

การตรวจสอบและวิเคราะห์สะพานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในภาคสนาม

ประเทือง อินคุ้ม¹, ทนงศักดิ์ อิ่มใจ², ชยากร พานิชพัฒน์³, สิกันต์ มณี⁴

¹กรรมการผู้จัดการ (prataung@iec-thailand.com)

²วิศวกรโครงสร้าง (thanongsak@iec-thailand.com)

³วิศวกรโครงสร้าง (chayakorn@iec-thailand.com)

⁴วิศวกรโครงสร้าง (sikarn@iec-thailand.com)

International Engineering Consultants Co., Ltd, (IEC)

บทคัดย่อ : วิธีการตรวจสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถประเมินได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกจริงบนสะพานที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงในองค์ประกอบของระบบสะพาน แล้วนำผลที่ได้มาสร้างแบบจำลองโครงสร้างสะพานเพื่อวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักสูงสุดที่โครงสร้างสามารถรับได้ อย่างไรก็ตาม การประเมินสภาพการรับน้ำหนักของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น ขึ้นอยู่หลายปัจจัย รวมทั้งประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ทดสอบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองจริงตามสภาพหรือชนิดของวัสดุที่ประกอบกันเป็นโครงสร้างสะพาน ภายใต้การรับน้ำหนักจรจากยานพาหนะไปจนถึงน้ำหนักประลัย ซึ่งการใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังแสดงผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างได้ใกล้เคียงกับสภาพโครงสร้างจริง บทความนี้เสนอวิธีการการประเมินน้ำหนักบรรทุกทุกของสะพานที่มีสภาพชำรุดแห่งหนึ่งทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ประกอบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อจำลองแบบคาน เสาค่อม และแผ่นพื้นของระบบสะพาน ผลการวิเคราะห์ที่ได้ ถูกนำมาเปรียบเทียบผลการทดสอบในภาคสนาม เพื่อใช้ในการประเมินน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยสูงสุดของสะพาน

ABSTRACT : Behavior of existing bridge with poor conditions was studied using fully instrumented bridge load testing. The performance-based assessment of reinforced concrete bridges, however, depends highly on the efficiency and reliability of an analytical model used to describe the behavior of their constituent materials and their interaction under various loading conditions ranging from service to ultimate levels. The implementation of numerical techniques such as finite element analysis (FEA) can provide a powerful tool to enhance understanding of such issue. This paper presents FE modeling and simulation of the bridge due to a moving vehicle load. The FE modeling based on the linear static formulation of beam elements and plate elements was adopted to model the tested bridge. The FE model was applied to simulate the behavior of the complete bridge structure under the action of a defined load. Numerical results from FEA were compared to the data obtained from a field test. Sensitivity studies were also investigated for the bridge stiffness and end-support parameters. Based upon the implementation of the numerical technique, the load capacity of the bridge that can be determined. This study serves as a baseline estimation of the load capacity that the bridge can be safety carried.

KEYWORDS : Bridge load test, Bridge, Finite element Analysis, FEA , Strain, Load capacity.

