plates. Thus, the appraisal of strengthening costs were obtained. The results showed that the maximum bending moments due to Thai trucks were approximately 23% greater than those from AASHTO loads. It was also revealed that the strengthening costs were around 2,755 Baht/sq.m. The results of this study would be a reference data for establishing a strengthening plan in order to restore the bridge safety level as recommended by AASHTO.

KEYWORDS: Thai Trucks, Moment Ratios, Concrete Slab Bridges, Bridge Strengthening

1. บทนำ

การออกแบบโครงสร้างสะพานในประเทศไทย นิยมใช้น้ำหนักบรรทุกจรอ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) [1] เรียกว่า HS20-44 ซึ่งประกอบด้วยน้ำหนักบรรทุก (HS20-44 (Truck)) และน้ำหนักบรรทุกแบบ Uniform Concentrated Load (HS20-44(UCL)) ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยจะใช้รูปแบบน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดหน่วยแรงบนสะพานมากกว่า อย่างไรก็ตามรถบรรทุกที่ใช้ในประเทศไทยในปัจจุบันเป็นไปตามที่ได้กำหนดไว้ในประกาศกรมทางหลวง ปี พ.ศ. 2548 [2] อีกทั้งยังมีประกาศฉบับอื่นๆ เพิ่มเติมอีกหลายฉบับ [3-7] ซึ่งรถบรรทุกตามประกาศดังกล่าวมีจำนวนรูปแบบและพิคัดน้ำหนักแตกต่างจากน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HS20-44 อย่างไรก็ตามมาตรฐาน AASHTO อนุญาตให้ปรับค่าน้ำหนักทางหลวงตามสัดส่วนได้ หากน้ำหนักยานพาหนะมีค่าแตกต่างจากที่กำหนด [1]

การศึกษาผลกระทบการออกแบบสะพานเนื่องจากความแตกต่างของรูปแบบและน้ำหนักของรถบรรทุกจริงกับน้ำหนักบรรทุกจรตามมาตรฐาน AASHTO พบว่าในบางช่วงของความยาวสะพานหรือในบางประเภทของรถบรรทุก หน่วยแรงที่คำนวณได้จากน้ำหนักบรรทุกจรตามมาตรฐาน AASHTO ให้ค่าที่ไม่มีความปลอดภัย [8] ซึ่งควรมีการปรับปรุงเพื่อให้สอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกจริงแต่ละพื้นที่ สำหรับประเทศไทย สมบัติและสมพร [9] ได้ศึกษาผลกระทบดังกล่าว โดยได้ตรวจสอบความปลอดภัยของคานสะพานช่วงเดียว (ความยาวช่วงสะพานสูงสุด 37.16 เมตร) เนื่องจากรถบรรทุกไทยวิ่งเป็นขบวนจำนวน 7 ลักษณะตามประกาศของกรมทางหลวงและนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับ HS20-44 ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าหน่วยแรงในคานสะพานเนื่องจากรถถังพ่วงหนัก 38 ตัน และ รถพ่วงหนัก 35 ตัน มีค่ามากกว่าผลการคำนวณจาก HS20-44 สูงสุดถึงร้อยละ 26 และ ร้อยละ 23 ตามลำดับ ในขณะที่กรณีการและสมพร [10] ได้ทำการเปรียบเทียบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานสะพานช่วงเดียว (ความยาวช่วงสะพานสูงสุด 38 เมตร) เนื่องจากรถสิบล้อไทยมีจำนวนอยู่ในประเทศไทยและบรรทุกน้ำหนักเกินจาก 21 ตันไปเป็น 26, 28 และ 35 ตัน ตามลำดับ เปรียบเทียบกับ HS20-44 ผลการวิเคราะห์พบว่าสำหรับคานช่วงสั้นที่มีความยาวช่วงไม่เกิน 15 เมตร การออกแบบสะพานโดยใช้ HS20-44 สามารถใช้แทนรถสิบล้อไทยขนาด 21 ตัน ได้อย่างปลอดภัย ในขณะที่ความยาวช่วงที่มีค่าเกิน 15 เมตร เป็นต้นไป ค่าหน่วยแรงสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ HS20-44 จะมีค่ามากกว่าถึง ร้อยละ 94.69 สำหรับที่ความยาวช่วง 38 เมตรและหากทำการเพิ่มน้ำหนักของรถสิบล้อไทยให้เป็น 28 และ 35 ตัน จะสร้างหน่วยแรงส่วนเกินเมื่อเปรียบเทียบกับ HS20-44 ที่ความยาวสูงสุดคือ 38 เมตร ถึงร้อยละ 170.64 และร้อยละ 238.30 ตามลำดับ

ต่อมาสุนิติและภาณุวัฒน์ [11-13] ได้เปรียบเทียบแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในคานสะพานช่วงเดียวที่มีความยาวช่วงตั้งแต่ 5-60 เมตร และสะพานต่อเนื่อง 3 ช่วงที่มีความยาวช่วงเท่ากันและไม่เท่ากันที่มีความยาวสะพานรวมตั้งแต่ 90 เมตร ถึง 180 เมตร เนื่องจากรถบรรทุกไทยตามประกาศของกรมทางหลวงตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548-2552 และน้ำหนักบรรทุกจร HS20-44 พบว่าแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดในแต่ละความยาวช่วงสะพานเกิดจากรถบรรทุกแบบต่างชนิดกันและไม่จำเป็นต้องเกิดจากรถบรรทุกที่มีน้ำหนักบรรทุกรวมมากที่สุด ผลการวิเคราะห์โครงสร้างดังกล่าวได้เสนอให้นำสัดส่วนแรงเฉือนและสัดส่วนโมเมนต์ดัดที่สัมพันธ์กับความยาวช่วงสะพานไปปรับเพิ่มค่ากับน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HS20-44 เพื่อให้สอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกบรรทุกไทย

ผลการศึกษาของงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดได้แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองของสะพานเนื่องจากรถบรรทุกไทยในปัจจุบันมีค่ามากกว่าผลตอบสนองที่ได้จากน้ำหนักบรรทุกออกแบบเดิมคือ HS20-44 ดังนั้น การเสริมกำลังสะพานจึงมีความจำเป็นเพื่อให้สะพานมีอัตราส่วนปลอดภัย (Safety Factors) เทียบเท่ากับที่มาตรฐานการออกแบบได้กำหนดไว้ ทั้งนี้ การเสริมกำลังสะพานสามารถทำได้ทั้งการเสริมแผ่นเหล็ก [14] หรือการใช้วัสดุเสริมเส้นใยประเภท CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) [15] ในปัจจุบัน ได้มีการนำ CFRP มาใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวัสดุที่เบา มีกำลังสูง ทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง อย่างไรก็ตาม วัสดุนี้มีราคาแพงและไม่สามารถเพิ่มสติฟเนสของโครงสร้างได้มากนัก ทำให้ประสิทธิภาพของสะพานที่สภาวะการใช้งานลดลง การเสริมกำลังสะพานจึงต้องใช้ CFRP ร่วมกับการเสริมแผ่นเหล็ก ซึ่งก็ยังคงมีค่าใช้จ่ายสูงอยู่เมื่อเทียบกับการสร้างสะพานใหม่ ในทางกลับกัน หากพิจารณาการเสริมกำลังโดยใช้แผ่นเหล็กอย่างเดียว ถึงแม้ว่าการติดตั้งจะยากกว่า แต่ค่าใช้จ่ายโดยรวมจะถูกกว่ามาก

ดังนั้นบทความนี้จึงได้ทำการศึกษานำแนวทางการเสริมกำลังดัดของสะพานช่วงเดียวเพื่อรองรับรถบรรทุกไทยตามประกาศกรมทางหลวง โดยเน้นไปที่สะพานประเภทแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่เนื่องจากเป็นรูปแบบที่พบเห็นมากในประเทศไทย สะพานมีความยาวช่วงตั้งแต่ 5 ถึง 10 เมตร ตามแบบมาตรฐานกรมทางหลวง [16] ในการศึกษาจะพิจารณาผล

ตอบสนองของสะพานเฉพาะโมเมนต์ดัดเท่านั้น โดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาผลเนื่องจากการเฉือนซึ่งเป็นไปตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน AASHTO [1] และได้ดำเนินการเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดของสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกไทยกับ HS20-44 รวมถึงเสนอแนวทางการเสริมกำลังดัดของสะพานโดยใช้แผ่นเหล็กเพื่อให้สะพานมีอัตราส่วนปลอดภัยเทียบเท่าตามมาตรฐานการออกแบบ พร้อมทั้งประมาณราคาในการเสริมกำลังเพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินการในภาพรวมของประเทศต่อไป

2. รูปแบบและน้ำหนักบรรทุกไทย

ปี พ.ศ. 2548 กรมทางหลวงได้กำหนดรูปแบบและน้ำหนักบรรทุกรถบรรทุกตามประกาศกรมทางหลวง [2] ประกาศฉบับนี้ระบุให้มียานพาหนะซึ่งประกอบด้วยยานพาหนะชนิดรถเดี่ยว (Single Unit) ยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถกึ่งพ่วง (Semi-Trailer) และยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (Full Trailer) ดังรูปที่ 1 ต่อมา กรมทางหลวงได้ออกประกาศแก้ไขเพิ่มเติมอีกหลายฉบับ [3–7] ซึ่งหากจะพิจารณารูปแบบรถบรรทุกตามประกาศทั้งหมดของกรมทางหลวง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548–2552 ข้างต้น สามารถสรุปเป็นรูปแบบรถบรรทุก น้ำหนักของเพลา ระยะห่างระหว่างเพลาและน้ำหนักกรวม โดยมีรูปแบบรถบรรทุกแบบ ยานพาหนะชนิดรถเดี่ยว (Single Unit) 4 ประเภท แบบยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถกึ่งพ่วง (Semi-Trailer) 26 ประเภท และแบบยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (Full-Trailer) 14 ประเภท [17]

อนึ่ง กรมทางหลวงชนบทซึ่งเป็นอีกหน่วยงานหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับงานทางภายในประเทศ ได้กำหนดยานพาหนะที่สามารถเดินบนถนนในเขตความรับผิดชอบของกรมทางหลวงชนบทเองเช่นเดียวกัน โดยออกประกาศกรมทางหลวงชนบท [18] ซึ่งในประกาศฉบับนี้มีรายละเอียดน้ำหนักและรูปแบบรถบรรทุกคล้ายกับประกาศของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2548 [2]

