การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของเสาตอม่อสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้ความเสื่อมสภาพของคอนกรีตจากการตรวจสอบ

Reliability Analysis of Reinforced Concrete Bridge Pier using Inspected Concrete Deterioration

เกวลิน เทพสุภรณ์กุล[1,*] , ธิดารัตน์ วิสุทธิ์เสรีวงศ์[2] และ วิทิต ปานสุข[3]

[1,2] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

**Corresponding author; E-mail address: 6470143121@student.chula.ac.th*

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการก่อสร้างและบำรุงรักษาสะพานได้มีการนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยมาใช้ช่วยในการพัฒนาเป็นจำนวนมาก เพื่อให้มีความสะดวกสบายและความแม่นยำมากยิ่งขึ้น การที่สามารถรู้สภาพความเสียหายและสามารถทำการคาดคะเนความน่าจะเป็นในการชำรุดเสียหายของสะพานได้นั้น จะส่งผลให้เกิดการบำรุงรักษาสะพานได้อย่างทันท่วงที เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการชำรุดและก่อให้เกิดอันตรายแก่ประชาชนผู้ที่สัญจรอยู่บนสะพาน งานวิจัยฉบับนี้จึงทำการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือ (Reliability analysis) ของโครงสร้างตอม่อสะพาน ได้ทำการศึกษากรณีตัวอย่างสะพานข้ามแม่น้ำบริเวณอำเภอเมืองจังหวัดจันทบุรี กม. 330+939.000 ซึ่งมีการใช้งานมายาวนานกว่า 26 ปี เมื่ออายุการใช้งานมากขึ้น สะพานและตอม่อสะพานมีโอกาสเกิดการชำรุดเสียหาย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การชำรุดของตอม่อสะพาน โดยใช้โปรแกรม ATENA จำลองแบบ 3 มิติเสมือนจริง ทำการพิจารณาแรงและการโก่งตัวที่เกิดขึ้น ซึ่งใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) จากนั้นทำการหาค่าดัชนีความเชื่อมั่น (Reliability Index) ของโครงสร้างตอม่อของสะพาน โดยนำผล FEM มาวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของโครงสร้างสะพาน ด้วยโปรแกรม SARA จากการศึกษาพบว่าสามารถนำข้อมูลค่าดัชนีความเชื่อมั่นของโครงสร้าง เพื่อใช้อ้างอิงในการประเมินสภาพปัจจุบันของสะพาน และชี้วัดช่วงเวลาที่ควรทำการบำรุงรักษาต่อไป

คำสำคัญ: โครงสร้างตอม่อของสะพาน, หลักการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ค่าดัชนีความเชื่อมั่น

Abstract

In the modern world, technologies are used to assist in bridge construction and maintenance tasks, leading to a more robust and efficient process. Being able to investigate structural damage conditions and accurately predict the likelihood of structural failure will enable engineering practitioners to effectively plan the bridge maintenance to prevent any catastrophic damage that might occur. This study presents a reliability analysis of the bridge's pier structure, demonstrating a case study of the bridge over the Chanthaburi River, which has been in service for 26 years and is subjected to deterioration under service load over the lifespan. Ultimately, this study aims to analyze the damage of bridge piers by using the 3D Finite Element Method (FEM) analysis, employing ATENA software to simulate the force and the deflection that occurred to determine the Reliability Index of the structure. Consequently, the FEM results will be analyzed further by SARA software to determine the structure's reliability. The results indicate that the reliability index data could be used as a reference in the future to assess the bridge's structural condition and plan for the rehabilitation process in advance.

Keywords: Bridge pier, 3D Finite Element Method, Reliability Index

1. คำนำ

เทคนิคการก่อสร้างสะพานได้มีการพัฒนาและวิวัฒนาการมาอย่างต่อเนื่องโดยการก่อสร้างสะพานในปัจจุบันได้มีการนำความรู้ด้านเทคโนโลยีมาพัฒนาในทั้งด้านการออกแบบและก่อสร้าง เพื่อความถูกต้องแม่นยำและประหยัดเวลา เมื่อเกิดการใช้งานและระยะเวลาผ่านไปสะพานย่อมเกิดการเสื่อมสภาพ โดยเฉพาะคอนกรีตมักเกิดการกะเทาะและเกิดการแตกร้าวทำให้สะพานอาจจะเกิดการชำรุดได้ หากสามารถคาดคะเนได้ว่าสะพานจะเกิดการชำรุดในช่วงเวลาใดจะทำให้สามารถป้องกันและซ่อมบำรุงได้อย่างทันท่วงที

ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์โครงสร้างส่วนที่เป็นตอม่อสะพาน ซึ่งเป็นส่วนที่วิกฤตมากที่สุด ด้วยหลักระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ (3D Finite element method, 3D-FEM) ในการศึกษาใช้โปรแกรม ATENA-3D และ SARA-3D เพื่อสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของเสาตอม่อสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก

งานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโอกาสการเกิดการวิบัติของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงประเภทต่างๆ โดยนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างกำลังที่ผิวคอนกรีตจากสภาพหน้างานจริง ร่วมกับตัวแปรสุ่มต่างๆ เพื่อวิเคราะห์หากำลังรับน้ำหนักของคานสะพานและวิเคราะห์ดัชนีความเชื่อมั่น จากนั้นทำการคาดคะเนความน่าจะเป็นโอกาสการเกิดการวิบัติของสะพาน เพื่อวางแผนการซ่อมบำรุงหรือก่อสร้างใหม่ในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพาน (Bridge deterioration)

2.1.1 สาเหตุความเสื่อมสภาพ

การเสื่อมสภาพส่งผลให้สะพานไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามปกติ ทำให้การเสื่อมสภาพนั้นมีผลกระทบสำคัญกับการออกแบบและการซ่อมแซมบำรุงรักษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง วิศวกรและผู้ดูแลงานสะพานจึงต้องมีความเข้าใจถึงการเสื่อมสภาพของคอนกรีตในสภาวะใช้งานภายใต้สิ่งแวดล้อมต่างๆกัน โดยสามารถจำแนกสาเหตุของการเสื่อมสภาพออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้ [1]

1.การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกายภาพ ได้แก่ การหดตัวแบบแห้ง การทรุดตัว การหดตัวแบบพลาสติก การแข็งตัวและเหลวของน้ำในคอนกรีต

2.การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางเคมี ได้แก่ คาร์บอเนชั่น การกัดกร่อนโดยกรด การกัดกร่อนโดยซัลเฟต ปฏิกิริยาระหว่างด่างกับมวลรวม

3.การเสื่อมสลายโดยสาเหตุทางกล ได้แก่ การขัดสี การชะล้างด้วยกระแสน้ำและกระแสกรวดทราย การแตกตัวของฟองน้ำในอากาศ

4.การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางชีวภาพ ได้แก่ การเสื่อมสภาพโดยตะไคร่ รากพืชหรือแบคทีเรียบางประเภท

5.การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุรวม ได้แก่ การเกิดสนิมในเหล็ก เป็นต้น

2.1.2 การตรวจสอบโครงสร้างสะพานที่เสื่อมสภาพ

การตรวจสอบเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่ใช้จำแนกความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสะพาน ประกอบด้วยขั้นตอนและรายละเอียดต่างๆ ขึ้นอยู่กับวิธีและชิ้นส่วนที่ใช้ในการตรวจสอบ ขั้นตอนในการตรวจสอบสะพานขึ้นอยู่กับประเภทวัสดุที่ใช้และสภาพโดยทั่วไปของสะพาน เพราะฉะนั้นผู้ตรวจสอบจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับสะพานหลากหลายรูปแบบ ในการตรวจสอบจะต้องมีทั้งความรอบคอบและการเก็บข้อมูลที่สมบูรณ์ การสังเกตจะต้องเป็นไปอย่างระมัดระวังและตั้งใจ ร่องรอยของการชำรุดต่างๆต้องได้รับการบันทึกไว้อย่างแม่นยำ

โดยในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเฉพาะความเสียหายที่โครงสร้างส่วนล่าง (Substructure) ของสะพานซึ่งทำหน้าที่ถ่ายเทน้ำหนักบรรทุกจากโครงสร้างส่วนบนลงไปสู่พื้นดิน โดยโครงสร้างส่วนล่าง จะมี 2 รูปแบบคือ ตอม่อริมฝั่ง (Abutments) และฐานรองรับระหว่างช่วงความยาวสะพาน (Intermediate Supports) ตัวอย่างของฐานรองรับระหว่างช่วงความยาวของสะพาน ได้แก่ ตอม่อช่วงกลาง (Bents หรือ Piers) ชิ้นส่วนต่างๆ ของโครงสร้างส่วนล่าง ได้แก่ หัวหุ้ม (Cap) ส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (Above Ground Portion) และส่วนที่อยู่ใต้ผิวดิน (Below Ground Portion) ซึ่งก็รวมถึงตัวฐานราก (Footings) ด้วย

