การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของกำลังรับแรงเฉือนเจาะของพื้นสะพานคอนกรีต: กรณีศึกษา สะพานสิริลักษณ์ จังหวัดราชบุรี

Sensitivity Analysis of Punching Shear Capacity of concrete bridge deck: a case study of Sirilak Bridge, Ratchaburi province

ปฏิภาณ สางห้วยไพร[1*] วิทิต ปานสุข[1] ธัญพิสิฐ มโนมัยพิบูลย์[1] บพิตร ศรีหัตถกรรม[1] ทศพร ประเสริฐศรี[2] ปัญญาวุธ จิรดิลก[3] วีรพร พงศ์ติณบุตร[4] ธิดารัตน์ วิสุทธิ์เสรีวงศ์[1]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร
[2] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จ.กรุงเทพมหานคร
[3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพมหานคร
[4] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี
*Corresponding Author, Email address: 6470214021@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

ประเทศไทยมีการอัตราการขนส่งที่เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะการขนส่งทางบกและการสัญจรบนโครงสร้างสะพาน การสัญจรของยานพาหนะที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นสะพานได้รับความเสียหายเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นรวมถึงน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้างสะพานเป็นเวลานาน การประเมินสภาพสะพานต้องคำนึงถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกและสภาพปัจจุบันของโครงสร้างสะพานเพื่อให้เกิดความปลอดภัยสูงสุดต่อผู้ขับขี่และประชาชนผู้ใช้ทาง ส่งผลให้งานวิจัยนี้พิจารณาสะพานสิริลักษณ์ อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัดราชบุรี เป็นกรณีศึกษาเพื่อดำเนินการตรวจสอบสภาพสะพานโดยวิธีแบบไม่ทำลายและนำข้อมูลจากภาคสนามมาใช้ในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ร่วมกับสมการเชิงวิเคราะห์สำหรับการทำนายน้ำหนักบรรทุกภายใต้การวิบัติแบบแรงเฉือนเจาะของพื้นสะพาน ผลการศึกษาพบว่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดประลัยส่งผลต่อสติฟเนทเริ่มต้นและกำลังต้านทานแรงสูงสุด รวมถึงพื้นสะพานมีการกระจายตัวของรอยร้าวลดลง

คำสำคัญ: สะพาน, พื้นสะพาน, ไฟไนท์เอลิเมนท์, แรงเฉือนเจาะ

Abstract

Thailand has an increasing rate of transport, especially land transport and traffic on bridge structures. The increase in vehicular traffic has resulted in damage to the bridge deck due to the tendency of the load to increase and the load acting on the bridge structure over a long period. The bridge condition assessment must consider the loading behavior and the current condition of the bridge structure to ensure maximum safety for drivers and road users. As a result, the Sirilak Bridge, Amphoe Mueang Ratchaburi, Ratchaburi province, serves as a case study to conduct a non-destructive examination of the bridge health and apply field data to develop a mathematical model with analytical equations for predicting the load under the punching shear failure of the bridge deck. The results demonstrated that the reduction in concrete compressive strength affected the initial stiffness and applied load capacity. The crack propagation of the bridge deck has also reduced.

Keywords: Bridge, Deck, Finite Element, Punching Shear

1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของการคมนาคมขนส่งโดยเฉพาะการคมนาคมขนส่งทางบกอันเนื่องมาจากการขยายตัวของชุมชน การเจริญเติบโตของภาคเศรษฐกิจและภาคอุตสาหกรรม ส่งผลให้ปริมาณการคมนาคมขนส่งทางบกหนาแน่นขึ้น สะพานจึงจัดเป็นโครงสร้างที่ได้รับผลกระทบโดยตรงจากการเพิ่มขึ้นของการสัญจร หนึ่งในสะพานที่มีการเปิดใช้งานอย่างยาวนานและรองรับการสัญจรของยานยนต์หนักในปริมาณสูง คือสะพานสิริลักษณ์ที่ใช้เป็นสะพานข้ามแม่น้ำแม่กลอง ถนนเพชรเกษม ทางหลวงหมายเลข 4 สายทางคลองอีจาง–หลุมดิน สะพานดังกล่าวสร้างขึ้นตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2523 จากการพิจารณาสถิติการจราจร พบว่ามีการรองรับยานยนต์หนัก คิดเป็น 34.19% ของปริมาณยานยนต์ทั้งหมด [1] ซึ่งจำนวนยานยนต์หนักที่มากจะทำให้สะพานได้รับน้ำหนักบรรทุกกระทำที่สูงตามไปด้วย

สะพานสิริลักษณ์ สร้างขึ้นตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2523 ซึ่งมีอายุการใช้งานอย่างยาวนาน จากการตรวจสอบด้วยตาเปล่า (Visual inspection) พบว่า

สะพานส่วนบนมีความเสียหาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณพื้นสะพาน (Deck) โดยตรง ซึ่งอาจส่งผลทำให้เกิดความเสียหายจากแรงกระทำของรถบรรทุกที่สัญจรไปมาอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ ยังพบความเสียหายของเกอร์เดอร์ (Girder) ของสะพานอีกด้วย ดังนั้น การวิเคราะห์พฤติกรรมและกำลังของสะพานโดยรวม จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความปลอดภัยของสะพานนี้

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการประเมินสภาพและวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างสะพานส่วนบนภายใต้แรงเฉือนเจาะ (Punching shear) เนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุกที่กระทำเป็นเวลานาน โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ ด้วยโปรแกรม 3D-ATENA ซึ่งจะทำให้สามารถประเมินกำลังของโครงสร้างและเสนอแนวทางในการฟื้นฟูสภาพของสะพานให้มีความปลอดภัยสำหรับผู้ใช้งานได้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงสะพาน เป็นชิ้นส่วนหนึ่งที่เปิดเผยให้สัมผัสและรองรับแรงกระทำมากที่สุดในโครงสร้างจากน้ำหนักบรรทุกรถสัญจรและในบางทีอาจมากไปถึงค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิกฤต [2] ซึ่งอาจเกิดการวิบัติจากการรับแรงเฉือนแบบพื้นทางเดียว (One-way shear) และแรงเฉือนเจาะทะลุ (Punching shear) ในกรณีที่พื้นมีเหล็กเสริมรองรับแรงเฉือนไม่เพียงพอหรือคอนกรีตในส่วนรับแรงอัดมีการแตกร้าวแล้วเกิดการพัฒนารอยแตกจากน้ำหนักกระทำขนาดใหญ่เกินกำหนด