3. วิธีการศึกษา

3.1 การจำลองโครงสร้างและการจัดวางน้ำหนักบรรทุกไทย

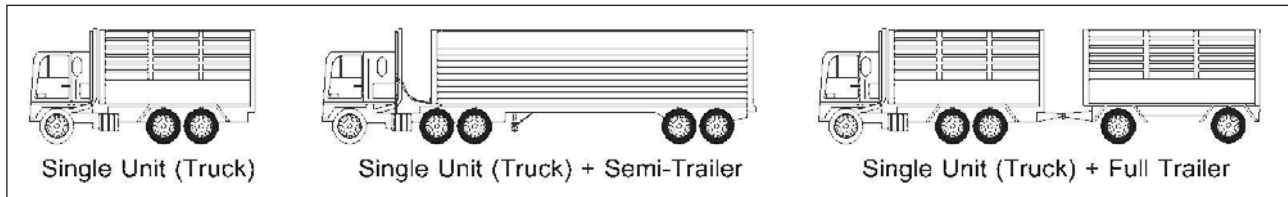
สะพานที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นแบบคานช่วงเดียวธรรมดา (Simply Supported Beam) มีความยาวช่วงตั้งแต่ 5 ถึง 10 เมตร (เพิ่มทีละ 1 เมตร)

การจัดวางน้ำหนักบรรทุกจรถ ได้ให้รถบรรทุกเพียงคันเดียวและรถบรรทุกหลายคันเคลื่อนที่เป็นขบวนในแต่ละช่องจราจร ซึ่งกำหนดให้รถบรรทุกทุกประเภทมีระยะห่างระหว่างเพลาหลังของรถคันหน้าถึงเพลาหน้าของคันที่ตามมามีระยะเท่ากับ 9.14 เมตร (30 ฟุต) [1 : Appendix B] รถบรรทุกจะถูกจัดวางเป็นขบวนในลักษณะวิ่งไปในทิศทางและในช่องจราจรเดียวกัน โดยมีจำนวนรถบรรทุกเคลื่อนที่เต็มช่วงความยาวสะพาน และจัดให้รถบรรทุกที่มีน้ำหนักขนาดร้อยละ 75 วางสลับกันในขบวน ดังแสดงในรูปที่ 2

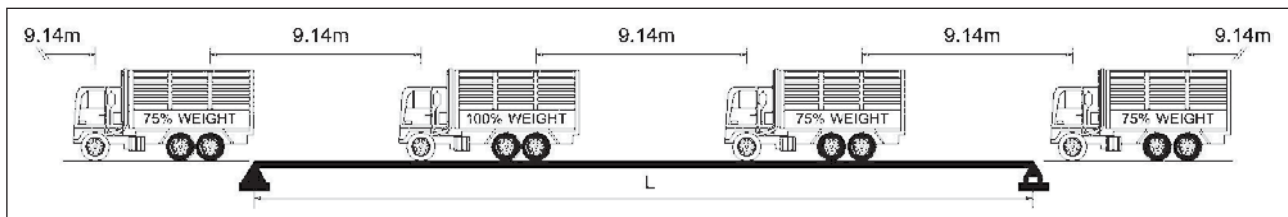
การวิเคราะห์โครงสร้างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่จะอาศัยหลักการของเส้นอิทธิพล (Influence Line) โดยได้นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาเป็นเครื่องมือช่วยในการคำนวณ และได้รับผลของแรงกระแทก (Dynamic Impact Effect; $IM = 15.24/(L+38)$) โดย L ความยาวช่วงสะพานมีหน่วยเป็นเมตร [1]) ซึ่งเป็นตัวคูณเพิ่มค่าเข้าไปในน้ำหนักบรรทุกจรถ ทั้งนี้ตัวคูณเพิ่มค่าดังกล่าวต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 30

