การเปรียบเทียบพฤติกรรมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสะพานคอนกรีตอัดแรง เมื่อรับน้ำหนักของรถบรรทุกไทยตามข้อกำหนดใหม่ของกรมทางหลวง และรถบรรทุกตามมาตรฐานของสมาคมทางและการขนส่งสหรัฐอเมริกา (AASHTO-HL93)

Comparison of stresses analyses on the prestressed concrete bridge subjected to Thai trucks according to the Department of Highway's Regulation and the AASHTO standard truck

อัฏฐวิทย์ สุจริตพงศ์[1,*] วรียส ถิรดุลย์กุล[2,*] และ ภูมิเกียรติ สว่างวงศ์[3]

[1,2]

[3]

Corresponding author; E mail address asujaritpong@yahoo.com, wareeyot.t@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอความแตกต่างของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสะพานคอนกรีตอัดแรง เมื่อรับน้ำหนักของรถบรรทุกไทยที่ประกาศใช้ใหม่ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง และรถบรรทุกตามมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกา เนื่องจากปัจจุบันประเทศไทยมีการกำหนดให้ใช้น้ำหนักบรรทุกที่หลากหลายตามประกาศใหม่ของกรมทางหลวงสำหรับการออกแบบสะพาน ส่วนการออกแบบสะพานแบบดั้งเดิมจะอ้างอิงจากมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกากันอย่างแพร่หลาย โดยนำเอาน้ำหนักรถบรรทุกและค่าตัวคูณกำลัง รวมทั้งวิธีการออกแบบมาใช้งาน ทั้งนี้การศึกษาจะใช้วิธีการจำลองโครงสร้างสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบต่อเนื่องสามช่วงสะพาน ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์รับน้ำหนักรถบรรทุกไทยตามประกาศของกรมทางหลวงที่ประกาศใช้ใหม่และน้ำหนักรถบรรทุกตามมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกา โดยกำหนดให้น้ำหนักกระทำบนสะพานที่มีความยาวช่วงเท่ากับ 35 เมตร จำนวน 3 ช่วง ความยาวสะพานรวมทั้งหมดเท่ากับ 105 เมตร พร้อมเปรียบเทียบพฤติกรรมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสะพานคอนกรีตอัดแรงกับค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ เพื่อศึกษาความเหมาะสมของการกำหนดน้ำหนักรถบรรทุกและการนำมาปรับใช้สำหรับการออกแบบสะพานในประเทศไทย

คำสำคัญ: โครงสร้างสะพาน, คอนกรีตอัดแรง, น้ำหนักรถบรรทุกมาตรฐานกรมทางหลวง, น้ำหนักบรรทุกมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกา

Abstract

This paper presents a comparison of stresses on the prestressed concrete bridge subjected to truck loads according to new regulations announced by the department of highway and the AASHTO standard truck. In these regulations, various types of truck loads were allowed to use in bridge design while the AASHTO standard truck loads were widely used for the existing bridges. The three-span of prestressed concrete bridges were simulated and analyzed by the finite element method. These models were subjected to the loads according to new regulations announced by the department of highway and AASHTO standard truck. The bridge models have spans of 35 meters and the total length is 105 meters. The analyses were carried out to determine the stresses induced in the cross-section of a prestressed concrete bridge and then compared to the allowable stresses. The conclusions were made for each type of truck loads which can affect the serviceability of the bridge.

Keywords: Structural bridge, Prestressed concrete, Truck load according to the Department of Highway, AASHTO standard truck loads

1. บทนำ

ในอดีตทีผ่านมากรมทางหลวงได้มีประกาศ เรื่อง การกำหนดพิกัดน้ำหนักของรถบรรทุกสิบล้อ ตั้งแต่ก่อนปี พ.ศ. 2519 จนถึงปี พ.ศ. 2548 นั้น ต่อมารถบรรทุกในประเทศไทยได้มีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้นจึงได้มีประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดิน และผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน ฉบับที่ 1 ถึง 8 ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 ถึง 2558 [1-8] เรื่องห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนด หรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายจากการสัญจรบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดิน และทางหลวงสัมปทาน ซึ่งมีผลบังคับใช้กับรถกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ล้อ และกำหนดพิกัด

น้ำหนักของรถพ่วง 7 เพลา 24 ล้อ แต่เนื่องจากสะพานเดิมในประเทศไทยที่ได้มีการก่อสร้างเสร็จก่อนมีประกาศดังกล่าวยังคงรับน้ำหนักบรรทุกตามการออกแบบตามมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกา ด้วยวิธีตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกใช้งานแบบเดิม และต่อมาได้มีการกำหนดวิธีการออกแบบและน้ำหนักบรรทุกใหม่ เรียกว่า วิธีตัวคูณเพิ่มและความต้านทานน้ำหนัก HL-93 [9] ซึ่งประกอบด้วย น้ำหนักยุทโธปกรณ์ (Tandem Load) น้ำหนักรถบรรทุก (Truck Load) และน้ำหนักช่องจราจร (Lane Load) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาความแตกต่างของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสะพานคอนกรีตอัดแรง เมื่อรับน้ำหนักรถบรรทุกแต่ละประเภทตามประกาศต่าง ๆ ใหม่ของกรมทางหลวงและน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐานการกำหนดวิธีการออกแบบและน้ำหนักบรรทุกใหม่ของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกา และนำผลที่ได้จากการวิจัยมาวิเคราะห์ความเหมาะสมของการกำหนดน้ำหนักรถบรรทุก และปรับใช้สำหรับการออกแบบสะพานในประเทศไทย โดยพิจารณาจากสภาวะการใช้งานของโครงสร้างเดิมเป็นหลัก

2. วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในสะพานคอนกรีตอัดแรง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงการรับน้ำหนักบรรทุกตามประกาศต่าง ๆ ของกรมทางหลวงและน้ำหนักบรรทุก HL-93 ตามมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกาเทียบกับค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีต ลวดอัดแรง และเหล็กเสริม โดยการจำลองโครงสร้างสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบต่อเนื่องสามช่วงสะพาน ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พร้อมทั้งเสนอความเหมาะสมของการกำหนดน้ำหนักรถบรรทุกไทยเพื่อนำมาปรับใช้สำหรับการออกแบบสะพาน