1 บทนำ

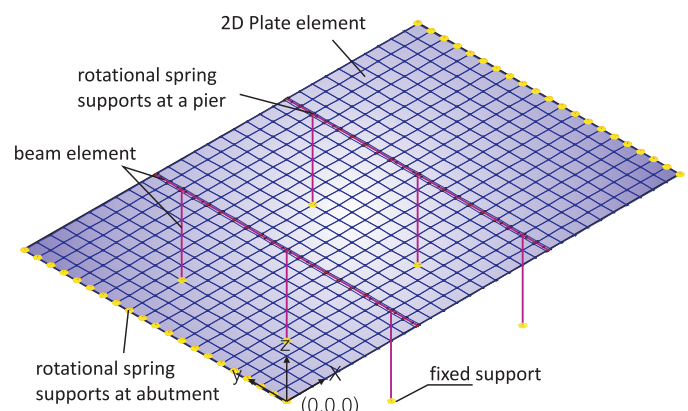
สะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในพื้นที่ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือส่วนใหญ่มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน (> 30 ปี) และมีการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีต ตามระยะเวลา ทำให้ประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของโครงสร้างลดน้อยลง และการออกกฏกระทรวงเมื่อวันที่ 28 ธันวาคม 2548 อนุญาตให้เพิ่มน้ำหนักบรรทุกจาก 21 ตัน เป็น 25 ตัน ก็อาจทำให้มีผลต่อการรับน้ำหนักปลอดภัยของโครงสร้างสะพาน นอกจากนี้สภาพแวดล้อมก็เป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อสภาพของโครงสร้างเช่นกัน ดังนั้นเพื่อให้สะพานของกรมทางหลวงมีความปลอดภัยในการใช้งาน จึงมีการศึกษาและตรวจสอบความปลอดภัยในการใช้งานของสะพาน และศึกษาผลกระทบจากปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับสะพานประเภทอื่น ๆ จากการตรวจสอบเบื้องต้น พบว่าสะพานประเภท Slab Type มีการใช้งานมากที่สุด ดังนั้นการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่ปลอดภัยของสะพานประเภทนี้จึงมีความจำเป็น อีกทั้งพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งตั้งอยู่ในลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบลุ่มซึ่งมีน้ำไหลท่วมเสาตอม่อของสะพาน เกือบตลอดปี และอาจพัดพายุพัดต่าง ๆ ที่อาจทำให้โครงสร้างสะพานเกิดการเสียหาย และส่งผลต่ออายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของโครงสร้างสะพาน[1,2] การทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก โดยวิธีใช้น้ำหนักบรรทุกจริงจากรถบรรทุกวิ่งบนพื้นสะพาน (Bridge Load Test) เป็นวิธีที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในหลายประเทศ เพราะสามารถตรวจสอบได้โดยทันทีว่าโครงสร้างสะพานมีพฤติกรรมตอบสนอง ต่อน้ำหนักบรรทุกจริงอย่างไร อย่างไรก็ตามก็ตามการประเมินสภาพการรับน้ำหนักของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น ขึ้นอยู่หลายปัจจัยรวมทั้งประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์การทดสอบและแบบจำลองสะพาน เพื่อแสดงถึงพฤติกรรมการตอบสนองจริงตามสภาพหรือชนิดของวัสดุที่ประกอบกันเป็นโครงสร้างสะพาน ภายใต้การรับน้ำหนักจากรยานพาหนะไปจนถึงสภาพการรับน้ำหนักประลัยนั้น การใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงผลการทดสอบได้อย่างมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับสภาพโครงสร้างจริง

บทความนี้เสนอวิธีการประเมินน้ำหนักบรรทุกของสะพาน ประกอบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์

เมนต์โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อจำลองแบบคานเสาตอม่อ และแผ่นพื้นของระบบสะพาน โดยผลการวิเคราะห์ จะนำมาเปรียบเทียบผลการทดสอบในภาคสนาม เพื่อใช้ในการประเมินน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยสูงสุดของสะพาน

2 การวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน

การวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน โดยเริ่มจาก การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานขึ้นมา เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทั้งระบบ โดยใช้ข้อมูลจากแบบก่อสร้างสะพาน ประกอบกับข้อมูลการสำรวจสภาพปัจจุบัน และผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุของสะพาน มาใช้สร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างสะพานและทำการวิเคราะห์ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) หลักเกณฑ์และวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน เป็นไปตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน AASHTO[3] ตัวอย่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างพื้นสะพาน แสดงไว้ในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ตัวอย่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

2.1 น้ำหนักบรรทุกและแรงต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์

การวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน น้ำหนักบรรทุกและแรงกระทำ เป็นไปตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน AASHTO ดังนี้

น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load)

น้ำหนักบรรทุกคงที่ คือน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อสะพานอยู่ตลอดเวลา สำหรับโครงสร้างส่วนบน (Superstructure) ของสะพาน น้ำหนักบรรทุกคงที่ที่จะประกอบด้วย น้ำหนักของพื้นสะพาน ผิวถนน ทางเท้า ราวสะพาน แผงกันตก (Parapet)

นำหน้าส่วนโครงสร้างหลัก (Main Member) นำหน้าส่วนโครงสร้างรอง (Secondary Member) นำหน้าป้ายสัญลักษณ์และอุปกรณ์สาธารณูปการอื่น ๆ ทั้งหมด สำหรับโครงสร้างส่วนล่าง (Substructure) ของสะพาน นำหน้าบรรทุกทุกครั้งที่ประกอบด้วยนำหน้าของโครงสร้างเสาตอม่อ คานยึดเสา และคานขวาง เป็นต้น ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน นำหน้าบรรทุกทุกครั้งที่พิจารณาตามเงื่อนไขของข้อกำหนดและสภาพจริงของสะพาน

นำหน้าบรรทุกจร (Live Load)