3.2 รถบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง

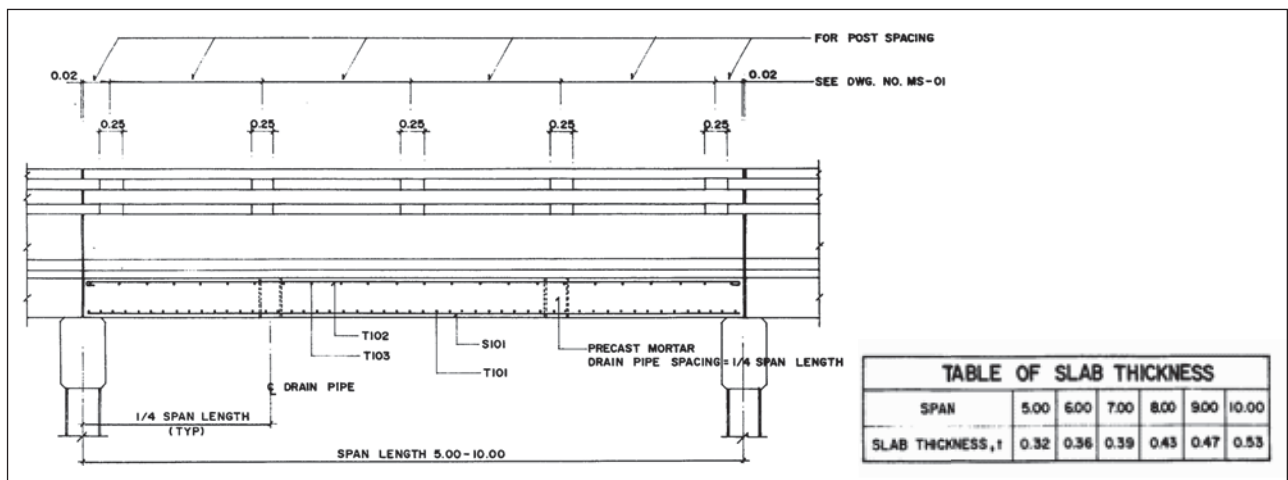
ในการศึกษา ได้ทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรถ HS20-44 (แสดงในตารางที่ 1) ตามมาตรฐาน AASHTO [1] เพื่อนำผลมาใช้ในการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากน้ำหนักบรรทุกไทย ซึ่งรูปแบบและน้ำหนักบรรทุกไทยนั้นได้ใช้ตามประกาศกรมทางหลวงตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2548 ถึง พ.ศ. 2556 [2–7] โดยจะเลือกใช้รถบรรทุกบางรูปแบบที่มีผลต่อแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง เกณฑ์ที่ใช้ในการเลือกรถบรรทุกจะคำนึงถึง 3 ปัจจัยด้วยกัน คือ (1) น้ำหนักบรรทุก กล่าวคือหากรถบรรทุกประเภทเดียวกันนั้นมีความยาวช่วงรถหรือมีระยะห่างระหว่างเพลาเท่ากันแล้วรถบรรทุกที่มีน้ำหนักมากกว่าก็จะทำให้เกิดแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงกว่า (2) ระยะห่างระหว่างเพลา กล่าวคือหากรถบรรทุกมีระยะห่างระหว่างเพลาไม่น้อยเมื่อแล่นต่อกันบนสะพานจะทำให้มีน้ำหนักมากกว่าบนสะพานมากกว่าขบวนรถบรรทุกที่มีระยะห่างระหว่างเพลามากกว่า และ (3) ไม่พิจารณารูปแบบรถบรรทุกที่จะยกเลิกก่อนวันที่ 31 ธันวาคม 2556



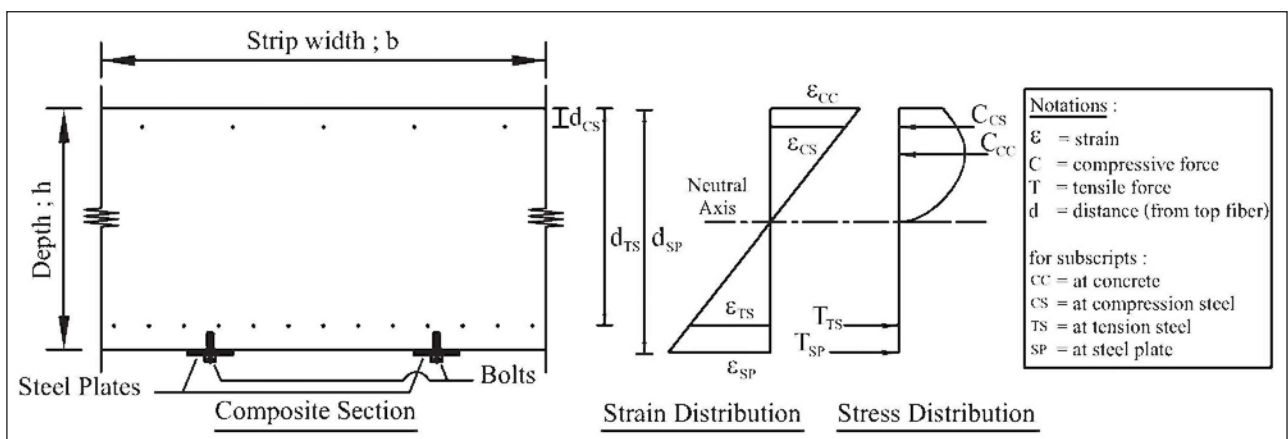
รูปที่ 1 รูปแบบยานพาหนะที่กำหนดไว้ในประกาศกรมทางหลวง ปี พ.ศ. 2548 [1]



รูปที่ 2 คานสะพานและรูปแบบการวางน้ำหนักบรรทุกเป็นขบวน (Truck Train Loading)



รูปที่ 3 สะพานคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ตามแบบมาตรฐานกรมทางหลวง [16]