การรับน้ำหนักจากรถบรรทุกที่น้ำหนักเกินกระทำซ้ำๆ อาจทำให้ความแข็งแรง (Stiffness and Strength) ของโครงสร้างลดลงไปจากความล้า (Fatigue) ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง [3] ซึ่งการวิบัติในโหมดนี้สามารถเกิดได้จากการรองรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเช่นกัน โดยเกิดขึ้นทั้งการแตกหักในคอนกรีตและเหล็กเสริม [4]

อย่างไรก็ตามการทดสอบเชิงทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างแผ่นพื้นสะพานสำหรับรับน้ำหนักบรรทุกสัญจรแบบไดนามิค เป็นเรื่องที่ทำได้ยาก มีค่าใช้จ่ายสูงและต้องใช้เวลามากในการสร้างแบบจำลองแต่ละตัวอย่าง นอกจากนี้ ในตัวแปรเชิงโครงสร้างบางตัวนั้นอาจยากที่จะกำหนดในการทดลอง เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของแต่ละวัสดุตลอดความลึกของแผ่นพื้นและการกระจายตัวของความเค้นที่ผิวแผ่นพื้น ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างด้วยการคำนวณจากคอมพิวเตอร์ที่มีความละเอียดซับซ้อน สามารถสร้างแบบจำลองแบบสามมิติในกรณีศึกษาได้หลากหลายและวิเคราะห์ได้อย่างแม่นยำด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนท์ [5]

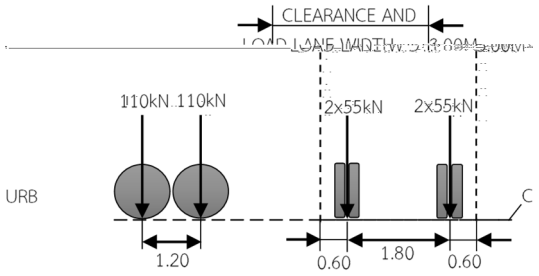
2.2 น้ำหนักบรรทุกจรตามมาตรฐาน AASHTO LRFD

น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ออกแบบสะพานตามมาตรฐาน AASHTO [6] ถูกบัญญัติขึ้นในปี ค.ศ.1993 จึงเป็นที่มาของน้ำหนัก HL-93 จากการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักรถบรรทุกที่ใช้วิ่งในปัจจุบันร่วมกับน้ำหนักบรรทุกแบบ HL-93 จากมาตรฐาน AASHTO ฉบับปี 1993 [6] และ 2007 [7] จึงได้ข้อสรุปเพื่อการปรับปรุงค่าน้ำหนักบรรทุกใหม่ ซึ่งประกอบด้วยน้ำหนัก 3 ชนิดดังนี้

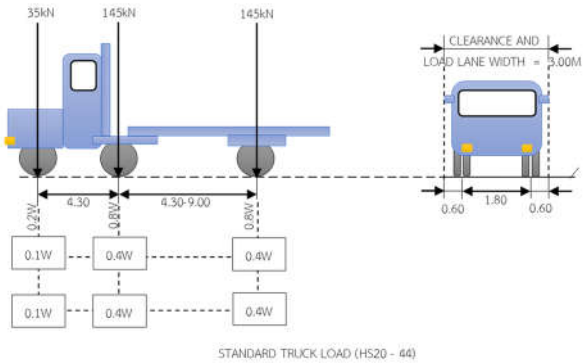
1) Tandem load คือน้ำหนักบรรทุกเป็นจุด (Concentrated Load) ขนาด 110 กิโลนิวตัน จำนวน 2 แรง น้ำหนักบรรทุกมีการจัด วางเรียงห่างกัน 1.20 เมตร มีระยะห่างของล้อตามขวาง 1.80 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งน้ำหนักบรรทุกดังกล่าวจัดเป็นรูปแบบน้ำหนักบรรทุกแบบเฉพาะสำหรับกรณีของรถบรรทุกสองตอนซึ่งมีส่วนรถบรรทุกและส่วนรถพ่วงที่ใช้สำหรับการลำเลียงสิ่งของ สินค้า ตลอดจนยุทโปกรณ์ทางทหารในกิจการสรรพาวุธ

2) Truck load คือชุดของน้ำหนักบรรทุกเป็นจุด ซึ่งประกอบด้วยน้ำหนักบรรทุกขนาด 35 กิโลนิวตัน จำนวน 1 แรง และน้ำหนักบรรทุกขนาด 145 กิโลนิวตัน จำนวน 2 แรง ตามรูปที่ 2 ระยะห่างระหว่างล้อหลังให้ใช้ค่าระหว่าง 4.30 และ 9.00 เมตร โดยจัดวางตำแหน่งล้อรถให้เกิดหน่วยแรงบนสะพานสูงสุด และระยะห่างของล้อในแนวตามยาวของสะพานเท่ากับ 1.80 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1

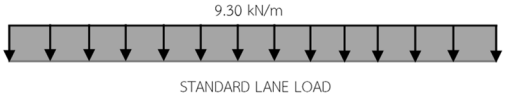
3) Lane Load ประกอบด้วยน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายสม่ำเสมอขนาด 9.30 กิโลนิวตันต่อเมตร กว้าง 3.00 เมตรโดยปราศจากน้ำหนักบรรทุกเป็นจุดดังแสดงในรูปที่ 3 เป็นน้ำหนักชนิดเดียวที่แตกต่างไปจากน้ำหนักจร HS20-44 ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD [7]



รูปที่ 1 Tandem Load



รูปที่ 2 Truck Load



รูปที่ 3 Lane Load

2.3 ความเสียหายของโครงสร้างสะพาน

ในปัจจุบันสะพานส่วนใหญ่ในประเทศไทยได้ผ่านการก่อสร้างมาเป็นเวลานานด้วยโครงสร้างแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้นสะพานส่วนใหญ่จึงมีการชำรุดและต้องมีการเฝ้าระวังอย่างต่อเนื่อง จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบสะพานว่ามีความเสียหายไปมากน้อยเท่าใดเพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้แก่ประชาชนผู้ใช้สะพานในการสัญจรไปมาได้อย่างปลอดภัย ซึ่งใช้การพิจารณาตามเกณฑ์การจัดลำดับสภาพโครงสร้างสะพานของกรมทางหลวง พบว่าสะพานที่ทำการศึกษามีระดับความเสียหายในระดับที่ 4 [8] ซึ่งตัวอย่างความเสียหายของพื้นสะพาน เนื่องจากการหลุดร่อนเฉพาะจุดของคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การหลุดร่อนเฉพาะจุดของคอนกรีต