3. ทบทวนวรรณกรรม

จากการศึกษางานวิจัยและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสะพาน และการรับน้ำหนักบรรทุกไทยและน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกา พร้อมทั้งการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองโครงสร้างสะพาน มีรายละเอียดดังนี้

Tabsh, S. W. and Tabatabai, M. (2544) [10] งานวิจัยศึกษาน้ำหนักของรถบรรทุกที่ไม่มีประกาศใช้งานตามกฎหมายและมีขนาดเกินกว่าที่กำหนด ซึ่งไม่สามารถคำนวณด้วยวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกา สำหรับสะพาน 126 แห่ง เพื่อพัฒนาค่าตัวแปรการกระจายน้ำหนักบนสะพานอย่างง่าย จากผลการวิเคราะห์เมื่อเพิ่มความกว้างของล้อรถบรรทุกทำให้ค่าตัวแปรการกระจายน้ำหนักมีค่าลดลง และส่งผลต่อแรงเฉือนมากกว่าโมเมนต์ดัด โดยเฉพาะคานรองรับสะพานที่มีระยะห่างมาก ส่วนคานรองรับสะพานที่มีระยะห่างน้อยจะไม่ได้รับผลกระทบ เนื่องจากล้อรถบรรทุกจะกระทำต่อพื้นที่รับแรงของคานรองรับเดียวเสมอ

กรรณิการ์ ริมดุสิต และ สมโพธิ์ วิวิธเกยูรวงศ์ (2548) [11] งานวิจัยศึกษาการออกแบบสะพานในประเทศไทย ที่มีการนำน้ำหนักรถบรรทุกตามมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกามาปรับใช้ แต่เนื่องด้วยรถบรรทุกที่มีการใช้งานของประเทศไทยหรือรถสิบล้อ มีลักษณะรูปร่าง น้ำหนักบรรทุกรวม และน้ำหนักลงเพลาที่แตกต่างไปจากมาตรฐานที่นำมาปรับใช้ ซึ่งอาจส่งผลต่อความปลอดภัยของสะพานนั้น ๆ ทั้งนี้ในการศึกษามุ่งเน้นเพื่อคำนวณหาและเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสูงสุดสมบูรณ์ โดยไม่รวมแรงกระแทกและค่าการกระจายน้ำหนักของล้อสำหรับสะพานช่วงเดียวที่มีความยาวช่วงเท่ากับ 10 ถึง 38 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกสิบล้อและรถบรรทุกตามมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกา จากผลการศึกษาพบว่า รถบรรทุกสิบล้อ น้ำหนักบรรทุกรวมไม่เกิน 26, 28 และ 35 ตัน เกิดค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสมบูรณ์มากกว่าน้ำหนักบรรทุกประเภท HS20-44 ตามมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกาในทุกความยาวช่วงสะพาน และเมื่อเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสูงสุดสมบูรณ์มีค่ามากกว่าเท่ากับ 20.80 และ 20.01 สำหรับความยาวช่วงสะพานเท่ากับ 10 ถึง 20 เมตร

สุนิติ สุภาพ และ ภานุวัฒน์ จ้อยกลัด (2554) [12] งานวิจัยศึกษาพฤติกรรมของคานสะพานช่วงเดี่ยวธรรมดาที่มีความยาวช่วงสะพานเท่ากับ 5 ถึง 60 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกไทยเทียบกับน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกา เพื่อศึกษาสัดส่วนของแรงเฉือนและสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบว่า แต่ละช่วงความยาวสะพานเกิดจากรถบรรทุกต่างชนิดกันและไม่ได้เกิดจากรถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมมากที่สุด จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างจะได้สัดส่วนแรงเฉือนและสัดส่วนโมเมนต์ดัดมีค่าแปรผันตามความยาวช่วงสะพานเท่ากับ 1.12 ถึง 1.89 และ 1.26 ถึง 1.67 ตามลำดับ ทั้งนี้สัดส่วนที่ได้สามารถนำไปปรับเพิ่มค่ากำลังออกแบบของน้ำหนักบรรทุกจรตามมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกา เพื่อให้สอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกไทย

สุนิติ สุภาพ และ ภานุวัฒน์ จ้อยกลัด (2554) [13] งานวิจัยศึกษาการออกแบบสะพานสำหรับวิศวกรออกแบบในประเทศไทย โดยการปรับน้ำหนักบรรทุกตามประกาศต่าง ๆ ของกรมทางหลวงให้สอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกา ซึ่งค่าดังกล่าวมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานระบบคานต่อเนื่องสามช่วงที่มีความยาวช่วงสะพานไม่เท่ากัน ซึ่งมีความยาวช่วงสะพานเท่ากับ 90 ถึง 180 เมตร เพื่อเปรียบเทียบสัดส่วนแรงเฉือนและสัดส่วนโมเมนต์ดัดสูงสุดจากผลการศึกษาพบว่า แรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดในแต่ละรูปแบบสะพาน ส่วนใหญ่เกิดจากรถบรรทุกแบบกึ่งพ่วงน้ำหนักบรรทุกรวม 45 ตัน และจากการวิเคราะห์โครงสร้างยังพบอีกว่า แต่ละความยาวช่วงสะพานมีค่าอยู่ระหว่าง 1.312 ถึง 1.954 เท่าของน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกา และมีค่ามากกว่าสัดส่วนที่ได้จากการศึกษาสะพานช่วงเดี่ยวธรรมดาถึงร้อยละ 27.76 ทั้งนี้สัดส่วนที่ได้สามารถนำไปปรับเพิ่มค่ากำลังออกแบบของน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกา เพื่อให้สอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกไทย

สุนิติ สุภาพ และ ภานุวัฒน์ จ้อยกลัด (2555) [14] งานวิจัยศึกษาสะพานระบบคานต่อเนื่องสามช่วง ซึ่งมีความยาวช่วงสะพานเท่ากับ 90 ถึง 180 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกที่มีการเปลี่ยนแปลงการออกแบบสะพานเป็นวิธีตัวคูณเพิ่มและความต้านทานน้ำหนัก ซึ่งมีการกำหนดน้ำหนักบรรทุก HL-93 ที่แตกต่างไปจากน้ำหนักบรรทุกเดิมของไทย HS20-44 และน้ำหนักรถบรรทุกตามประกาศต่าง ๆ ของกรมทางหลวง ผลการศึกษาพบว่า แรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดในแต่ละรูปแบบสะพานที่พิจารณาจากน้ำหนักบรรทุกไทยส่วนใหญ่เกิดจากรถบรรทุกแบบกึ่งพ่วงที่มีน้ำหนักบรรทุกรวม 45 ตัน และจากผลการวิเคราะห์โครงสร้างจะได้สัดส่วนแรงเฉือนและสัดส่วนโมเมนต์ดัดสำหรับแต่ละความยาวช่วงสะพานเมื่อเทียบกับน้ำหนักบรรทุก HL-93 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.974 ถึง 1.413 และมีค่ามากกว่าสัดส่วนที่ได้จากการศึกษาสะพานช่วงเดี่ยวธรรมดาร้อยละ 23.25 สัดส่วนที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นตัวคูณปรับค่ากำลังที่ต้องการของสะพานรับน้ำหนักบรรทุกจร HL-93 เพื่อให้ผลตอบสนองสูงสุดสอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกไทยตามประกาศต่าง ๆ ของกรมทางหลวง

ภูมิเกียรติ สว่างวงศ์ (2559) [15] งานวิจัยศึกษาขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างและออกแบบสะพานแบบต่อเนื่องสามช่วงที่มีการก่อสร้างด้วยวิธีโครงสร้างยื่นสมดุล รับน้ำหนักบรรทุกและการใช้งานตามการก่อสร้างจริง โดยจะเปลี่ยนน้ำหนักบรรทุกตามขั้นตอนต่าง ๆ ของการก่อสร้าง จากสภาพน้ำหนักบรรทุกที่แตกต่างกันในแต่ละขั้นตอนนำมาซึ่งการพิจารณาผลของการสูญเสียแรงดึงของลวดอัดแรงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหลังการถ่ายแรงและการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลาระหว่างการก่อสร้างจนถึงขั้นตอนการใช้งาน โดยการก่อสร้างดังกล่าวจะเปลี่ยนสภาพจากช่วงคานยื่นช่วงเดียวเป็นคานช่วงต่อเนื่องเมื่อมีการก่อสร้างเสร็จแล้ว ทั้งนี้เพื่อศึกษาโมเมนต์ดัด แรงเฉือน แรงบิด และหน่วยแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นทั้ง 3 ขั้นตอนในการก่อสร้างเทียบกับค่าขีดจำกัดกำลังต้านทานของโครงสร้าง ผลการวิเคราะห์โครงสร้างในแต่ละขั้นตอนก่อสร้าง หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตอัดแรง และลวดอัดแรงมีค่าน้อยกว่าค่าปลอดภัยในการออกแบบ และเมื่อพิจารณาน้ำหนักบรรทุกจรกระทำร่วม ค่าหน่วยแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจะมีค่าแปรผันตามน้ำหนักบรรทุกจร

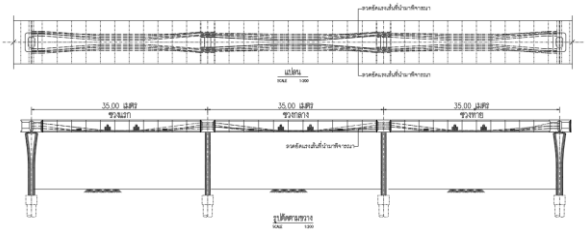
4. วิธีดำเนินงานวิจัย

4.1

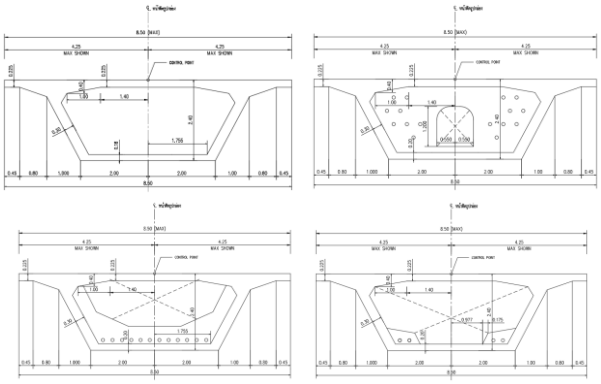
งานวิจัยนี้เป็นการจำลองโครงสร้างสะพานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบต่อเนื่อง ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ในการสร้างและการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรม Midas Civil 2019

สะพานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดรูปกล่องแบบต่อเนื่องมีความยาวช่วงเท่ากับ 35 เมตร จำนวน 3 ช่วง ความยาวสะพานรวมทั้งหมดเท่ากับ 105 เมตร ขนาดหน้าตัดกว้าง 8.50 เมตร ลึก 2.40 เมตร จำนวน 2 ช่องจราจร ดังแสดงในรูปที่ 1 และกำหนดให้มีจุดรองรับดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

ในการจำลองหน้าตัดคอนกรีตอัดแรงนั้น ประกอบด้วยหน้าตัดทั้งหมด 4 รูปแบบ กล่าวคือ หน้าตัดมาตรฐาน (Standard Segmental) หน้าตัดบริเวณหัวเสา (Pier Segmental) และหน้าตัดบริเวณปรับแนวลวดอัดแรง (Deviator Segmental) จำนวน 2 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 1 แปลนและรูปด้านสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบต่อเนื่องสามช่วง



รูปที่ 2 ขนาดหน้าตัดสะพานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดมาตรฐาน หน้าตัดบริเวณหัวเสา และหน้าตัดบริเวณปรับแนวลวดอัดแรง มีหน่วยเป็นเมตร