รูปที่ 4 การวิเคราะห์กำลังดัดระบุ (Flexural Nominal Strength; M_n) ของหน้าตัดผสม

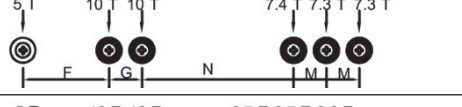
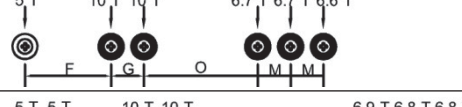
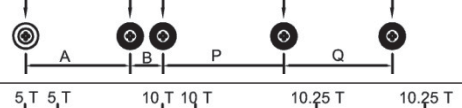
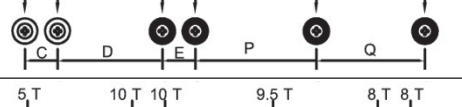
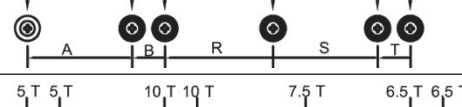
จากที่กล่าวมาข้างต้น จะได้รับบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยมีรูปแบบและน้ำหนักบรรทุกแบบ AASHTO (Truck และ UCL) 2 ประเภท รถบรรทุกไทยแบบยานพาหนะชนิดรถเดี่ยว (Single Unit) 2 ประเภท รถบรรทุกไทยแบบยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถกึ่งพ่วง (Semi-Trailer) 9 ประเภท และรถบรรทุกไทยแบบยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (Full-Trailer) 4 ประเภท เท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 1 อย่างไรก็ตามในประกาศของกรมทางหลวงไม่ได้กำหนดระยะห่างระหว่างเพลาของรถบรรทุกหรือระยะห่างระหว่างเพลาของตัวรถลากจูงกับเพลาของตัวรถพ่วง จึงกำหนดระยะห่างระหว่างเพลาของรถบรรทุกชนิดต่างๆ ซึ่งได้จากการรวบรวมข้อมูลรถบรรทุกที่มีใช้และผลิตในประเทศ [11]

3.3 การวิเคราะห์กำลังดัดของหน้าตัดสะพาน

ในการศึกษาได้วิเคราะห์กำลังดัดของหน้าตัดสะพานประเภทคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ตามแบบมาตรฐานของกรมทางหลวง [16] ดังแสดงในรูปที่ 3 ทั้งนี้การวิเคราะห์กำลังดัดระบุ (Flexural Nominal Strength; M_n) ของหน้าตัดผสมได้ใช้หลักการความเครียดสอดคล้อง (Strain Compatibility) และการสมดุลแรง โดยกำหนดให้การกระจายตัวของหน่วยแรงอัดของคอนกรีตมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น (Nonlinear Stress Distribution) ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยค่า M_n ที่ได้เป็นกำลังดัดระบุของหน้าตัดผสมต่อแถบ (Strip) ที่มีความกว้างตามการกระจายแรงต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง โดยได้ใช้ตัวคูณกระจาย (Distribution Factors) [1] อีกทั้ง เพื่อให้การประเมิน M_n ให้เป็นไปในเชิงอนุรักษ์ (Conservative) จึงใช้ตัวคูณลดค่า (Reduction Factor) โดยคำนึงถึง 2 ปัจจัยได้แก่ ตัวคูณลดค่าตามมาตรฐานการออกแบบสำหรับการดัด ($\phi_{nf}=0.90$) และตัวคูณลดค่าเนื่องจากความเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานที่มีสภาพพอใช้งาน ($\phi_c=0.95$) [19] อนึ่ง การศึกษานี้ได้ตรวจสอบการแอ่นตัวของสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรรวมแรงกระทำซึ่งต้องมีค่าไม่เกิน $1/800$ เท่าของความยาวช่วงสะพาน [1] สำหรับสะพานช่วงเดียวทั่วไป

ตารางที่ 1 รูปแบบและน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์

รูปแบบรถ (น้ำหนักรวม : ตัน)	น้ำหนักต่อเพลาน้ำหนักต่อ
--------------------------------	--

รูปแบบรถ (น้ำหนักรวม : ตัน)	น้ำหนักต่อเพลลา (ตัน)	มาตรฐาน/ประกาศ กรมทางหลวง	หมายเหตุ																																																
Semi50 (50)		ปทล.(2548) หมวด 2 ข้อ 19(4)	<table><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>	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
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																																																	
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	3. ความกว้างเพลลาของรถบรรทุกชนิดต่างๆ เท่ากับ 1800 mm																																																
Full47 (47)		ปทล.(2548) หมวด 2 ข้อ 20(2)	4. ความกว้างน้ำหนักบรรทุกคงที่ของ HS20-44(UCL) เท่ากับ 3000 mm																																																
Full50.5(3) (50.5)		ปทล.(2552) ข้อ 20/3	5. ปทล.คือ ประกาศฯ กรมทางหลวง , L คือ ความยาวช่วงสะพาน																																																
Full50.5(1) (50.5)		ปทล.(2552) ข้อ 20/1																																																	
Full50.5(2) (50.5)		ปทล.(2552) ข้อ 20/2																																																	