2.4 แรงเฉือนเจาะ

แรงเฉือนเจาะคือโหมดการวิบัติประเภทหนึ่งที่ต้องพิจารณาประกอบการออกแบบสะพาน เกิดขึ้นในกรณีที่พื้นสะพานหรือชิ้นส่วนโครงสร้างมีค่าแรงเฉือนที่ต้องต้านทาน (shear demand) เกินกว่ากำลังรับแรงเฉือนที่สามารถต้านทานได้ (shear capacity) ส่งผลให้พื้นสะพานเกิดการรวมตัวของหน่วยแรง (stress concentration) จนนำไปสู่การเจาะทะลุของพื้นสะพาน ปัจจัยที่ก่อให้เกิดการวิบัติแบบแรงเฉือนเจาะคือการกระจายน้ำหนักบรรทุกบนพื้นสะพาน ขนาดของเสาตอม่อ กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้ก่อสร้างสะพาน ความหนาของพื้นสะพาน ตลอดจนปริมาณและการจัดเรียงเหล็กเสริมในชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน

การวิบัติของสะพานเนื่องจากแรงเฉือนเจาะส่งผลต่อชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานในหลายส่วน พื้นสะพานเป็นชิ้นส่วนที่รับผลกระทบโดยตรงมากที่สุดเนื่องจากเป็นจุดที่เกิดการวิบัติซึ่งโดยทั่วไปสามารถสังเกตได้จากลักษณะการแตกละเอียดของคอนกรีตในส่วนพื้นสะพาน นอกจากนี้ เหล็กเสริมในองค์อาคารอื่นของสะพานอาจเกิดความเสียหาย จนนำไปสู่การสูญเสียกำลังและเสถียรภาพของเสาและจุดต่อระหว่างเสาและพื้นสะพาน

สิ่งที่ไม่สามารถมองข้ามได้อีกประเด็นคือความเชื่อมโยงระหว่างการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนเจาะ แผ่นพื้นไร้คาน ฐานรากตื้น และน้ำหนักบรรทุกเนื่องจากยานพาหนะแบบ HS-20 กล่าวคือ แผ่นพื้นไร้คานถือเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างที่ได้รับความนิยมให้เป็นชิ้นส่วนพื้นสะพานเนื่องจากให้ความสะดวกในการก่อสร้างชิ้นส่วนช่วงพาดยาว ในส่วนของฐานรากตื้น ถือว่าเป็นระบบฐานรากที่เหมาะสมต่อการรองรับโครงสร้างสะพานเพราะก่อสร้างได้ง่าย ราคาไม่สูง ไม่ต้องใช้อุปกรณ์พิเศษเพื่อทำงานขุดดินลึก นอกจากนี้ น้ำหนักบรรทุกเนื่องจากยานพาหนะแบบ HS-20 ถือเป็นน้ำหนักบรรทุกมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบสะพานและถือเป็นการจำลองน้ำหนักบรรทุกของยานพาหนะที่มีน้ำหนักไม่เกิน 90 กิโลนิวตัน อย่างไรก็ตาม การให้น้ำหนักบรรทุกแบบ HS-20 กระทำต่อสะพานที่ตั้งอยู่บนฐานรากตื้นและมีแผ่นพื้นไร้คานเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างถือเป็นกรณีการรับน้ำหนักบรรทุกที่เสี่ยงต่อการเกิดการวิบัติการวิบัติของสะพานเนื่องจากแรงเฉือนเจาะอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้แรงเฉือนเจาะเป็นประเด็นที่ต้องให้ความสำคัญในงานวิจัยนี้

2.4.1 ความสัมพันธ์เบื้องต้นระหว่างแรงเฉือนในคานและแรงเฉือนเจาะในพื้น

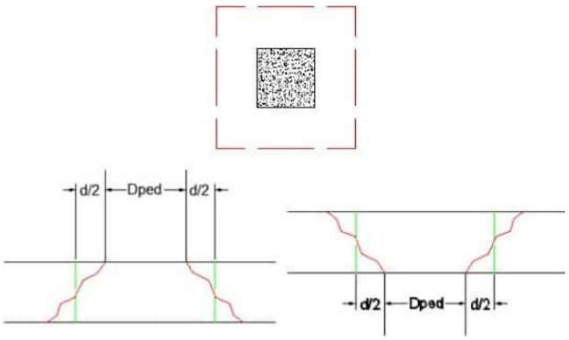
ในการวิเคราะห์อย่างง่าย แรงเฉือนเจาะในพื้นสามารถพิจารณาได้จากการคำนวณแรงเฉือนในคานแบบสองมิติ ซึ่งถือเป็นแนวทางในการคำนวณการกระจายแรงเฉือนในคาน แรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปสู่การหากำลังและสติฟเนทของคานภายใต้แรงเฉือน รูปแบบการวิบัติของคานหรือพื้นภายใต้แรงเฉือนจัดเป็นการวิบัติแบบฉับพลันเนื่องจากเหล็กเสริมทำหน้าที่เป็นส่วนประกอบหลักในการรับแรงเฉือน หากแรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกมีค่าเกินกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนรวมของหน้าตัดองค์อาคาร จะส่งผลให้คานหรือพื้นเกิดการวิบัติทันที ซึ่งการเสื่อมลดของความสามารถต้านทานแรงเฉือนจะส่งผลต่อกำลังรับแรงดัดของหน้าตัดร่วมด้วย [9-11]

จากการเปรียบเทียบระหว่างแรงเฉือนในเกอร์เดอร์และแรงเฉือนเจาะในกรณีทั่วไป พบว่าแรงเฉือนเจาะจะมีค่าน้อยกว่าแรงเฉือนในเกอร์เดอร์ ซึ่งแรงเฉือนเจาะมักปรากฏขึ้นในส่วนโครงสร้างพื้นในกรณีที่พื้นมีการรับน้ำหนักบรรทุกขนาดใหญ่ โดยเฉพาะน้ำหนักบรรทุกเนื่องจากยานพาหนะหนัก ฉะนั้น มาตรฐานทั่วไปที่ได้รับการยอมรับในสากล [3, 12-14] จึงมีการพิจารณาแรงเฉือนเจาะเพื่อให้แน่ใจว่าโครงสร้างสามารถต้านทานการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนเจาะได้

2.4.2 การคำนวณแรงเฉือนเจาะ

การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนเจาะในชิ้นส่วนโครงสร้างพื้นสามารถทำนายได้ผ่านสูตรอย่างง่ายที่พัฒนาขึ้นจากประสบการณ์ของวิศวกรผู้ออกแบบ หรือวิธีการออกแบบโดยตรงซึ่งประยุกต์ใช้หลักความสมดุลเพื่อคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของพื้นโดยใช้ข้อมูลหน้าตัดพื้น การเสริมเหล็กและสมบัติวัสดุ [7, 12-13]