ตารางที่ 1 ประเภทของแต่ละจุดรองรับ

จุดรองรับที่ 1	จุดรองรับที่ 2	จุดรองรับที่ 3	จุดรองรับที่ 4
แบบเคลื่อนที่ได้ (Roller Support)	แบบยึดหมุน (Pinned Support)	แบบยึดหมุน (Pinned Support)	แบบเคลื่อนที่ได้ (Roller Support)

คอนกรีตที่ใช้ในงานสะพานคอนกรีตอัดแรงจะต้องมีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ลวดอัดแรงใช้ในงานสะพานคอนกรีตอัดแรงคือ ลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น และมีการคลายแรงดึงต่ำ (low relaxation) เกรด 270 (มีกำลังดึงประลัยอย่างน้อย 270,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือ 18,980 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) เนื้อที่หน้าตัดขนาด 15.2 มิลลิเมตร

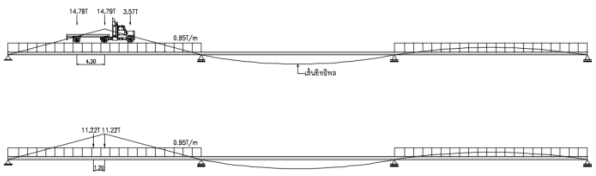
เหล็กเสริมไม่อัดแรงที่ใช้ในงานสะพานคอนกรีตอัดแรงคือ เหล็กข้ออ้อย (deformed bar) มีความต้านทานแรงดึงที่จุดครากเท่ากับ 4,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (SD40)

4.2

การจัดวางน้ำหนักบรรทุกตามประกาศต่าง ๆ ของกรมทางหลวง กำหนดให้รถบรรทุกเพียงคันเดียวและรถบรรทุกหลายคันเคลื่อนที่เป็นขบวนในแต่ละช่องจราจร โดยมีระยะห่างระหว่างเพลาหลังของรถคันหน้าถึงเพลาหน้าของรถคันหลังที่ตามมาเท่ากับ 9.14 เมตร เต็มช่วงสะพานและเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน

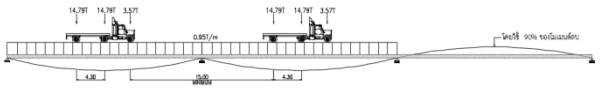
การจัดวางน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO (LRFD) มีรายละเอียดดังนี้ [16]

(1) การหาค่าโมเมนต์บวกสูงสุด (Maximum positive moment) ประกอบด้วยน้ำหนักรถบรรทุก (Truck Load) หรือน้ำหนักยุทโธปกรณ์ (Tandem Load) จำนวนหนึ่งคันต่อหนึ่งช่องจราจรกระทำร่วมกับน้ำหนักช่องจราจร (Lane Load) ดังแสดงในรูปที่ 3



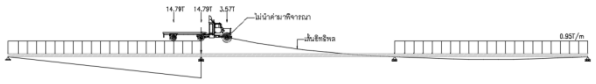
รูปที่ 3 เส้นอิทธิพลที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์บวกสูงสุด

(2) การหาค่าโมเมนต์ลบสูงสุด (Maximum negative moment) ประกอบด้วยน้ำหนักรถบรรทุก (Truck Load) จำนวนสองคันต่อหนึ่งช่องจราจรกระทำร่วมกับน้ำหนักช่องจราจร (Lane Load) โดยใช้ 90% ของโมเมนต์ลบในการออกแบบสะพานดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 เส้นอิทธิพลที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ลบสูงสุด

(3) การหาค่าแรงเฉือนสูงสุด (Maximum shear force) ประกอบด้วยน้ำหนักรถบรรทุก (Truck Load) จำนวนหนึ่งคันต่อหนึ่งช่องจราจรกระทำร่วมกับน้ำหนักช่องจราจร (Lane Load) กรณีนี้ไม่ต้องพิจารณาน้ำหนักล้อหน้า เนื่องจากจะทำให้แรงเฉือนลดน้อยลงดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 เส้นอิทธิพลที่ทำให้เกิดค่าแรงเฉือนสูงสุด

4.3

ในการศึกษาจะเลือกใช้เพียงบางรูปแบบของรถบรรทุกตามประกาศของกรมทางหลวงตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 จนถึงปี พ.ศ. 2558 ตามที่ได้มีการปรับปรุงเรื่อยมาดังแสดงในรูปที่ 6 ที่น้ำหนักบรรทุกมีผลต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นกับสะพานสูงสุดและน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกา ด้วยวิธีตัวคูณเพิ่มและความต้านทานน้ำหนัก HL-93 จำนวนทั้งสิ้น 17 รูปแบบ ซึ่งประกอบด้วย

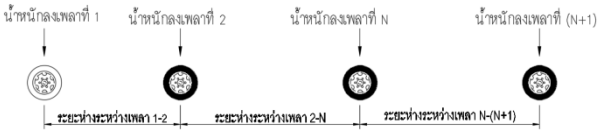
(1) รถบรรทุก (น้ำหนักรวมไม่เกิน 25 ตัน) พ.ศ. 2548
(2) รถบรรทุก (น้ำหนักรวมไม่เกิน 30 ตัน) พ.ศ. 2548
(3) รถกึ่งพ่วง (น้ำหนักรวมไม่เกิน 36 ตัน) พ.ศ. 2548
(4) รถกึ่งพ่วง (น้ำหนักรวมไม่เกิน 41 ตัน) พ.ศ. 2548
(5) รถกึ่งพ่วง (น้ำหนักรวมไม่เกิน 50 ตัน) พ.ศ. 2548
(6) รถกึ่งพ่วง (น้ำหนักรวมไม่เกิน 50.5 ตัน) พ.ศ. 2548
(7) รถกึ่งพ่วง (น้ำหนักรวมไม่เกิน 50.5 ตัน) พ.ศ. 2548
(8) รถพ่วง (น้ำหนักรวมไม่เกิน 47 ตัน) พ.ศ. 2548
(9) รถกึ่งพ่วง (น้ำหนักรวมไม่เกิน 49 ตัน) พ.ศ. 2552
(10) รถกึ่งพ่วง (น้ำหนักรวมไม่เกิน 47 ตัน) พ.ศ. 2552
(11) รถกึ่งพ่วง (น้ำหนักรวมไม่เกิน 45 ตัน) พ.ศ. 2552
(12) รถกึ่งพ่วง (น้ำหนักรวมไม่เกิน 50.5 ตัน) พ.ศ. 2552
(13) รถพ่วง (น้ำหนักรวมไม่เกิน 50.5 ตัน) พ.ศ. 2552
(14) รถพ่วง (น้ำหนักรวมไม่เกิน 50.5 ตัน) พ.ศ. 2552
(15) รถพ่วง (น้ำหนักรวมไม่เกิน 50.5 ตัน) พ.ศ. 2552
(16) น้ำหนักยุทโธปกรณ์ (Tandem Load) น้ำหนักรวมไม่เกิน 22.42 ตัน หรือ 220 กิโลนิวตัน กระทำร่วมกับน้ำหนักช่องจราจร (Lane Load) AASHTO HL-93 ขนาด 0.95 ตันต่อเมตร หรือ 9.30 กิโลนิวตันต่อเมตร
(17) น้ำหนักรถบรรทุก (Truck Load) น้ำหนักรวมไม่เกิน 33.13 ตัน หรือ 325 กิโลนิวตัน กระทำร่วมกับน้ำหนักช่องจราจร (Lane Load) AASHTO HL-93 ขนาด 0.95 ตันต่อเมตร หรือ 9.30 กิโลนิวตันต่อเมตร