2.2 การตรวจสอบกำลังรับแรงอัดประลัยคอนกรีตโดยวิธีการไม่ทำลาย (NON-DESTRUCTIVE TEST)

การเก็บข้อมูลภาคสนามของงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบคอนกรีตแบบไม่ทำลาย ซึ่งเรียกการทดสอบนี้ได้หลายชื่อด้วยกัน เช่น ทดสอบคอนกรีตแบบค้อนกระแทก (Schmidt hammer) , ทดสอบรีบาวน์แฮมเมอร์สเทส (Rebound Hammer Test)

การทดสอบเพื่อประเมินค่ากำลังอัดของคอนกรีตในโครงสร้างแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Test) ตามมาตรฐาน ASTM C805 โดยประเมินค่ากำลังอัดประลัย หรือค่า Fc' ของคอนกรีต โดยอาศัยหลักการวัดค่าดัชนีสะท้อนกลับ (Rebound Number) ที่เกิดจากการกดแกนทดสอบ (Plunger) และกระบอกทดสอบ (Housing) ให้ตั้งฉากกับผิวคอนกรีต แรงกระแทกจากสปริงภายในจะทำให้แกนทดสอบเกิดการสะท้อนกลับมีค่าดัชนีตั้งแต่ 10 ถึง 100 ขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับพลังงานของผิวคอนกรีต ผิวคอนกรีตที่มีความแข็งมากกว่าจะมีค่าดัชนีสะท้อนกลับสูงกว่า โดยการสรุปผลการทดสอบและการแปลความผลการทดสอบอ้างอิงตามมยผ. 1502-51 มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย เพื่อเป็นมาตรฐานสามารถนำผลการทดสอบไปใช้เพื่อการวิเคราะห์ความความเชื่อมั่นของโครงสร้าง (Reliability Analysis of Structures) ได้อย่างแม่นยำต่อไป

2.3 การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Nonlinear finite element method)

ซอฟต์แวร์ SARA เป็นหนึ่งในแกนหลักของงานวิจัย ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นที่เสมือนจริงของแบบจำลองโครงสร้าง ซึ่งช่วยในการสุ่มและจำลองตัวเลขขึ้น การจำลองเชิงตัวเลขร่วมกับการสุ่มตัวอย่างที่รวมอยู่ในเครื่องมือซอฟต์แวร์ SARA ทำให้เกิดการประเมินในด้านความปลอดภัยขั้นสูง แบบจำลองการคำนวณความต้านทานใน SARA นั้นอิงจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นที่ใช้ในซอฟต์แวร์ ATENA โดยมีพื้นฐานมาจากงานในยุคแรกๆ ของ Cervenka บนแบบจำลองรอยร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็ก [2] โดยวิธีแก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้นจะทำโดยกระบวนการทำซ้ำและแก้ไข (รูปแบบต่างๆ ของวิธีนิวตัน–ราฟสัน) ในตัวทำนาย การแก้ปัญหาจะถูกประเมินด้วยการวิเคราะห์เชิงเส้น โดยพิจารณาจากความตึงของวัสดุหรือความแข็งเริ่มต้นของวัสดุ โดยการแก้ปัญหาจะมีการแปรเปลี่ยนตัวเลขในระยะแก้ไข โดยอ้างอิงจากกฎส่วนประกอบที่ไม่เป็นเชิงเส้น กระบวนการวนซ้ำจะหยุดเมื่อความแตกต่างระหว่างตัวทำนายและตัวแก้ไขนั้นมีขนาดน้อยมากๆ การประมาณค่าที่สมดุลเชิงตัวเลขมีความเกี่ยวข้องกับชิ้นส่วนแบบจำลองทั้งหมด โดยที่ส่วนประกอบโครงสร้าง การกำหนดองค์ประกอบ และกฎของวัสดุ ควรคงไว้แบบเดิม [3]