นำหน้าบรรทุกจรหลักๆ บนสะพานจะขึ้นอยู่กับภาระจรที่เคลื่อนที่ไปตามแนวของช่วงสะพาน (ตามแนวช่องจราจร) และชนิดนำหน้ารถบรรทุกที่กระทำ โดยทั่วไปการออกแบบโครงสร้างสะพานจะอ้างอิงขนาดนำหน้าบรรทุกมาตรฐาน ตามมาตรฐาน AASHTO ชนิด 1.3 x HS20-44 ทั้ง Truck Load และ Lane Load ดังแสดงในภาพที่ 2 และ 3 ตามลำดับ (สำหรับสะพาน Slab Type ซึ่งมีช่วงความยาวน้อย Truck Load จะทำให้เกิดหน่วยแรงสูงสุดในโครงสร้าง ดังนั้น Lane Load จึงไม่ถูกนำมาพิจารณา Lane Load จะทำให้เกิดหน่วยแรงสูงสุดในโครงสร้างเมื่อช่วงสะพานยาวมากกว่า 39 เมตร โดยประมาณ)

ในการวิเคราะห์และประเมินสภาพโครงสร้างสะพานนี้ จะใช้นำหน้าบรรทุกมาตรฐานชนิด 1.3 x HS20-44 Truck Load และนำหน้าบรรทุกของรถบรรทุกสิบล้อไทยขนาด 25 ตัน ตามมาตรฐานกรมทางหลวง (ภาพที่ 4)

แรงกระแทกของนำหน้าบรรทุกจร (Impact Load)

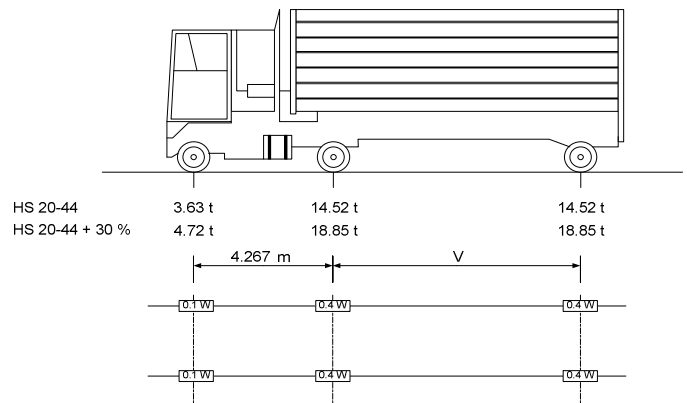
ผลจากแรงกระแทกของนำหน้าบรรทุกจร ที่ใช้ในการวิเคราะห์ จะพิจารณาโดยใช้ค่าปัจจัยการกระแทก (Impact Factor) คูณกับนำหน้าบรรทุกจร โดยที่ค่าปัจจัยการกระแทกสามารถหาได้ดังสมการ

$$I = \frac{15.24}{L + 38} \quad (1)$$

เมื่อ I = ค่าปัจจัยการกระแทก (มีค่าสูงสุดไม่เกินร้อยละ 30)

L = ความยาวช่วงสะพาน (เมตร)

Truck Load

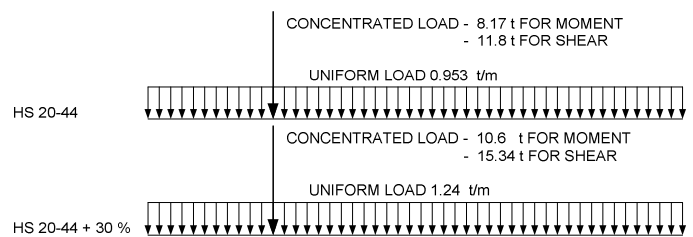


W = นำหน้าของ 2 เพลาแรก ซึ่งมีค่าเท่ากับระบบ H

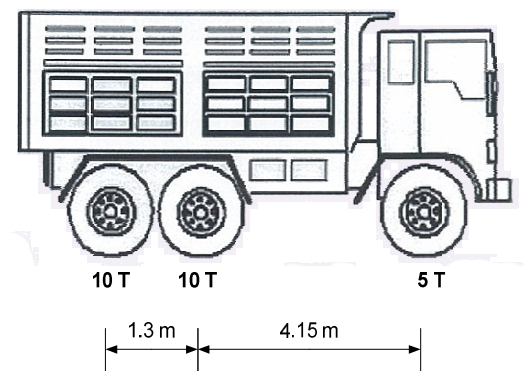
V = ระยะห่างระหว่างเพลาหลังมีค่าแปรเปลี่ยนระหว่าง 4.27 ม. ถึง 9.44 ม.