หน่วยแรงเฉือนเจาะสูงสุด (Maximum Punching Shear Stress) สามารถคำนวณได้จากการพิจารณารูปทรงกรวยที่จำลองการวิบัติของแรงเฉือนเจาะ (Punching shear failure cone) และ การพิจารณาค่าของแรงเฉือนและโมเมนต์กระทำต่อโครงสร้าง



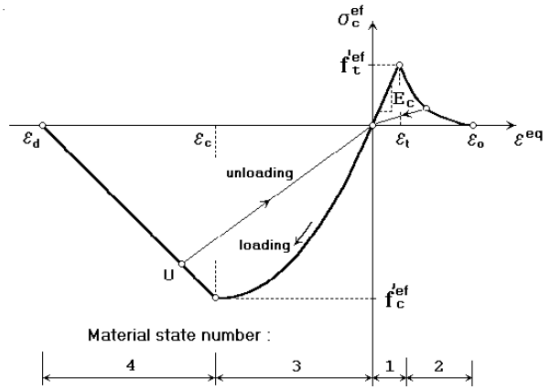
รูปที่ 5 การเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนเจาะในส่วนเหนือพื้น และ บริเวณใต้พื้น

ค่า d คือความลึกประสิทธิผล (Effective depth) ของพื้น เส้นรอบวงของแรงเฉือนเจาะนั้นจะเกิดขึ้นที่ระยะ d/2 จากขอบของหัวเสาแสดงในรูปที่ 5

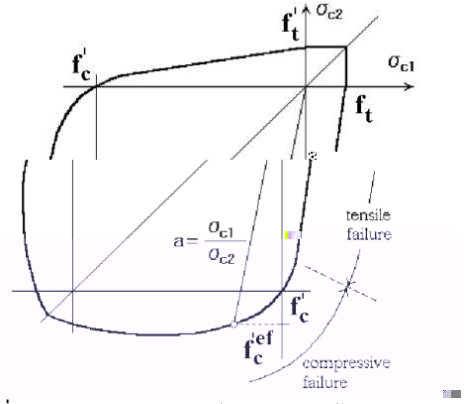
นอกจากนี้ การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนเจาะสามารถประเมินได้ผ่านการทดสอบขนาดเท่าจริงในห้องปฏิบัติการ [15-19] อย่างไรก็ตาม การทดสอบถือเป็นแนวทางที่ต้องใช้เวลาดำเนินการและมีค่าใช้จ่ายที่สูง รวมถึงการคำนวณด้วยสูตรอย่างง่ายและการออกแบบโดยวิธีตรงได้ถูกจำกัดความแม่นยำในการทำนายพฤติกรรมของพื้น การประยุกต์ใช้กับโครงสร้างที่ซับซ้อนอาจทำได้ลำบากเนื่องจากสูตรมีความเฉพาะเจาะจงกับรูปร่างรูปทรงของพื้นหน้าตัดสี่เหลี่ยม อีกทั้งในกรณีที่โครงสร้างสะพานเกิดโมเมนต์ดัดที่เสาตอม่อ จะทำให้การคำนวณแรงเฉือนเจาะทำได้ยากเพราะแรงเฉือนที่จุดต่อระหว่างเสาและพื้นสะพานถูกควบคุมโดยโมเมนต์ดัด การกระจายน้ำหนักบรรทุกในโครงสร้างจึงมีความซับซ้อนมากขึ้น ส่งผลให้งานวิจัยนี้พิจารณาเลือกใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนท์ในการคำนวณความสามารถต้านทานแรงเฉือนสูงสุดของพื้นสะพาน

3. แบบจำลองโครงสร้างสะพานสิริลักษณ์

การวิเคราะห์พฤติกรรมไม่เชิงเส้นของคอนกรีตใน ATENA จะใช้แบบจำลอง fracture-plastic [20] ประกอบด้วยทฤษฎีเชิงกลของการแตกหัก (Fracture mechanics theory) เสนอพฤติกรรมการรับแรงดึงในคอนกรีตและทฤษฎีพลาสติก (Plasticity theory) เสนอพฤติกรรมรับแรงอัด ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดได้ดังรูปที่ 6 และแบบจำลองวัสดุคอนกรีตในโปรแกรม ATENA ได้พิจารณาถึงการวิบัติภายใต้แรงกระทำสองแนวแกนอีกด้วย (Biaxial Failure) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแต่ละแนวแกนเป็นไปตามแบบจำลองของ Kupfer and Gerstle (1973) [21] ดังแสดงในรูปที่ 7

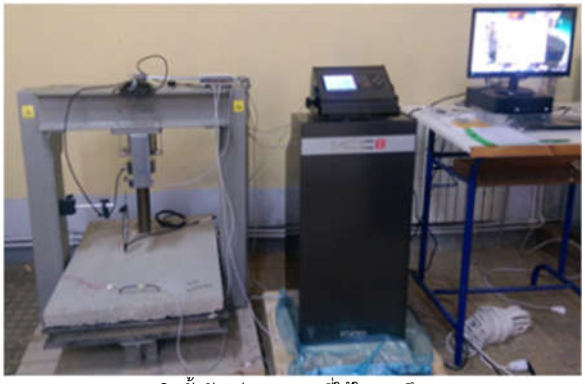


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตภายใต้การรับแรงดึงและแรงอัด

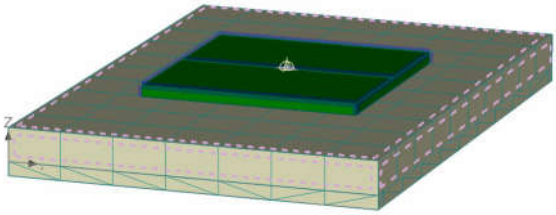


รูปที่ 7 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสองแนวแกนตามแบบจำลองของ Kupfer and Gerstle (1973)

ในกระบวนการตรวจสอบยืนยันเพื่อแสดงถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง จะใช้ผลการทดลองจากงานวิจัยในอดีต [17] ซึ่งได้ใช้แผ่นพื้นอย่างง่าย ขนาดความกว้าง 680 มิลลิเมตร ความยาว 965 มิลลิเมตร และความหนา 60 มิลลิเมตร ซึ่งจำลองให้ชิ้นส่วนรองรับน้ำหนักและมีจุดยึดรั้งตามสภาพการทดสอบจริงตามรูปที่ 8 ให้น้ำหนักบรรทุกกระทำที่จุดกึ่งกลางของพื้นทดสอบและตรวจวัดระยะการโก่งตัวภายใต้แผ่นพื้นขณะที่เพิ่มแรงกระทำจนถึงการวิบัติ โดยที่คุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กเสริมจะใช้หลักการคำนวณอ้างอิงตาม model code 2010 [22] ในการสร้างแบบจำลอง