แบบจำลองคอนกรีต เหล็กเสริม และผลที่คอนกรีตและเหล็กเสริมถูกกระทำ จะบ่งบอกคุณลักษณะที่สำคัญทั้งหมดของพฤติกรรมวัสดุ วัสดุจะแสดงความแข็งแรงที่ลดลงหลังจากค่าความเครียดถึงจุดสูงสุด โดยเทคนิค

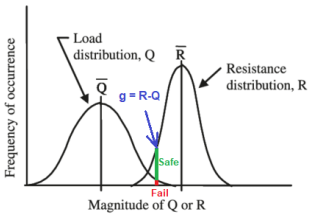
วิธีแถบรอยแตก ซึ่งรอยแตกที่ไม่ต่อเนื่องจะถูกจำลองโดย smeared cracks แบบจำลองการแตกช่วยทำให้แน่ใจว่าพลังงานการแตกหักที่จำเป็นสำหรับการเกิดรอยร้าวจะกระจายไปภายในแถบรอยร้าว เทคนิคนี้สำคัญมากในการลด Mesh effect [4]

คุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีต คือการสะท้อนสถานะความเค้นแบบหลายแกน กล่าวคือ การเพิ่มกำลังอย่างมีนัยสำคัญภายใต้ความเค้นแบบไฮโดรสแตติก โดยโหมดจาก Willam ใช้ใน ATENA สำหรับการสร้างแบบจำลองคอนกรีตภายใต้แรงอัด วิธีการย่อยสลายความเครียด โดยที่ความเครียดทั้งหมดเป็นผลรวมเนื่องมาจากการแตกหัก ถูกใช้เพื่อแก้ปัญหาความเป็นพลาสติก การคืบ ฯลฯ [5]

2.4 การวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของโครงสร้าง (Reliability Analysis of Structures)

ดัชนีความเชื่อมั่น (Reliability index,β) คือดัชนีชี้วัดที่สามารถบ่งบอกโดยประมาณได้ว่าระบบโครงสร้างมีความปลอดภัยมากน้อยเพียงใด ถ้าค่าดัชนีความเชื่อมั่นสูง ค่าโอกาสการพัง (Probability of Failure, Pf) จะต่ำลง สองค่านี้มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันซึ่งกันและกัน ดังนั้นหากโครงสร้างต้องการความปลอดภัยมาก ต้องทำให้ดัชนีความเชื่อมั่นสูง (Reliability index) และค่าโอกาสในการพังต่ำ (Probability of Failure) ตามทฤษฎีหลักการออกแบบโดยทั่วไป [6]

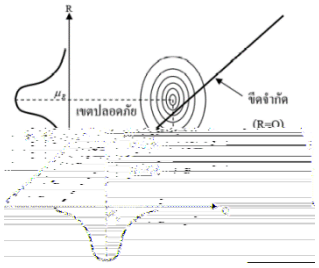
หลักการในการวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของโครงสร้างคือทุกอย่างมีความไม่แน่นอน ทั้งน้ำหนักบรรทุก (Load, Q) และความสามารถในการรับแรง (Resistance, R) จึงมีความน่าจะเป็นและการกระจายตัว ดังรูป



รูปที่ 1 การกระจายตัวของน้ำหนักบรรทุกและความสามารถในการรับแรง [6]

$$g(R,Q) = R - Q \qquad (1)$$

โดย $g(R,Q)$ คือ Limit State Function, R คือความสามารถในการรับแรง ,Q คือน้ำหนักบรรทุก



รูปที่ 2 เขตปลอดภัยและเขตการพังในกราฟ 2 มิติ [7]

จากรูปขอบเขตถูกแบ่งโดยฟังก์ชันขีดจำกัด (R=Q) โดยแบ่งออกเป็น 2 เขต คือเขตปลอดภัยและเขตพัง กล่าวคือถ้า R > Q : ความสามารถในการรับแรงมากกว่าน้ำหนักบรรทุก โครงสร้างจะปลอดภัย ถ้า R < Q : ความสามารถในการรับแรงน้อยกว่าน้ำหนักบรรทุก โครงสร้างจะพัง ดังนั้นสามารถคำนวณโอกาสการพัง คือความน่าจะเป็นที่ R < Q: ความสามารถในการรับแรงน้อยกว่าน้ำหนักบรรทุก [7]

$$P_f = P(R < Q) \qquad (2)$$

โดย P_f คือ ค่าโอกาสการพัง (Probability of Failure, Pf), R คือความสามารถในการรับแรง, Q คือน้ำหนักบรรทุก