ภาพที่ 2 นำหน้าบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO ชนิด HS20-44 เพิ่มนำหน้าร้อยละ 30 แบบ Truck Load

Lane Load



ภาพที่ 3 นำหน้าบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO ชนิด HS20-44 เพิ่มนำหน้าร้อยละ 30 แบบ Lane Load

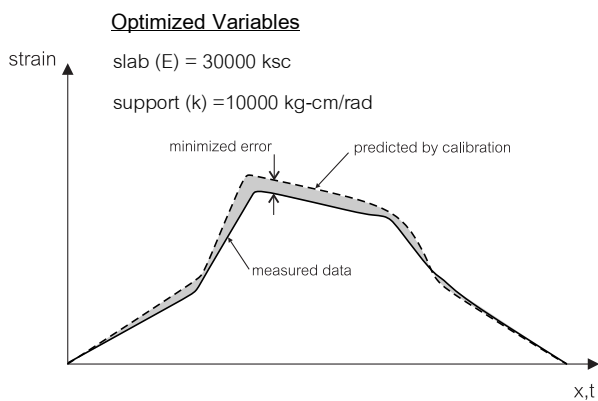


ภาพที่ 4 รูปแบบนำหน้าบรรทุกจรถบรรทุกสิบล้อไทยขนาด 25 ตันตามมาตรฐานกรมทางหลวง

2.2 การปรับปรุงแบบจำลองโครงสร้าง

แบบจำลองโครงสร้างทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นที่สร้างขึ้นโดยใช้ข้อมูลตามแบบก่อสร้าง (แสดงในภาคผนวก ก) จะถูกนำมาเปรียบเทียบโดยใช้ผลการทดสอบการรับน้ำหนัก ตามข้อแนะนำของ AASHTO เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีพฤติกรรมโครงสร้าง

สอดคล้องกับความเป็นจริงมากที่สุด สำหรับการปรับค่าการปรับค่าอิลาสติก โมดูลัสของแผ่นพื้นและค่าการยึดรั้งบริเวณฐานรองรับ ในที่นี้จะกำหนดให้ฐานรองรับแผ่นพื้นเป็นฐานรองรับแบบสปริง โดยจะทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้จริงในการทดสอบการรับน้ำหนักในสนาม ได้แก่ ค่าของการแอ่นตัวของสะพาน และค่าหน่วยความเครียดในตำแหน่งสำคัญต่าง ๆ (เช่น แนวกลางสะพานด้านล่าง แนวกลางสะพานด้านบน และบริเวณใกล้ฐานรองรับด้านล่าง) จากนั้นทำการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ จนกระทั่งได้ค่าความเครียดในชิ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบในสนามมากที่สุด (หลักการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองแสดงไว้ในภาพที่ 5) ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับแก้สร้างแบบจำลองสะพานแสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 5 การปรับแก้กราฟความเครียดของแบบจำลองกับผลการทดสอบ

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับแก้สร้างแบบจำลองสะพาน

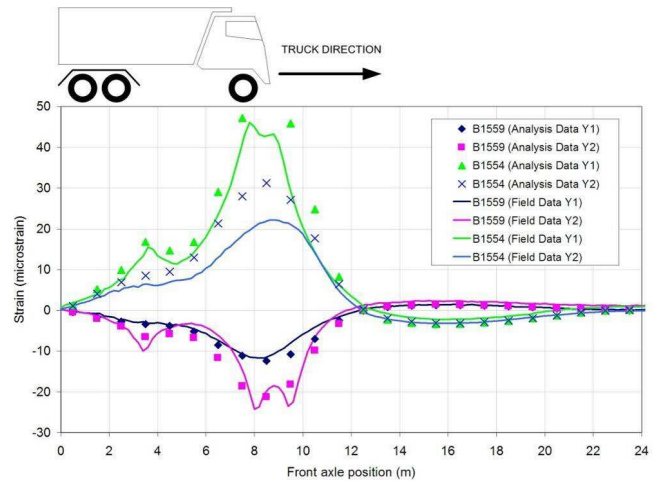
Parameters	Initial	Optimized	Unit
Elastic	2.5×10^5	5.005×10^5	ksc
Rotational	0*	4.851×10^{10}	kg-cm/rad
Rotational		8.2005×10^7	kg-cm/rad

Remark: * setting an initial value = 0 represents unrestraint condition.