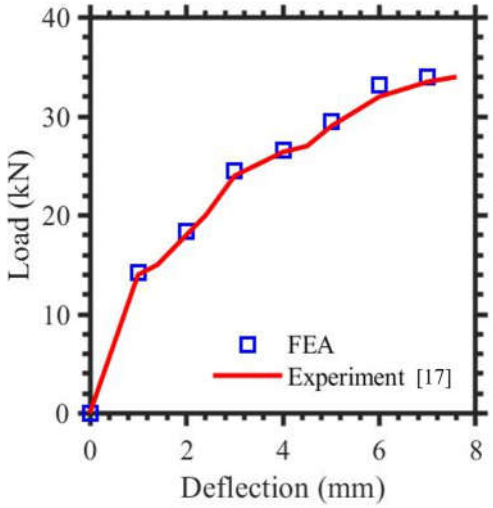
(ก) การติดตั้งตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษา [17]



(ข) แบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อตรวจสอบยืนยัน

รูปที่ 8 กระบวนการตรวจสอบยืนยันของแบบจำลองที่สร้างด้วย 3D-ATENA

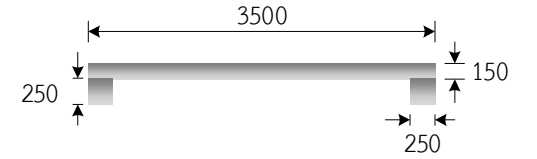
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโก่งตัว ของผลทดสอบตัวอย่างขนาดเท่าจริงและ ผลการวิเคราะห์สะพานด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนท์ โดยใช้โปรแกรม 3D ATENA พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวมีแนวโน้มใกล้เคียงกันดังแสดงตามกราฟในรูปที่ 9 ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟนท์เอลิเมนท์ได้รับการตรวจสอบการลู่เข้าของผลเฉลยโดยการพิจารณาเลือกใช้ขนาดของเอลิเมนท์ในช่วง 10 ถึง 20 มิลลิเมตร และได้ข้อสรุปว่าผลเฉลยจากแบบจำลองมีแนวโน้มลู่เข้าในกรณีที่ใช้เอลิเมนท์ขนาด 12 มิลลิเมตร ส่งผลให้งานวิจัยนี้พิจารณาเลือกใช้เอลิเมนท์ขนาด 10 มิลลิเมตร ในการจำลองปัญหา



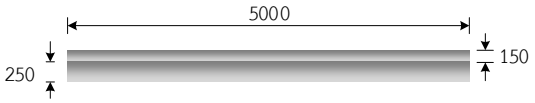
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงและการโก่งตัว จากการทดลองจริง เปรียบเทียบกับ ผลที่ได้จากการคำนวณ ด้วยโปรแกรม 3D ATENA

ส่วนของสะพานสิริลักษณ์ที่ได้นำมาพิจารณา จะพิจารณาเฉพาะส่วนที่เป็นโครงสร้างคอนกรีตซึ่งคือพื้นของสะพานใน 1 ช่วง มีความยาว 5,000 มิลลิเมตร ความกว้าง 3,500 มิลลิเมตร ความหนา 150 มิลลิเมตร และมีเกอร์เดอร์จำนวน 2 เกอร์เดอร์ เหล็กเสริมในสะพานสิริลักษณ์เป็นเหล็กข้ออ้อยขนาด 16 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างเส้น 34 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 10

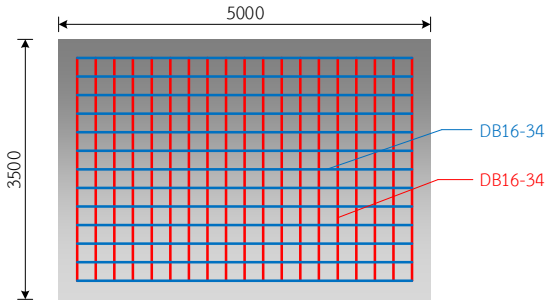
แบบจำลองสะพานอ้างอิงจากระบบพิกัดฉากตามรูปที่ 11(ก) รวมถึงมีการกำหนดเงื่อนไขสภาวะขอบเขตเชิงเรขาคณิต (Geometric boundary condition) ของแบบจำลองให้การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของพื้นผิวในบริเวณท้องเกอร์เดอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ตามพื้นที่แรเงาในรูปที่ 11(ข) และเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ลักษณะคงรูป (Rigid body motion) จึงจำเป็นต้องกำหนดให้การเคลื่อนที่ในแนวระนาบของจุดบนท้องเกอร์เดอร์อย่างน้อยหนึ่งจุดมีค่าเท่ากับศูนย์ นอกจากนี้ เงื่อนไขสภาวะขอบเขตธรรมชาติ (Natural boundary condition) ของแบบจำลอง มีการกำหนดให้มีน้ำหนักบรรทุกเป็นจุดกระทำต่อแผ่นเหล็กขนาด 510 x 250 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 11(ค) ซึ่งแผ่นเหล็กถือเป็นการจำลองขนาดของล้อรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO [11]



(ก) รูปตัดช่องจราจรตามขวาง

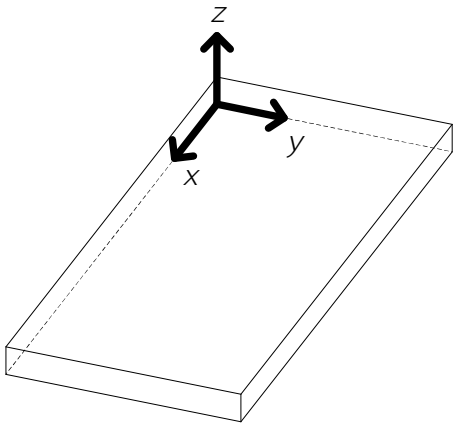


(ข) รูปตัดตามยาว

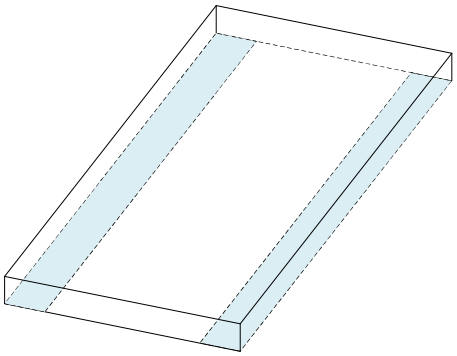


(ค) มุมมองด้านบนของสะพาน และรายละเอียดการเสริมเหล็ก

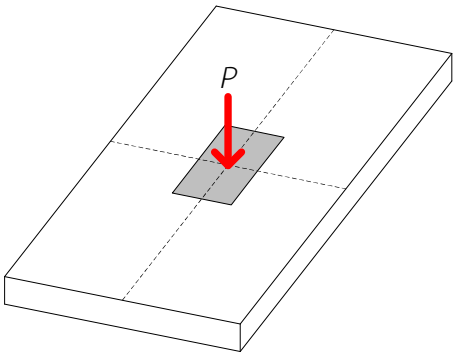
รูปที่ 10 รูปตัดแบบจำลองสะพาน มีหน่วยความยาวเป็นมิลลิเมตร