รูปที่ 6 รูปแบบรถบรรทุกตามประกาศต่าง ๆ ของกรมทางหลวง

เนื่องจากตามประกาศต่าง ๆ ของกรมทางหลวงไม่ได้กำหนดระยะห่างระหว่างเพลาของรถบรรทุกหรือตัวรถลากจูง ในการศึกษาจึงได้อ้างอิงข้อมูลจากผู้วิจัยที่ได้มีการรวบรวมข้อมูลระยะห่างระหว่างเพลาของรถบรรทุกแต่ละรูปแบบที่มีใช้และผลิตในประเทศไทยดังแสดงในรูปที่ 7 สำหรับขนาดน้ำหนักบรรทุกต่อเพลาและระยะห่างระหว่างเพลาที่ใช้วิเคราะห์ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 และตารางที่ 3 ตามลำดับ

ในการวิเคราะห์โครงสร้างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ (Moving Load) จะอาศัยหลักการของเส้นอิทธิพล (Influence Line) โดยการจำลองโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทั้งนี้การวิเคราะห์โครงสร้างจะไม่พิจารณาผลของแรงกระแทก (Dynamic Impact Effect) กระทำต่อโครงสร้างสะพาน



รูปที่ 7 น้ำหนักลงเพลาและระยะห่างระหว่างเพลาที่ใช้วิเคราะห์

ตารางที่ 2 ขนาดน้ำหนักบรรทุกที่ใช้วิเคราะห์

รูปแบบน้ำหนักบรรทุก*	น้ำหนักต่อเพลา (ตัน)						
	1	2	3	4	5	6	7
(1)	5	10	10	-	-	-	-
(2)	5	5	10	10	-	-	-
(3)	5	10	10	11	-	-	-
(4)	5	5	10	10	11	-	-
(5)	5	10	10	10	10	-	-
(6)	5	5	10	10	10	10	-
(7)	5	10	10	8.5	8.5	8.5	-
(8)	5	10	10	8	8	8	-
(9)	5	10	10	7.4	7.3	7.3	-
(10)	5	10	10	6.7	6.7	6.6	-
(11)	5	5	10	10	6.9	6.8	6.8
(12)	5	10	10	11	11	-	-
(13)	5	10	10	9.5	8	8	-
(14)	5	5	10	10	7.5	6.5	6.5
(15)	5	5	10	10	10.25	10.25	-
(16)**	11.21	11.21	-	-	-	-	-
(17)**	3.57	14.78	14.78	-	-	-	-

(Lane Load) *0.95*

ตารางที่ 3 ระยะห่างระหว่างเพลาที่ใช้วิเคราะห์

รูปแบบน้ำหนักบรรทุก*	ระยะระหว่างเพลา (เมตร)					
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
(1)	4.025	1.250	-	-	-	-
(2)	1.300	3.300	1.250	-	-	-
(3)	3.025	1.250	6.825	-	-	-
(4)	1.300	3.025	1.250	6.825	-	-
(5)	3.025	1.250	6.825	1.250	-	-
(6)	1.300	3.025	1.250	6.825	1.250	-
(7)	3.025	1.250	6.825	1.250	1.250	-
(8)	3.025	1.250	5.825	1.250	1.250	-
(9)	3.025	1.250	4.825	1.25	1.250	-
(10)	3.025	1.250	3.325	1.250	1.250	-
(11)	1.300	3.025	1.250	6.825	1.250	1.250
(12)	4.025	1.250	4.715	4.300	-	-
(13)	4.025	1.250	3.325	4.025	1.250	-
(14)	1.300	3.300	1.250	3.325	4.025	1.250
(15)	1.300	3.300	1.250	4.775	4.300	-
(16)**	1.200	-	-	-	-	-
(17)**	4.300	9.000	-	-	-	-

(Lane Load) *0.95*

4.4

(1) สำหรับคอนกรีตอัดแรงที่สภาวะการใช้งาน หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตจะต้องมีค่าไม่เกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ อ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO (LRFD) ดังแสดงในสมการที่ (1) และสมการที่ (2)

หน่วยแรงอัด :

$$f_c = -0.45 f_c^{'} \quad (1)$$

หน่วยแรงดึง :

$$f_t = +1.60\left(f_c^{'}\right)^{1/2} \quad (2)$$

โดยที่ f_c คือ ค่าหน่วยแรงอัดในคอนกรีต

f_t คือ ค่าหน่วยแรงดึงในคอนกรีต

f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน

(2) สำหรับลวดอัดแรงที่สภาวะใช้งานภายหลังการสูญเสียแรงดึง หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรงจะต้องมีค่าไม่เกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ อ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO (LRFD) ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$f_{pe} = +0.80 f_{py} \quad (3)$$