2.3 ผลการวิเคราะห์ที่โครงสร้างสะพาน

ผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดที่เกิดขึ้น ในโครงสร้างสะพาน ได้นำมาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากสนาม พบว่า ค่าที่ได้จากแบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง (ภาพที่ 6) ทั้งนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าที่วัดได้จริงจะมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผลจากการวิเคราะห์ เนื่องจาก สมมุติฐานในการสร้างแบบจำลองนั้นและระเบียบวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์

ไฟไนต์เอลิเมนต์ มิได้มีการคำนึงถึงผลจากการลดลงของอิลาสติก โมดูลัส ของระบบโครงสร้างคอนกรีต อันเป็นผลเนื่องจากการแตกร้าว (macro cracks) ของโครงสร้างจริง[4] อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบ 2 มิติ นอกจากจะมีการประมวลผลที่เร็วแล้วยัง สามารถให้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ในสนาม และอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



ภาพที่ 6 การเปรียบเทียบค่าความเครียดที่บริเวณต่างๆของโครงสร้างสะพาน ตามแนววิ่งของรถบรรทุก Y1 และ Y2

3 การวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของสะพาน

การประเมินหาค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของสะพาน ทำได้โดยการนำผลการวิเคราะห์โครงสร้างที่ได้จากแบบจำลองโครงสร้างมาทำการปรับปรุงจนมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับโครงสร้างจริงแล้ว มาหาค่าแรงภายในสูงสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของโครงสร้างสะพาน ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างหลักคือ พื้นสะพาน คาน และเสาตอม่อ โดยใช้กำลังอัดประลัยของคอนกรีต แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังความสามารถรับแรงของหน้าตัดนั้นๆ รายละเอียดวิธีการคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักสูงสุด

พื้นสะพาน		คานตอม่อ		เสาตอม่อ
M	F_v	M	F_v	F_a
(kg-m)	(kg/m)	(kg-m)	(kg)	(kg)
33,384	20,657	24,692	27,101	90,000

Note: M = โมเมนต์ดัด, F_v = แรงเฉือน F_a = แรงกด

ตารางที่ 3 ค่า Rating Factor ของระบบโครงสร้างสะพาน

Rating Factor	พื้นสะพาน		คานต่อม่อ		เสาต่อม่อ
	M	F _v	M	F _v	F _a
R _{inv}	1.37	2.37	3.08	2.63	2.38
R _{opr}	2.29	3.95	5.14	4.38	3.96

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์กำลังสูงสุดที่ส่วนประกอบโครงสร้างสะพานสามารถรับน้ำหนักได้ และ ตารางที่ 3 แสดงค่า Rating Factor พบว่าโครงสร้างที่มีความเสี่ยงต่อการวิบัติก่อนคือ พื้นสะพาน (R_{in}=1.37) รองลงมาคือ เสาและลำดับสุดท้ายคือ คานขวาง ซึ่งจากผลของการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า สะพานที่ทำการทดสอบนั้นยังคงมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกได้สูง ผลการประเมินน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ปลอดภัย และ น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ยอมให้ จากค่าดัชนีความปลอดภัย Rating Factor ของสะพานที่ทดสอบ พบว่า น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ปลอดภัย (inventory level) เท่ากับ 34.25 ตัน และน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (operating level) ที่ยอมให้เท่ากับ 57.25 ตัน

4 สรุปผลการศึกษา

จากการประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของพื้นสะพาน คานขวาง และเสาต่อม่อ ของสะพานทดสอบ โดยพิจารณา ร่วมกับผลวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า สะพานสามารถ รับน้ำหนักบรรทุก ตามกฎกระทรวง ที่เพิ่มขึ้นจาก 21 ตัน มาที่ 25 ตันได้ โดยมีลำดับการวิบัติ คือ พื้นสะพาน คานขวาง และลำดับสุดท้ายคือ เสาต่อม่อ