(ก) ระบบพิกัดที่ใช้ในแบบจำลอง



(ข) เงื่อนไขสภาวะขอบเขตเชิงเรขาคณิต



(ค) เงื่อนไขสภาวะขอบเขตธรรมชาติ

รูปที่ 11 ภาพร่างแสดงรายละเอียดแบบจำลอง

อ้างอิงจากรูปที่ 8(ข) หากกำหนดให้ x และ y คือตำแหน่งใดๆบนแบบจำลอง และสมมติให้จุดกำเนิด (Origin) เป็นจุดที่ใช้ป้องกันการเคลื่อนที่ลักษณะคงรูป จะสามารถเขียนได้ว่าเงื่อนไขสภาวะขอบเขตเชิงเรขาคณิตคือ

$$u_z(x,y,0)=0; \quad x\in[0,5000], y\in[0,250]$$
$$u_z(x,y,0)=0; \quad x\in[0,5000], y\in[3250,3500]$$
$$u_x(0,0,0)=u_y(0,0,0)=0$$

จากรูปที่ 11(ค) หากกำหนดให้ P คือน้ำหนักบรรทุกค่าใดๆที่ตรวจวัดได้จากแบบจำลอง จะสามารถเขียนเงื่อนไขสภาวะขอบเขตธรรมชาติให้อยู่ในรูปของน้ำหนักบรรทุกเป็นจุดที่กระทำบนโหนดของแบบจำลองได้ดังนี้

$$P_z(2500,1750,150)=-P$$

เกณฑ์การวิบัติ (Failure criterion) ของคอนกรีตได้รับการจำลองด้วยเกณฑ์ของแรงคืน (Rankine) ร่วมกับแบบจำลองพลาสติกของ Menétrey and Willam [23] สำหรับในส่วนของเหล็กเสริม ได้มีการสมมติให้การยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเป็นแบบเส้นตรงสองช่วง (Bilinear) ซึ่งสมมติให้เหล็กเสริมภายใต้หน่วยแรงดึงและหน่วยแรงอัดมีพฤติกรรมเดียวกันและไม่พิจารณาผลของการโก่งเดาะในเหล็กเสริม [24] ถึงแม้ว่าพื้นสะพานในบริเวณข้างเคียงจะส่งผลต่อกำลังต้านทานการวิบัติแบบแรงเฉือนเจาะ แต่งานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาผลของพื้นสะพานในบริเวณข้างเคียงเนื่องจากเป็นการนำเสนอแนวทางเบื้องต้นสำหรับศึกษาความอ่อนไหวของแบบจำลองสะพานในหนึ่งช่องจราจรเท่านั้น เพื่อให้ได้ค่ากำลังต้านทานที่อยู่ในข้างปลอดภัยมากที่สุด ผลของพื้นสะพานในบริเวณข้างเคียง ตลอดจนผลของการมีส่วนร่วมของเหล็กเสริมและวัสดุเสริมแรงอื่นที่มีต่อกำลังต้านทานการวิบัติแบบแรงเฉือนเจาะจึงถือเป็นประเด็นที่สามารถต่อยอดในงานวิจัยในอนาคตได้

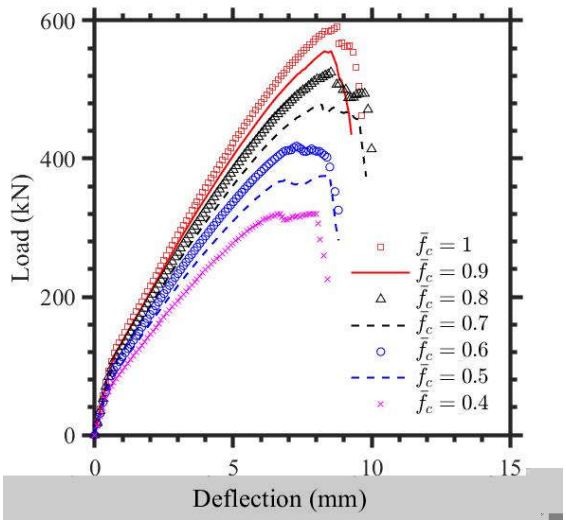
4. ผลการวิจัย

4.1 การหากำลังต้านทานสูงสุดในกรณีที่แบบจำลองรับน้ำหนักบรรทุกเป็นจุด

เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงสร้างพื้นสะพานต่อการวิบัติแบบแรงเฉือนเจาะ ส่งผลให้แบบจำลองมีการปรับลดค่า $\bar{f}_c$ ซึ่งในบทความนี้นิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้ในแบบจำลอง ($f'_{c,FEM}$) และกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ระบุของสะพานจริง (f'_c) โดยที่ค่า f'_c ซึ่งตรวจวัดจากสะพานมีค่าเท่ากับ 30 เมกะปาสกาล

อัตราส่วนที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้อยู่ระหว่าง 0.4 และ 1 สำหรับเหตุผลที่กำหนดให้ $\bar{f}_c=0.4$ เป็นอัตราส่วนที่ต่ำที่สุดที่ใช้ในงานวิจัยนี้คืออัตราส่วนดังกล่าวเป็นแนวคิดในข้างปลอดภัย (Conservative approach) ซึ่งมีการใช้งานในทางปฏิบัติและสะท้อนความจริงที่ว่าโครงสร้างจะเกิดวิบัติควบคุมโดยหน่วยแรงเฉือน ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืนหยุ่นและโมดูลัสเฉือนภายใต้สมมติฐานระนาบหน่วยแรงระนาบ (Plane stress) ที่กำหนดให้อัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตเป็นไปตามค่ามาตรฐานที่ 0.2

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของพื้นสะพานซึ่งคำนวณจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นไปตามรูปที่ 12 เกณฑ์หยุดการวิเคราะห์แบบจำลองเป็นไปตามสมมติฐานที่กำหนดให้กำลังคงค้าง (Residual strength, P_r) ของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตมีค่าเท่ากับร้อยละ 80 ของกำลังสูงสุดที่โครงสร้างสามารถรับได้ [25]