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดและกำลังดัดของหน้าตัดสะพาน

ความยาวช่วง, L (m)		5	6	7	8	9	10
น้ำหนักบรรทุกคงที่ (QD)							
ตัวค้ำน้ำหนักบรรทุกคงที่		1.3*1.0	1.3*1.0	1.3*1.0	1.3*1.0	1.3*1.0	1.3*1.0
โมเมนต์ดัดที่สภาวะใช้งาน; $M_{ser,DL}$	(kN-m)	27.13	43.31	63.27	90.18	123.66	170.33
โมเมนต์ดัดที่สภาวะประลัย; $M_{ult,DL}$	(kN-m)	35.27	56.30	82.26	117.23	160.76	221.43
น้ำหนักบรรทุกจร (QL)							
ตัวคูณการกระจาย ($1/\text{Min}\{1.12+0.06*L, 2.13\}$)		0.66	0.63	0.61	0.59	0.57	0.55
ตัวคูณกระแทก, $IM = \text{Max}\{1 + 15.24/(L + 38), 1.30\}$		1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
ตัวค้ำน้ำหนักบรรทุกจร		1.3*1.67	1.3*1.67	1.3*1.67	1.3*1.67	1.3*1.67	1.3*1.67
โมเมนต์ดัดที่สภาวะใช้งาน	HS20-44 (kN-m)	77.55	89.52	100.62	118.42	139.30	159.57
	รถบรรทุกไทย (kN-m)	89.16	111.51	132.22	151.46	169.39	186.15
โมเมนต์ดัดที่สภาวะประลัย	HS20-44 (kN-m)	168.36	194.35	218.45	257.09	302.42	346.43
	รถบรรทุกไทย (kN-m)	193.57	242.08	287.04	328.82	367.76	404.12
สัดส่วนโมเมนต์ดัดของน้ำหนักบรรทุกจร							
สัดส่วนโมเมนต์ดัด (รถบรรทุกไทย / HS20-44)		1.15	1.25	1.31	1.28	1.22	1.17
การรวมน้ำหนักบรรทุก (QD + QL)							
โมเมนต์ดัดที่สภาวะใช้งานต่อ หนึ่งหน่วยความกว้าง	HS20-44 (kN-m)	104.68	132.83	163.90	208.60	262.96	329.90
	รถบรรทุกไทย (kN-m)	116.30	154.82	195.49	241.64	293.06	356.47
โมเมนต์ดัดที่สภาวะประลัยต่อ หนึ่งหน่วยความกว้าง	HS20-44 (kN-m)	203.63	250.66	300.70	374.32	463.18	567.85
	รถบรรทุกไทย (kN-m)	228.84	298.38	369.30	446.05	528.52	625.55
กำลังดัดของหน้าตัด (R)							
ความลึก (mm)		320	360	390	430	470	530
เหล็กเสริมรับแรงดึงเดิม (mm^2)		2945	2945	3043	3927	4909	5400
เหล็กเสริมรับแรงอัดเดิม (mm^2)		191	191	191	191	191	191
จำนวนแผ่นเหล็กเสริมความแข็งแรง (#-mm x mm)		2-60 x 10	2-60 x 10	3-60 x 10	2-60 x 10	2-60 x 10	1-60 x 10
จำนวนสลักเกลียว (#-Mφmm)		14-M12	16-M12	19-M12	21-M12	24-M12	26-M12
โมเมนต์ดัดออกแบบรวม ($\phi_c \phi_{tr} M_n$) ต่อความกว้าง 1 เมตร (kN-m)		265.50	314.12	391.92	465.97	594.57	688.38
การแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร (mm)		5.5	7.1	8.4	10.0	10.5	10.8
ขีดจำกัดการแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร (L/800) (mm)		6.3	7.5	8.8	10.0	11.3	12.5
การประมาณราคาเสริมกำลัง (Baht/m ²)		2,805	2,722	4,166	2,718	2,761	1,358

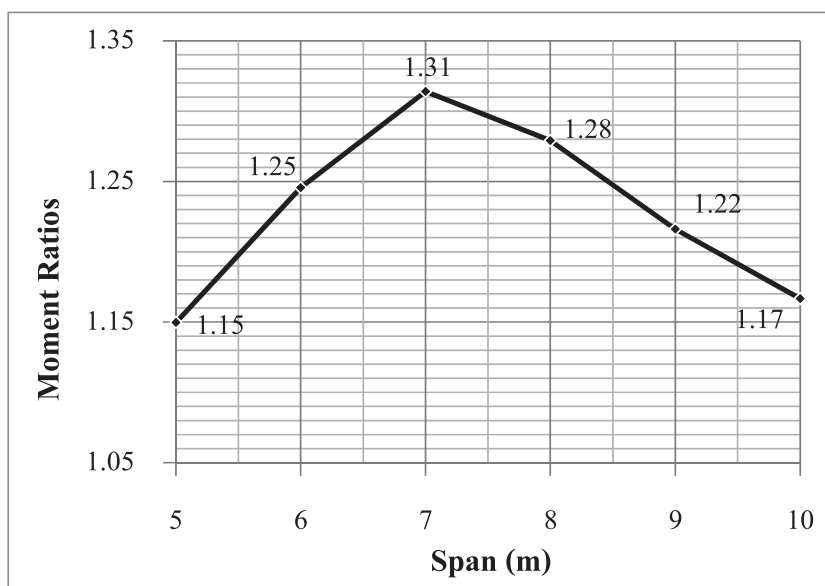
หมายเหตุ: 1. ϕ_c และ ϕ_{tr} คือ ตัวคูณลดกำลังเนื่องจากสภาพของโครงสร้าง (0.95) และ ตัวคูณลดค่าโมเมนต์ดัด (0.90) ตามลำดับ [19]
2. การประมาณราคาเสริมกำลังเป็นราคา ณ เดือน กันยายน 2556

4. ผลการศึกษา

4.1 โมเมนต์ดัดสูงสุด

จากการวิเคราะห์คานสะพานช่วงเดียวธรรมดาเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HS20-44 และน้ำหนักบรรทุกไทยตามตารางที่ 1 พบว่าโมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดที่บริเวณใกล้เคียงกับกึ่งกลางคานและมีค่ามากขึ้นเมื่อความยาวช่วงคานมากขึ้น โมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดจากรถลากจูงและรถกึ่งพ่วง (Semi-Trailer) แบบ Semi50.5(1) ที่ทุก ๆ ความยาวช่วง ผลการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร (QL) แสดงในตารางที่ 2