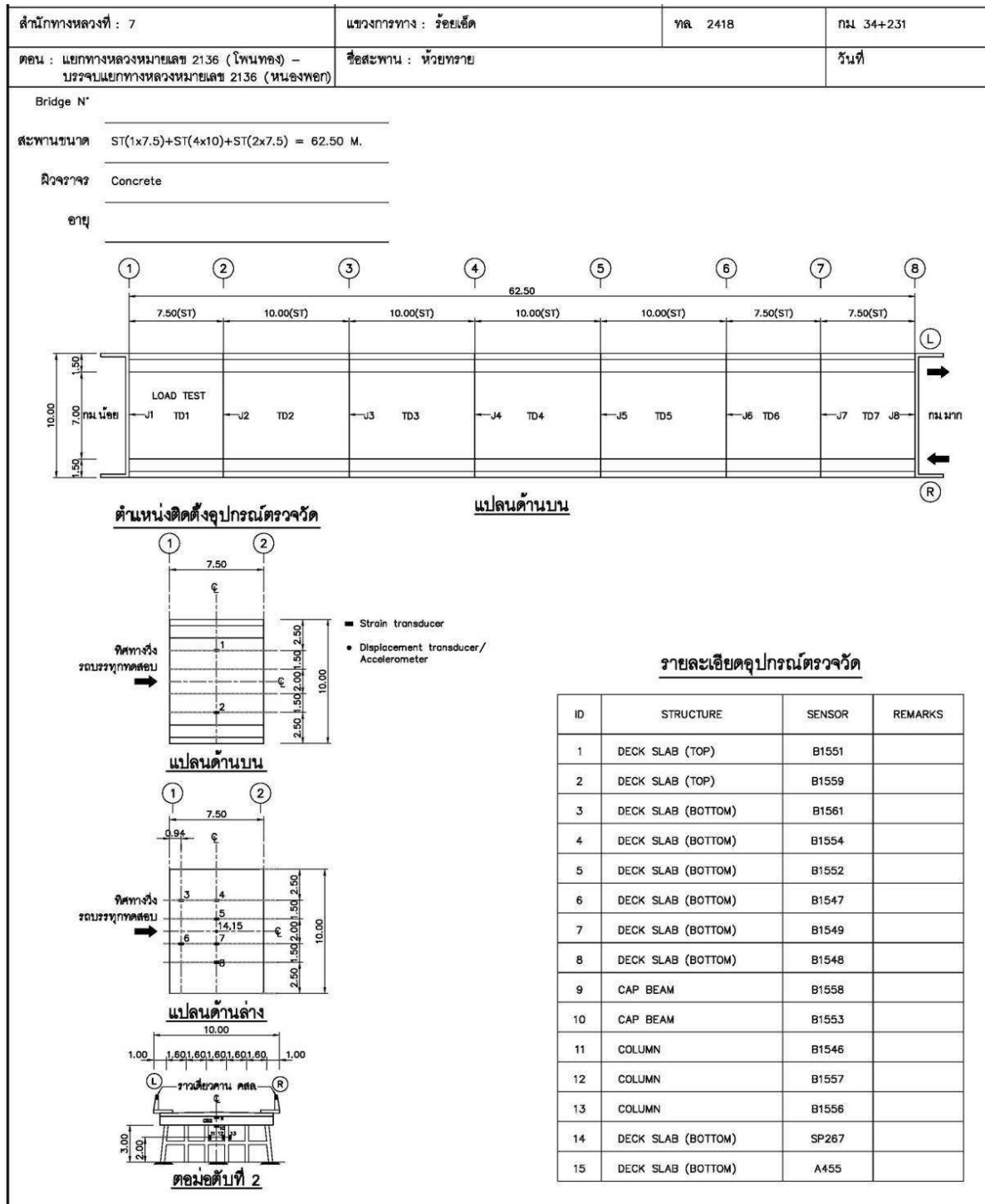
เอกสารอ้างอิง

- [1] บริษัท อินเตอร์เนชั่นแนล เอ็นจิเนียริง คอนซัลแต้นส์ จำกัด, 2552. โครงการสำรวจสภาพความเสียหายและทดสอบการรับน้ำหนักของ

สะพานแบบ SLAB TYPE ในพื้นที่ สำนักทางหลวงที่ 3 (สกลนคร), สำนักทางหลวงที่ 7 (อุบลราชธานี), สำนักทางหลวงที่ 8 (นครราชสีมา). สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม

- [2] ประเทือง อินคัม, ทนงศักดิ์ อิ่มใจ, ชยากร พานิชพัฒน์, สิگانต์ มณี. 2553. การศึกษาพฤติกรรมของสะพานที่มีสภาพชำรุดภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกไทยขนาด 25 ตัน. ในงานประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 12-14 พฤษภาคม 2553.
- [3] ASSHTO LRFD, 2000. *Bridge Design Specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D C.
- [4] ทนงศักดิ์ อิ่มใจ, 2552. Shear crack induced deformation of FRP RC beam. PhD Thesis, The University of Sheffield. Sheffield, UK.