โดยที่ f_{pe} คือ ค่าหน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงที่สภาวะการใช้งานภายหลังการสูญเสียแรงดึง

f_{py} คือ ความต้านทานแรงดึงที่จุดครากของลวดอัดแรง

(3) สำหรับสะพานคอนกรีตอัดแรง หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็กเสริมจะต้องมีค่าไม่เกินค่าที่น้อยสุดของค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ อ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO (LRFD) ดังแสดงในสมการที่ (4) และสมการที่ (5)

$$V_n = V_c + V_s \quad (4)$$

$$V_n = \left(f_c^{'}\right)^{1/2} b_v d_v \quad (5)$$

โดยที่ $V_c = 0.166K(f_c^{'} b_v d_v)^{1/2}$

$$V_s = \frac{A_v f_y d_v}{s}$$

$$K = (1 + \frac{f_{pc}}{0.166(f_c^{'})^{1/2}})^{1/2} \le 2.0$$

โดยที่ b_v คือ ความกว้างประสิทธิผลของแผ่นตั้ง

d_v คือ ความลึกประสิทธิผลของหน้าตัด

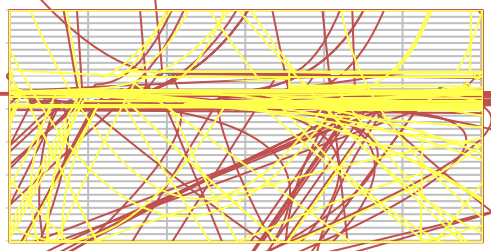
f_{pc} คือ ความยาวเส้นรอบรูปของหน้าตัด
K คือ ตัวแปรของค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้น
s คือ ระยะห่างเหล็กรับแรงเฉือน
V_c คือ ค่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ในคอนกรีต
V_n คือ ค่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ในหน้าตัด
V_s คือ ค่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ในเหล็กเสริม

5. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล

จากผลการวิจัยพฤติกรรมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบต่อเนื่องสามช่วง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักรถบรรทุกตามประกาศต่าง ๆ ของกรมทางหลวงและน้ำหนักรถบรรทุกตามมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกา ด้วยวิธีตัวคูณเพิ่มและความต้านทานน้ำหนัก HL-93 โดยวิธีการจำลองโครงสร้างสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบต่อเนื่องสามช่วงสะพานที่มีความยาวช่วงสะพานที่มีความยาวช่วงเท่ากับ 35 เมตร ความยาวสะพานรวมทั้งหมดเท่ากับ 105 เมตร พร้อมเปรียบเทียบพฤติกรรมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสะพานคอนกรีตอัดแรงกับค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ตามมาตรฐาน AASHTO (LRFD) และนำมาผลที่ได้จากการวิจัยมาวิเคราะห์ความเหมาะสมของการกำหนดน้ำหนักรถบรรทุกและปรับใช้สำหรับการออกแบบสะพานในประเทศไทย โดยพิจารณาจากสภาวะการใช้งานของโครงสร้างเดิมเป็นหลัก ซึ่งผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1

จากผลการวิเคราะห์พบว่า หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่ผิวบนขณะรับน้ำหนักรถบรรทุกประเภท (7) รถเทิ่งพ่วง (น้ำหนักรวมไม่เกิน 50.5 ตัน) ตามประกาศของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2548 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 9.12 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และขณะรับน้ำหนักรถบรรทุกประเภท (17) ตามมาตรฐาน AASHTO HL-93 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 9.43 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดในคอนกรีตที่ผิวบนเปรียบเทียบกับค่าหน่วยแรงดึงของคอนกรีตที่ยอมให้สำหรับน้ำหนักของรถบรรทุกตามประกาศของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2548 และประกาศของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2552 และตามมาตรฐาน AASHTO HL-93 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 10 ตามลำดับ



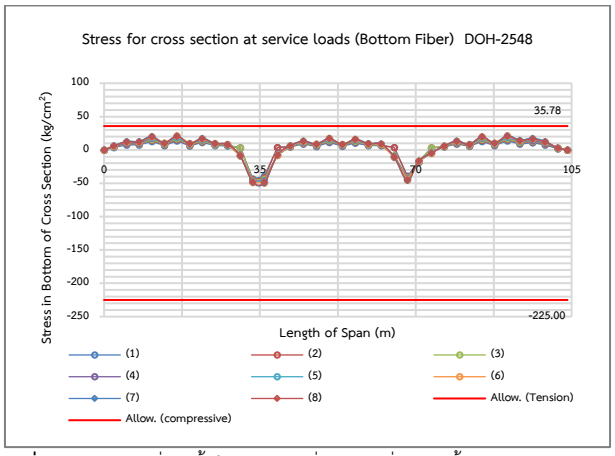
รูปที่ 8 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่ผิวบน เนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุกตามประกาศของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2548

รูปที่ 9 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่ผิวบน เนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุกตามประกาศของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2552

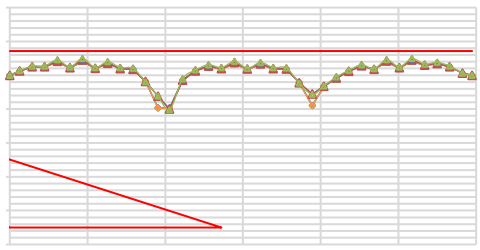
รูปที่ 10 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่ผิวบน เนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HL-93

5.2

จากผลการวิเคราะห์พบว่า หน่วยแรงดึงในคอนกรีตที่ผิวล่าง ขณะรับน้ำหนักรถบรรทุกประเภท (13) รถพ่วง (น้ำหนักรวมไม่เกิน 50.5 ตัน) ตามประกาศของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2552 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 22.61 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และขณะรับน้ำหนักรถบรรทุกประเภท (17) ตามมาตรฐาน AASHTO HL-93 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 26.17 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดในคอนกรีตที่ผิวล่างเปรียบเทียบกับค่าหน่วยแรงดึงของคอนกรีตที่ยอมให้สำหรับน้ำหนักของรถบรรทุกตามประกาศของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2548 ประกาศของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2552 และตามมาตรฐาน AASHTO HL-93 แสดงไว้ในรูปที่ 11 ถึงรูปที่ 13 ตามลำดับ