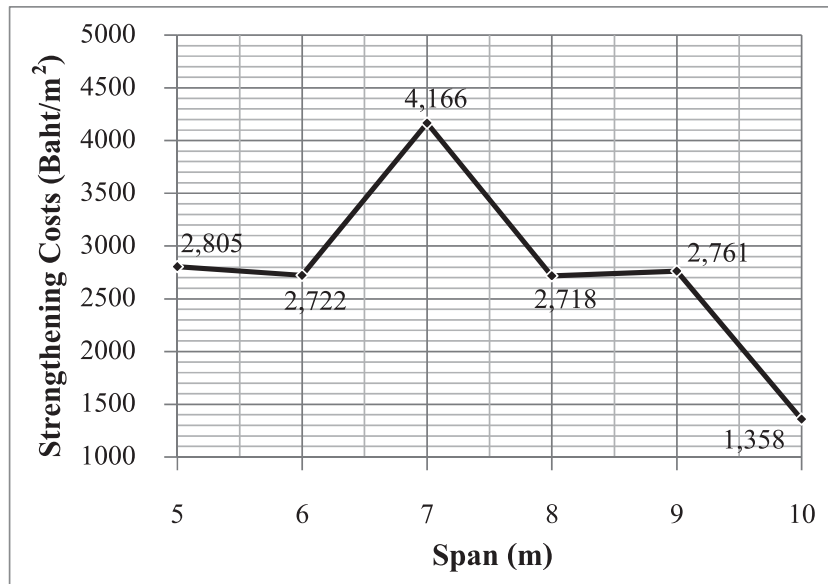
จากนั้นได้หาอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จากรถบรรทุกไทยกับที่ได้จาก HS20-44(Max.) จะได้สัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุด แล้วจึงนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดกับความยาวช่วงสะพาน ดังรูปที่ 5 พบว่าสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดแปรผันอยู่ระหว่าง 1.15 ถึง 1.31 และมีค่าสูงสุดที่ความยาวช่วงสะพาน 7 เมตร จะเห็นว่าในแต่ละความยาวช่วงสะพานสัดส่วนดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1.00 แสดงว่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากน้ำหนักบรรทุกไทยมากกว่าที่ได้จาก HS20-44(Max.) ซึ่งโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 23 สำหรับสะพานที่มีความยาวช่วง 5 ถึง 10 เมตร



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดกับความยาวช่วงสะพาน

4.2 การเสริมกำลังสะพาน

จากขนาดหน้าตัดและเหล็กเสริมเดิมที่มีอยู่ตามแบบมาตรฐานกรมทางหลวง สามารถหาขนาดและจำนวนแผ่นเหล็กเสริม รวมถึงจำนวนสลักเกลียวที่ต้องติดตั้งในหน้าตัดเดิมของสะพาน เพื่อให้มีกำลังดัดออกแบบ (Design Moment) มากกว่าโมเมนต์ดัดประลัยสูงสุดที่ได้จากการรมน้ำหนักบรรทุกที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกไทย ดังแสดงในตารางที่ 2 อีกทั้งยังต้องตรวจสอบการแอ่นตัวของสะพานโดยไม่ให้เกิน $1/800$ ของความยาวช่วงสะพาน [1] อีกด้วย จากนั้น จึงทำการประเมินราคาค่าวัสดุและค่าติดตั้ง ซึ่งจะได้เป็นราคาค่าเสริมกำลังต่อตารางเมตรของแต่ละความยาวช่วงสะพาน ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยราคาดังกล่าวเป็นราคา ณ เดือนกันยายน 2556 จากผลการศึกษาจะเห็นว่าที่ความยาวช่วง 7 เมตร ใช้จำนวนแผ่นเหล็กเสริมมากที่สุด จึงส่งผลให้ราคาค่าเสริมกำลังสูงตามไปด้วย โดยราคาค่าเสริมกำลังเท่ากับ 4,166 บาท/ตร.ม. อย่างไรก็ตาม ราคาค่าเสริมกำลังสะพานอยู่ในช่วงระหว่าง 1,358 ถึง 4,166 บาท/ตร.ม. โดยมีราคาเฉลี่ยประมาณ 2,755 บาท/ตร.ม. ซึ่งราคาค่าก่อสร้างสะพานใหม่ในทางปฏิบัติทั่วไปมีราคาเฉลี่ยประมาณ 8,000 บาท/ตร.ม. จะเห็นว่าราคาค่าเสริมกำลังมีค่าประมาณร้อยละ 34 ของราคาค่าก่อสร้างสะพานใหม่



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการประมาณราคาเสริมกำลังกับความยาวช่วงสะพาน