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของสะพานคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดประลัยต่างกัน

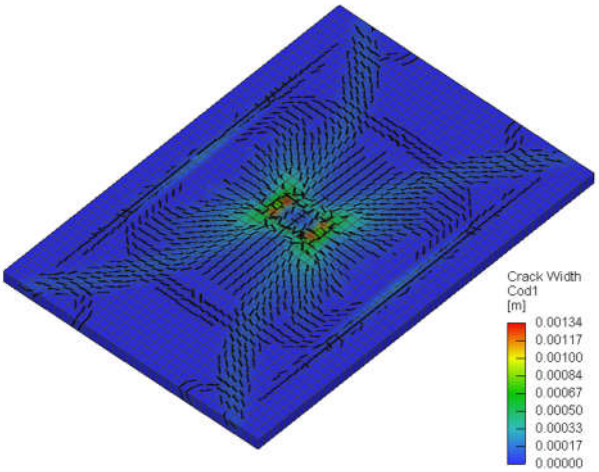
นอกเหนือจากกำลังสูงสุดที่พื้นสะพานสามารถรับได้ (P_{max}) งานวิจัยนี้ได้นิยามให้สติฟเนทเริ่มต้น (K_0) คำนวณจากความชันของความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของสะพานคอนกรีตในช่วงที่เป็นเชิงเส้น จัดอยู่ในช่วงที่สะพานมีการโก่งตัวในช่วง 0.3 และ 0.4 มิลลิเมตร

ตารางที่ 1 สติฟเนทเริ่มต้นและน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของสะพานคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดประลัยต่างกัน

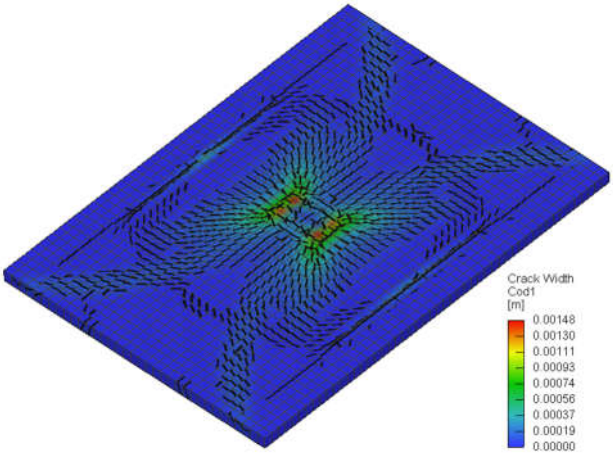
$\bar{f}_c$	K_0 (kN/mm)	P_{max} (kN)
1.0	191.1	590.6
0.9	183.8	555.5
0.8	175.9	524.9
0.7	167.0	478.5
0.6	157.1	418.2
0.5	145.9	375.8
0.4	133.0	320.5

จากการพิจารณารูปที่ 12 สามารถสรุปค่า K_0 และ P_{max} ของสะพานคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดประลัยต่างกันได้ตามที่ปรากฏในตารางที่ 1 โดยพบว่าในกรณีที่กำลังรับแรงอัดประลัยของสะพานคอนกรีตในงานวิจัยนี้ลดลงร้อยละ 40 จะส่งผลให้ K_0 และ P_{max} ลดลงร้อยละ 69.6 และ 54.3 ตามลำดับ และในส่วนของกำลังคงค้าง พบว่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดประลัยของสะพานคอนกรีตที่ร้อยละ 40 ส่งผลต่อการลดลงของ P_r ที่ร้อยละ 48.8

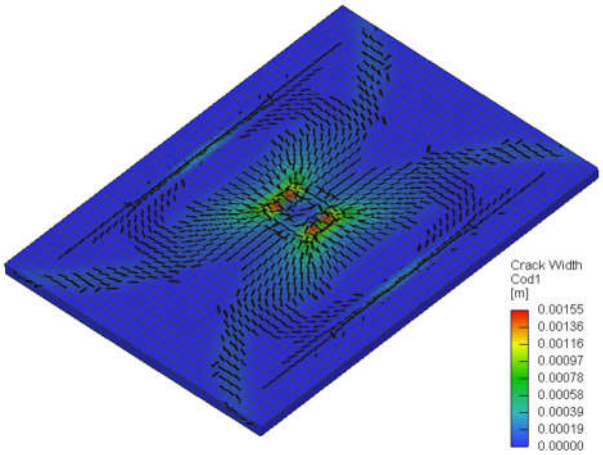
รอยร้าวของสะพานคอนกรีตที่สภาวะวิบัติเป็นไปตามรูปที่ 13 ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาแสดงเฉพาะกรณีที่ $\bar{f}_c$ มีค่าเท่ากับ 1 0.6 และ 0.4 โดยเห็นได้ชัดว่ากรณีที่ $\bar{f}_c = 1$ ตรวจพบว่ามีรอยร้าวกระจายตัวมากที่สุด ซึ่งมีแนวโน้มเกิดจากการที่เอลิเมนท์มากมีสภาวะของหน่วยแรง (State of stresses) อยู่ภายนอกขอบเขตของพื้นผิวการวิบัติ (Failure surface) ในขณะที่กรณี $\bar{f}_c = 0.6$ มีรอยร้าวกระจายตัวน้อยลง และปริมาณรอยร้าวมีการกระจายตัวน้อยที่สุดในกรณี $\bar{f}_c = 0.4$ โดยเมื่อสังเกตที่ปริมาณความเข้มข้นของรอยแตกร้าวบริเวณที่จุดกึ่งกลาง พบว่ากรณีที่คอนกรีตกำลังรับแรงอัดประลัยน้อยที่สุดจะมีความเสียหายของขนาดความกว้างรอยร้าวมากที่สุด ซึ่งถือว่ามีความสมเหตุสมผลเนื่องจากปริมาณการกระจายตัวของรอยร้าวในคอนกรีตจะสัมพันธ์กับขนาดของแรงกดที่กระทำต่อสะพานและกำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต ในกรณีทั่วไปที่คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดประลัยน้อยลง จะส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดึงลดลงและนำไปสู่การแตกร้าวของคอนกรีตที่กระจายตัวน้อยลงและมีความเข้มข้นที่จุดกึ่งกลางมากขึ้นด้วย