ภาคผนวก ก แบบรายละเอียดสะพานที่ทำการวิเคราะห์



ภาคผนวก ข ตัวอย่างการวิเคราะห์หาค่าล้ารับน้ำหนักปลอดภัยของโครงสร้างสะพาน

AASHTO แนะนำการประเมินสภาพการรับน้ำหนักของสะพานสามารถแสดงในรูปของ Rating Factor โดยเปรียบเสมือนเป็น Safety Factor ของโครงสร้างสะพาน ซึ่งหากมีค่าต่ำกว่า 1 แสดงว่าโครงสร้างมีความแข็งแรงไม่เพียงพอ การคำนวณหา Rating Factor ของโครงสร้างจะพิจารณา 2 แบบคือ

1. Operating Rating Factor

เป็นระดับการใช้งานสะพานโดยปลอดภัยภายใต้น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ยอมรับให้จากยานพาหนะในสภาวะที่ไม่ปกติหรือสภาวะที่ยอมรับให้เกิดขึ้นได้เป็นบางครั้งคราว น้ำหนักบรรทุกที่เกินกว่าค่านี้จึงไม่ควรยอมรับให้แล่นผ่านสะพาน

$$RF_{(opr)} = \frac{\phi_i(R_u) - 1.3DL}{1.3LL(1 + I)}$$

**2. Inventory Rating Factor**

เป็นระดับการใช้งานสะพาน โดยปลอดภัยภายใต้น้ำหนักบรรทุกจรจากยานพาหนะในสภาวะปกติหรือสม่ำเสมอตลอดอายุการใช้งานที่ไม่จำกัด

$$RF_{(inv)} = \frac{3}{5} RF_{(opr)}$$

เมื่อ	ϕ_i	=	สัมประสิทธิ์ตัวคูณลดกำลังของโครงสร้าง อันเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของส่วน โครงสร้าง
		=	1.00 สำหรับสภาพดี (ระดับ 5)
		=	0.95 สำหรับสภาพพอใช้ (ระดับ 4)
		=	0.90 สำหรับสภาพพอใช้ (ระดับ 3)
		=	0.85 สำหรับสภาพชำรุด (ระดับ 2)
		=	0.80 สำหรับสภาพชำรุด (ระดับ 1)
	R_u	=	กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของโครงสร้าง
	DL	=	ภาระน้ำหนักเนื่องน้ำหนักบรรทุกคงที่
	LL	=	ภาระน้ำหนักเนื่องน้ำหนักบรรทุกจร
	I	=	สัมประสิทธิ์แรงกระแทก

สะพาน ที่ทำการทดสอบ มีความยาวช่วงสะพาน 7.50 เมตร พิจารณาหาความสามารถในการรับน้ำหนักของสะพาน จากการสำรวจโดยละเอียด^[1] พบว่าโครงสร้าง ส่วนบนมีสภาพชำรุดของโครงสร้างระดับ 2 ($\phi_i = 0.85$) และ โครงสร้างส่วนล่างแบ่งออกเป็น คานตอม่อซึ่งมีระดับสภาพเท่ากับ 4 ($\phi_i = 0.95$) และเสาตอม่อซึ่งมีระดับสภาพเท่ากับ 3

($\phi_i = 0.90$) การคำนวณหา Rating Factor สามารถแบ่งได้ตามองค์ประกอบ โครงสร้าง และตามแรงที่พิจารณาดังต่อไปนี้

1) โครงสร้างพื้นรับแรงคด

สัมประสิทธิ์ตัวคูณลดกำลังของโครงสร้าง	ϕ_i	=	0.85
กำลังรับแรงคด	R_u	=	33843 กก.-ม./ม.(จากตัวอย่างที่ 6.3-1)
จากการวิเคราะห์ในแบบจำลอง			
โมเมนต์คดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่	DL	=	4745 กก.-ม./ม.
โมเมนต์คดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร 25 ตัน	LL	=	5831 กก.-ม./ม.
สัมประสิทธิ์แรงกระแทก	I	=	$15.24/(7.5+38) = 0.33 > 0.30$
ใช้	I	=	0.30

$$RF_{(opr)} = \frac{\phi_i (R_u) - 1.3DL}{1.3LL(1+I)} = \frac{0.85 \times 33843 - 1.3 \times 4745}{1.3 \times 5831(1+0.30)} = 2.29$$