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

บทความนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของสะพานช่วงเดียวแบบคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่เนื่องจากรถบรรทุกไทยตามประกาศฯ ของกรมทางหลวง [2-7] เปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุกจร HS20-44 ตามมาตรฐาน AASHTO โดยสะพานมีความยาวช่วงตั้งแต่ 5 ถึง 10 เมตร และได้ศึกษาแนวทางการเสริมกำลังดัดของหน้าตัดด้วยการเสริมแผ่นเหล็ก รวมทั้งทำการประเมินราคาเสริมกำลัง จากการศึกษพบว่าโมเมนต์ดัดประลัยสูงสุดเกิดจากรถลากจูงและรถกึ่งพ่วง (Semi-Trailer) แบบ Semi50.5(1) สัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดแปรผันอยู่ระหว่าง 1.15 ถึง 1.31 ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดเนื่องจากรถบรรทุกไทยมีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดที่ได้จาก HS20-44(Max.) โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 23 จากการศึกษาข้างพบอีกว่า ราคาเสริมกำลังอยู่ระหว่าง 1,358 ถึง 4,166 บาท/ตร.ม. โดยมีราคาเสริมกำลังเฉลี่ยประมาณ 2,755 บาท/ตร.ม. ซึ่งราคาเสริมกำลังที่ความยาวช่วง 7 เมตรมีค่าสูงที่สุดประมาณ 4,166 บาท/ตร.ม. ผลการศึกษาที่ได้สามารถนำมาเป็นข้อมูลในจัดทำแผนการปรับปรุงสะพานเพื่อให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกไทยได้โดยยังคงมีอัตราส่วนปลอดภัยตามมาตรฐาน AASHTO

เอกสารอ้างอิง

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges, 17th Edition, AASHTO, Washington DC., 2002.
- [2] กรมทางหลวง (2548). ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน. ราชกิจจานุเบกษา, เล่มที่ 122 ตอนพิเศษ 150ง, 19-25.
- [3] กรมทางหลวง (2552). ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2552. ราชกิจจานุเบกษา, เล่มที่ 126 ตอนพิเศษ 92ง, 2-7.
- [4] กรมทางหลวง (2552). ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2552. ราชกิจจานุเบกษา, เล่มที่ 126 ตอนพิเศษ 174ง, 116-117.
- [5] กรมทางหลวง (2554). ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบน

- ทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน (ฉบับที่ 4) พ.ศ. 2554. *ราชกิจจานุเบกษา*, เล่มที่ 128 ตอนพิเศษ 161ง, 9-10.
- [6] กรมทางหลวง (2555). ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน (ฉบับที่ 5) พ.ศ. 2555. *ราชกิจจานุเบกษา*, เล่มที่ 129 ตอนพิเศษ 197ง, 52-53.
- [7] กรมทางหลวง (2556). ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน (ฉบับที่ 6) พ.ศ. 2556. *ราชกิจจานุเบกษา*, เล่มที่ 130 ตอนพิเศษ 8ง, 6-7.
- [8] 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, 9-16.
- [9] สมบัติ ศรีเนศ และ สมพร อรรถเสริมวงศ์. การตรวจสอบความปลอดภัยของโครงสร้างส่วนบนโครงการดอนเมืองโทลล์เวย์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกไทย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5, ชลบุรี, 2542, หน้า STR-56-STR62.
- [10] กรรณิการ์ ริมดูลิต และ สมโพธิ์ วิวิธยุทธวงศ์. การเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนของคานสะพานช่วงเดียวที่เกิดจากรถบรรทุกสิบล้อและรถบรรทุกมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกา. การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 43, สาขาวิศวกรรมศาสตร์-สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2548, หน้า 60-67.
- [11] สุนิติ สุภาพ และ ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด (2554). การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของสะพานช่วงเดียวแบบรองรับธรรมดาเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกไทย. *วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต*, ปีที่ 1, ฉบับที่ 1 (มกราคม-มิถุนายน), 33-48.
- [12] สุนิติ สุภาพ และ ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด (2554). การเปรียบเทียบแรงภายในของสะพานช่วงเดียวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกไทยกับน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO. *วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา*, ปีที่ 22, ฉบับที่ 1, 25-35.
- [13] สุนิติ สุภาพ และ ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด (2554). การเปรียบเทียบผลตอบสนองสูงสุดของสะพานต่อเนื่อง 3 ช่วงเนื่องจากบรรทุกไทยและน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO. *วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา มจร*, ปีที่ 34, ฉบับที่ 3, 317-334.
- [14] Hussain, M. et al. (1995). Flexural behavior of precracked reinforced concrete beams strengthened externally by steel plates. *ACI Structural J.*, Vol.92, No. 1, 14-23.
- [15] Pimanmas, A. and Pornpongsaroj, P. (2004). Peeling behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP plates under various end restraint conditions. *Magazine of Concrete Research*, Vol.56, No.2, 56-81.
- [16] Department of Highways. (1994) Standard Drawing for Highways Constructions.
- [17] จุฬารัตน์ สุริโย, มาริณี หมดเสน และ อนุพงศ์ ดำเชื้อ. การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของสะพานช่วงเดียวแบบรองรับธรรมดาเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกไทย. *ปริญญานิพนธ์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต*, 2552.
- [18] กรมทางหลวงชนบท (2548). ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงชนบท เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงชนบท ในเขตความรับผิดชอบของกรมทางหลวงชนบท. *ราชกิจจานุเบกษา*, เล่มที่ 122, ตอนพิเศษ 151ง, 9-13.
- [19] American Association of State Highway and Transportation Officials. Manual for Condition Evaluation and Load and Resistance Factor Rating (LRFR) of Highway Bridges, AASHTO, Washington DC., 2003.