รูปที่ 11 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่ผิวล่าง เนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุกตามประกาศของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2548



รูปที่ 12 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่ผิวล่าง เนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุกตามประกาศของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2552

รูปที่ 13 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่ผิวล่าง เนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HL-93

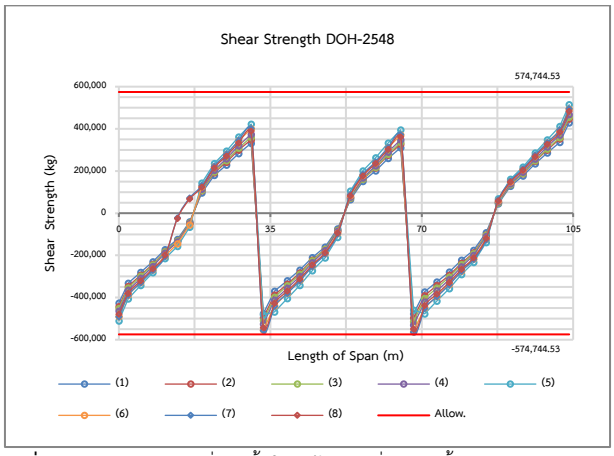
5.3

จากผลการวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงภายหลังการสูญเสียแรงดึง พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันเมื่อรับน้ำหนักรถบรรทุกประเภท (1)-(12) ตามประกาศต่าง ๆ ของกรมทางหลวง โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 10,994.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าหน่วยแรงดึงที่วิเคราะห์ได้จากน้ำหนักรถบรรทุกประเภท (13)-(17) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 10,994.09 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 14

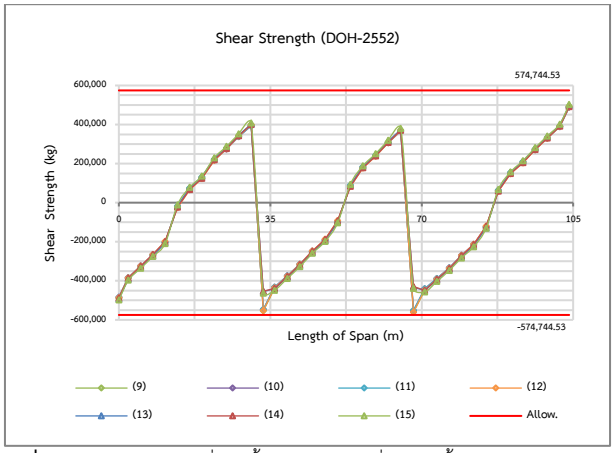
รูปที่ 14 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรงภายหลังการสูญเสียแรงดึง

5.4

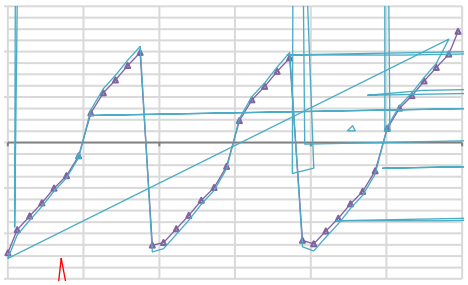
จากผลการวิเคราะห์หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็กเสริม ขณะรับน้ำหนักรถบรรทุกประเภท (7) ชนิดรถกึ่งพ่วง (น้ำหนักรวมไม่เกิน 50.5 ตัน) ตามประกาศของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2548 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 563,436.71 กิโลกรัม และขณะรับน้ำหนักรถบรรทุกประเภท (17) ตามมาตรฐาน AASHTO HL-93 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 514,879.74 กิโลกรัม ค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดในคอนกรีตและเหล็กเสริมในหน้าตัดเปรียบเทียบกับค่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้สำหรับน้ำหนักของรถบรรทุกตามประกาศของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2548 ประกาศของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2552 และตามมาตรฐาน AASHTO HL-93 แสดงไว้ในรูปที่ 15 ถึงรูปที่ 17 ตามลำดับ



รูปที่ 15 หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในหน้าตัด เนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุกตามประกาศของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2548



รูปที่ 16 หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในหน้าตัด เนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุกตามประกาศของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2552



รูปที่ 17 หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในหน้าตัด เนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HL-93

6. อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสะพานคอนกรีตอัดแรงเมื่อรับน้ำหนักกระทำของรถบรรทุกตามประกาศต่าง ๆ ของกรมทางหลวงและน้ำหนักรถบรรทุกตามมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกา ด้วยวิธีตัวคูณเพิ่มและความต้านทานน้ำหนักบรรทุก HL-93 โดยพิจารณาหน่วยแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในคอนกรีตลวดอัดแรง และเหล็กเสริม ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ตามมาตรฐาน AASHTO (LRFD) โดยผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

(1) น้ำหนักรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HL-93 ทำให้เกิดค่าหน่วยแรงดึงที่ผิวบนและล่างของคอนกรีตสูงสุด และมีค่ามากกว่าค่าหน่วยแรงดึงที่มากที่สุดเมื่อรับน้ำหนักรถบรรทุกตามประกาศต่าง ๆ ของกรมทางหลวงคิดเป็นอัตราส่วนเท่ากับ 1.03 และ 1.16 (สำหรับผิวบนและผิวล่าง) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามากสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน AASHTO HL-93 และมีค่าน้อยกว่าค่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ในคอนกรีตคิดเป็นอัตราส่วนเท่ากับ 0.26 และ 0.73 (สำหรับผิวบนและผิวล่าง) ตามลำดับ จึงมีความปลอดภัย หากพิจารณาใช้น้ำหนักดังกล่าวในการออกแบบสะพานในประเทศไทยตามมาตรฐาน AASHTO (LRFD)