$$RF_{(inv)} = \frac{3}{5} RF_{(opr)} = \frac{3}{5} \times 2.29 = 1.37$$

2) โครงสร้างพื้นรับแรงเฉือน

สัมประสิทธิ์ตัวคูณลดกำลังของโครงสร้าง	ϕ_i	=	0.85
กำลังรับแรงเฉือน	R_u	=	20657 กก./ม.
จากการวิเคราะห์ในแบบจำลอง			
แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่	DL	=	1115 กก./ม.
แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร 25 ตัน	LL	=	2413 กก./ม.
สัมประสิทธิ์แรงกระแทก	I	=	$15.24/(7.5+38) = 0.33 > 0.30$
ใช้	I	=	0.30



$$RF_{(opr)} = \frac{\phi_i(R_u) - 1.3DL}{1.3LL(1+I)} = \frac{0.85 \times 20657 - 1.3 \times 1115}{1.3 \times 2413(1+0.30)} = 3.95$$

$$RF_{(inv)} = \frac{3}{5} RF_{(opr)} = \frac{3}{5} \times 3.95 = 2.37$$

3) โครงสร้างคานรับแรงค้ำ

สัมประสิทธิ์ตัวคูณลดกำลังของโครงสร้าง $\phi_i = 0.95$

กำลังรับแรงค้ำ $R_u = 24692$ กก.-ม.

จากการวิเคราะห์ในแบบจำลอง

โมเมนต์ค้ำเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ $DL = 7630.81$ กก.-ม.

โมเมนต์ค้ำเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร 25 ตัน $LL = 1558.13$ กก.-ม.

สัมประสิทธิ์แรงกระแทก $I = 15.24/(7.5+38) = 0.33 > 0.30$

ใช้ $I = 0.30$

$$RF_{(opr)} = \frac{\phi_i(R_u) - 1.3DL}{1.3LL(1+I)} = \frac{0.95 \times 24692 - 1.3 \times 7630.81}{1.3 \times 1558.13(1+0.30)} = 5.14$$

$$RF_{(inv)} = \frac{3}{5} RF_{(opr)} = \frac{3}{5} \times 5.14 = 3.08$$

4) โครงสร้างคานรับแรงเฉือน

สัมประสิทธิ์ตัวคูณลดกำลังของโครงสร้าง $\phi_i = 0.95$

กำลังรับแรงเฉือน $R_u = 27101$ กก.

แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ $DL = 2804$ กก.

แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร 25 ตัน $LL = 2985$ กก.

สัมประสิทธิ์แรงกระแทก $I = 15.24/(7.5+38) = 0.33 > 0.30$

ใช้ $I = 0.30$

$$RF_{(opr)} = \frac{\phi_i(R_u) - 1.3DL}{1.3LL(1+I)} = \frac{0.95 \times 27101 - 1.3 \times 2804}{1.3 \times 2985(1+0.30)} = 4.38$$

$$RF_{(inv)} = \frac{3}{5} RF_{(opr)} = \frac{3}{5} \times 4.38 = 2.63$$

5) โครงสร้างเสารับแรงกด

สัมประสิทธิ์ตัวคูณลดกำลังของโครงสร้าง $\phi_i = 0.90$

กำลังรับแรงกด $R_u = 90,000$ กก.

แรงกดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ $DL = 26,075$ กก.

แรงกดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร 25 ตัน $LL = 7041$ กก.

สัมประสิทธิ์แรงกระแทก $I = 15.24/(7.5+38) = 0.33 > 0.30$

ใช้ $I = 0.30$

$$RF_{(opr)} = \frac{\phi_i(R_u) - 1.3DL}{1.3LL(1+I)} = \frac{0.90 \times 90000 - 1.3 \times 26075}{1.3 \times 7041(1+0.30)} = 3.96$$

$$RF_{(inv)} = \frac{3}{5} RF_{(opr)} = \frac{3}{5} \times 3.96 = 2.38$$

โครงสร้างพื้นเป็นโครงสร้างที่มี Rating Factor น้อยที่สุด คือ $RF_{(opr)} = 2.29$ และ $RF_{(inv)} = 1.37$

สำหรับรถบรรทุก 25 ตัน ซึ่งสามารถคำนวณน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยได้ดังนี้

น้ำหนักบรรทุกปลอดภัยที่ระดับ Operation Level = $RF_{(opr)} \times 25$ ตัน = $2.29 \times 25 = 57.25$ ตัน

น้ำหนักบรรทุกปลอดภัยที่ระดับ Inventory Level = $RF_{(inv)} \times 25$ ตัน = $1.37 \times 25 = 34.25$ ตัน