(ก) $\bar{f}_c = 1$



(ข) $\bar{f}_c = 0.6$

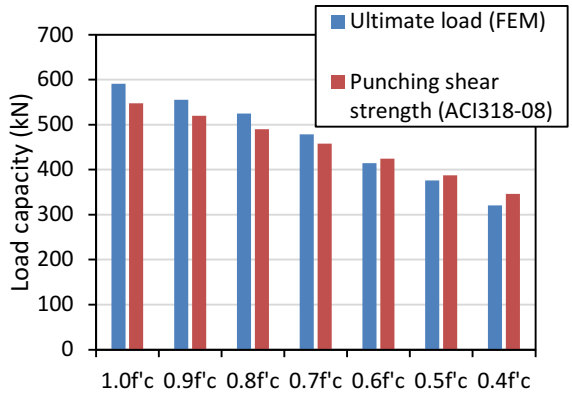


(ข) $\bar{f}_c = 0.4$

รูปที่ 13 รอยร้าวของสะพานคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดประลัยต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับมาตรฐาน ACI318 ตามรูปที่ 14 ผลกรณี $\bar{f}_c$ มีค่า 0.7 ถึง 1 อยู่ในช่วงร้อยละ 4.45 และ 7.87 ในขณะที่กรณี $\bar{f}_c$ มีค่าระหว่าง 0.4 และ 0.6 พบว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่

ทำนายจากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณจากมาตรฐาน ACI318 อยู่ในช่วงร้อยละ 1.39 และ 7.45 ตามลำดับ



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบการคำนวณด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนท์ และการคำนวณตามมาตรฐาน ACI318 [13]

5. สรุปผลการวิจัย

บทความนี้ศึกษาความอ่อนไหวของแบบจำลองพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนท์โดยมีค่าสติฟเนทเริ่มต้น กำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุด และความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวเป็นตัวแปรที่พิจารณา รวมถึงมีการเปรียบเทียบกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุดจากแบบจำลองร่วมกับการคำนวณตามมาตรฐาน ACI318 ซึ่งจากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ในกรณีที่กำลังรับแรงอัดประลัยของสะพานคอนกรีตในงานวิจัยนี้ลดลงร้อยละ 40 จะส่งผลให้ K_0 และ P_{max} ลดลงร้อยละ 69.6 และ 54.3 ตามลำดับ และในส่วนของกำลังคงค้าง พบว่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดประลัยของสะพานคอนกรีตที่ร้อยละ 40 ส่งผลต่อการลดลงของ P_r ที่ร้อยละ 48.8

2. กรณีที่ $\overline{f}_c = 1$ ตรวจพบว่ามีรอยร้าวกระจายตัวมากที่สุด ในขณะที่กรณี $\overline{f}_c = 0.6$ มีรอยร้าวกระจายตัวน้อยลง และปริมาณรอยร้าวมีการกระจายตัวน้อยที่สุดในกรณี $\overline{f}_c = 0.4$ ซึ่งในทางตรงกันข้ามความกว้างรอยแตกร้าวที่จุดกึ่งกลางจะเกิดขึ้นมากกว่ากรณีที่ $\overline{f}_c$ สูงกว่า

3. ในช่วงที่ $\overline{f}_c$ มีค่าระหว่าง 0.7 และ 1 กำลังต้านทานแรงเฉือนที่ทำนายจากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณจากมาตรฐาน ACI318 อยู่ในช่วงร้อยละ 4.45 และ 7.87 ในขณะที่กรณี $\overline{f}_c$ มีค่าระหว่าง 0.4 และ 0.6 พบว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่ทำนายจากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณจากมาตรฐาน ACI318 อยู่ในช่วงร้อยละ 1.39 และ 7.45

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบุคลากรสำนักก่อสร้างสะพาน บุคลากรศูนย์สะพานสิริลักษณ์ จังหวัดราชบุรี และบุคลากรกรมทางหลวงที่ให้การสนับสนุนด้วยดีและให้ความอนุเคราะห์เพื่อให้คณะผู้วิจัยได้เข้าไปตรวจสอบสภาพสะพาน นอกจากนี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องอุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวง. (2565). *ข้อมูลทรัพยากร: ปริมาณจราจรบนทางหลวงปี 64*, 15 มีนาคม 2565.

[2] Shu, J., Fall, D., Plos, M., Zandi, K., & Lundgren, K. (2015). Development of modelling strategies for two-way RC slabs. *Engineering Structures*, 101, pp. 439-449.

[3] Tilly, G. P., Owen, D. G., & Molzahn, R. (1988). Fatigue of Concrete Structures, State-of-the-Art-Report. *Bulletin d'Information*, (188).

[4] Gallego, J. M., Zanuy, C., & Albajar, L. (2014). Shear fatigue behaviour of reinforced concrete elements without shear reinforcement. *Engineering Structures*, 79, pp. 45-57.

[5] Zheng, Y., Robinson, D., Taylor, S., & Cleland, D. (2009). Finite element investigation of the structural behaviour of deck slabs in composite bridges. *Engineering Structures*, 31(8), pp. 1762-1776.

[6] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2002). Standard specifications for highway bridges, 17th. AASHTO. *Washington, DC*.

[7] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2007). AASHTO LRFD bridge design specifications, 4th Ed., *Washington, DC*.

[8] สำนักก่อสร้างสะพาน ระบบการบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน กรมทางหลวง. (2555). *คู่มือการสำรวจและตรวจสอบสะพาน*, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[9] Cope, R. J. (Ed.). (1987). *Concrete bridge engineering: performance and advances*. CRC Press.

[10] Chen, W. F., & Duan, L. (Eds.). (2014). *Bridge Engineering Handbook: Construction and Maintenance*. CRC press.

[11] Obrien, E. J., Keogh, D., & O'Connor, A. (2014*). Bridge deck analysis*. CRC press.

[12] Code, P. (2005). Eurocode 2: design of concrete structures-part 1–1: general rules and rules for buildings. *British Standard Institution*, London.

[13] ACI Committee. (2019). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary. American Concrete Institute.

[14] Standard, B. (1997). Structural Use of Concrete: Code of Practice for Design and Construction, Part 1, BS 8110. *Br. Stand. Institution, UK*.

[15] Hwang, H., Yoon, H., Joh, C., & Kim, B. S. (2010). Punching and fatigue behavior of long-span prestressed concrete deck slabs. *Engineering Structures*, 32(9), pp. 2861-2872.

[16] Grimaldi, A., Meda, A., & Rinaldi, Z. (2013). Experimental behaviour of fibre reinforced concrete bridge decks subjected to punching shear. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), pp. 811-820.

[17] Gherdaoui, M., Guenfoud, M., & Madi, R. (2018). Punching

[18] Amir, S., Van Der Veen, C., Walraven, J. C., & De Boer, A.

Parametric study.pr , encer d ( ). t