(2) น้ำหนักรถบรรทุกตามประกาศต่าง ๆ ของกรมทางหลวงทำให้เกิดค่าหน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงมากกว่าค่าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นเมื่อรับน้ำหนักรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HL-93 เท่ากับ 0.06 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามากสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ตามประกาศของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2548 และประกาศของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2552 และมีค่าน้อยกว่าค่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ในลวดอัดแรงคิดเป็นอัตราส่วนเท่ากับ 0.85 จึงควรนำค่าหน่วยแรงดึงดังกล่าวไปพิจารณาร่วมในการปรับน้ำหนักรถบรรทุก สำหรับกรณีที่ต้องการออกแบบสะพานในประเทศไทยตามมาตรฐาน AASHTO (LRFD)

(3) น้ำหนักบรรทุกตามประกาศต่าง ๆ ของกรมทางหลวง ทำให้เกิดค่าหน่วยแรงเฉือนในคอนกรีตและเหล็กเสริมมากกว่าค่าหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเมื่อรับน้ำหนักรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HL-93 คิดเป็นอัตราส่วนเท่ากับ 1.09 เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามากสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ตามประกาศของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2548 และประกาศของกรมทางหลวงปี พ.ศ. 2552 และมีค่าน้อยกว่าค่าหน่วยแรงเฉือนรวมที่ยอมให้ในหน้าตัดคิดเป็นอัตราส่วนเท่ากับ 0.98 จึงควรนำค่าหน่วยแรงเฉือนดังกล่าวไปพิจารณาร่วมในการปรับน้ำหนักรถบรรทุก สำหรับกรณีที่ต้องการออกแบบสะพานในประเทศไทยตามมาตรฐาน AASHTO (LRFD)

(4) หากวิศวกรไทยจำเป็นต้องออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO (LRFD) ควรพิจารณาหน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงและหน่วยแรงเฉือนรวมในหน้าตัดที่อาจเพิ่มค่าขึ้นได้ เพื่อให้สอดคล้องกับน้ำหนักรถบรรทุกตามประกาศต่าง ๆ ของกรมทางหลวง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.อัฏฐวิทย์ สุจริตพงศ์ สำหรับหลักการ แนวความคิดตลอดจนองค์ความรู้ต่าง ๆ และคำปรึกษาในการวิจัยครั้งนี้ ว่าที่ร้อยตรีภูมิเกียรติ สว่างวงศ์ สำหรับหลักการใช้งานและองค์ความรู้เกี่ยวกับโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมทางหลวง (2548). ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน. ราชกิจจานุเบกษา, เล่มที่ 122 ตอนพิเศษ 150ง, หน้า 19-25.

[2] กรมทางหลวง (2552). ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2552. ราชกิจจานุเบกษา, เล่มที่ 126 ตอนพิเศษ 92ง, หน้า 2-7.

[3] กรมทางหลวง (2552). ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2552. ราชกิจจานุเบกษา, เล่มที่ 126 ตอนพิเศษ 174ง, หน้า 116-117.

[4] กรมทางหลวง (2554). ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน (ฉบับที่ 4) พ.ศ. 2554. ราชกิจจานุเบกษา, เล่มที่ 128 ตอนพิเศษ 161ง, หน้า 9-10.

[5] กรมทางหลวง (2555). ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน (ฉบับที่ 5) พ.ศ. 2555. ราชกิจจานุเบกษา, เล่มที่ 129 ตอนพิเศษ 197ง, หน้า 52-53.

[6] กรมทางหลวง (2556). ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน (ฉบับที่ 6) พ.ศ. 2556. ราชกิจจานุเบกษา, เล่มที่ 130 ตอนพิเศษ 8ง, หน้า 6-7.

[7] กรมทางหลวง (2556). ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน (ฉบับที่ 7) พ.ศ. 2556. ราชกิจจานุเบกษา, เล่มที่ 130 ตอนพิเศษ 190ง, หน้า 90-93.

[8] กรมทางหลวง (2558). ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหายเดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน (ฉบับที่ 8) พ.ศ. 2558. ราชกิจจานุเบกษา, เล่มที่ 132 ตอนพิเศษ 57ง, หน้า 24-25.

[9] American Association of State Highway and Transportation Officials (2007). *AASHTO LRFD Bridge Specifications*. Washington DC, pp. 22-23.

[10] 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, pp. 9-16.

[11] กรรณิการ์ ริมดุสิต และ สมโพธิ์ วิวิธเกยูรวงศ์ (2548). การเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนของคานสะพานช่วงเดียวที่เกิดจากรถบรรทุกสิบล้อและรถบรรทุกมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกา.
, 1-4 กุมภาพันธ์ 2548, หน้า 60-67

[12] สุนิติ สุภาพ และ ภานุวัฒน์ จ้อยกลัด (2554). การเปรียบเทียบแรงภายในของสะพานช่วงเดี่ยวเนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุกไทยกับน้ำหนักทางหลวงตามมาตรฐาน AASHTO.
, ปีที่ 22, ฉบับที่ 1, หน้า 25-35.

[13] สุนิติ สุภาพ และ ภานุวัฒน์ จ้อยกลัด (2554). การเปรียบเทียบผลตอบสนองสูงสุดของสะพานต่อเนื่อง 3 ช่วง เนื่องจากรถบรรทุกไทยและน้ำหนักบรรทุกจรตามมาตรฐาน AASHTO.
, ปีที่ 34, ฉบับที่ 3, หน้า 317-334.

[14] สุนิติ สุภาพ และ ภานุวัฒน์ จ้อยกลัด (2555). สัดส่วนผลตอบสนองสูงสุดของคานสะพานต่อเนื่อง 3 ช่วง เนื่องจากรถบรรทุกไทยและน้ำหนักบรรทุกจร HL-93.
, ปีที่ 35, ฉบับที่ 4, หน้า 501-518.

[15] ภูมิเกียรติ สว่างวงศ์ (2559). การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงที่ก่อสร้างแบบคานยื่นสมดุลตาม AASHTO LRFD HL-93. วิทยานิพนธ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ประเทศไทย.

[16] ทศพล ปิ่นแก้ว และ มนต์เกียรติ์ ชนินทรลีลา (2558).
จูน พับลิชชิ่ง, หน้า 156-157.