ดัชนีความเชื่อมั่น (Reliability index, β) โดยนิยามคือ ระยะทางสั้นที่สุดจากค่าเฉลี่ย (Mean) ของ Limit State Function (g) ไปยังพื้นผิววิบัติ ถ้าคำนวณออกมาเป็นสมการคือ ส่วนกลับของ Coefficient of Variable (COV) หรือ ส่วนกลับของความแปรปรวนของ Limit State Function (g) หรือ อีกนัยหนึ่งคือ Reliability Index คืออัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ย(Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน(Standard Deviation, S.D) [8] แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ ดังรูป

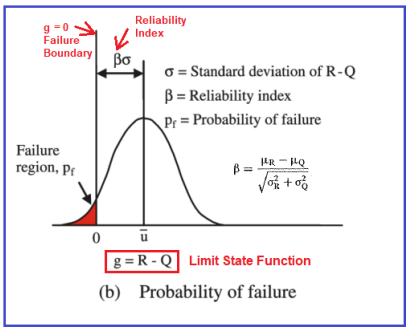


TABLE 5.1 Reliability index β and probability of failure P_f

P_f	β
10^{-1}	1.28
10^{-2}	2.33
10^{-3}	3.09
10^{-4}	3.71
10^{-5}	4.26
10^{-6}	4.75
10^{-7}	5.19
10^{-8}	5.62
10^{-9}	5.99

รูปที่ 3 ดัชนีความเชื่อมั่นและค่าโอกาสการพัง

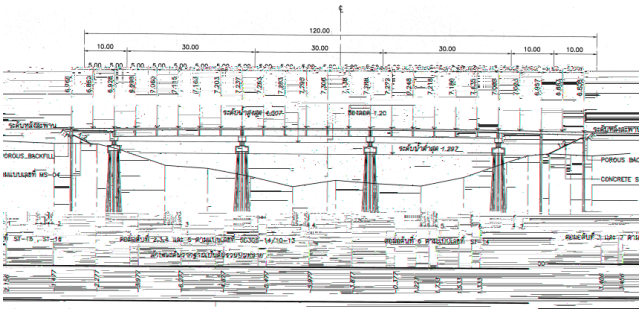
3. ระเบียบวิธีวิจัย

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนโดยเรียงตามลำดับการดำเนินการ ดังนี้ กำหนดปัญหาที่เกี่ยวข้องและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ศึกษาทำความเข้าใจแบบโครงสร้างภาพรวมของโครงการ และศึกษารายละเอียด ทำการสำรวจและตรวจสอบภาคสนามภาพรวมของตอม่อสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี นำผลการทดสอบและสำรวจที่ได้มาวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม ATENA และวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของโครงสร้างตอม่อสะพานด้วยโปรแกรม SARA อภิปรายผลการวิเคราะห์และสรุปผลของงานวิจัย

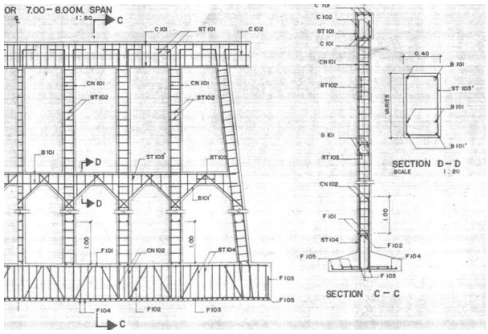
3.1 ศึกษาแบบก่อสร้างจริงของตอม่อสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี

3.1.1 รายละเอียดสะพานที่ศึกษา

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่รายการประกอบแบบของตอม่อสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี โดยจากการศึกษาแบบก่อสร้างจริงของสะพาน พบว่าสะพานแห่งนี้เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงหลัก ได้แก่ ช่วงยาว 10 เมตรเป็นส่วนที่อยู่บนพื้นดินมีทั้งหมด 3 ช่วงย่อย และช่วงยาว 30 เมตร เป็นส่วนที่อยู่กลางน้ำมีทั้งหมด 3 ช่วงย่อย งานวิจัยนี้เป็นการประเมินสภาพโครงสร้างส่วนล่างของสะพานเจาะจงไปยังตอม่อของสะพาน โดยพิจารณาเฉพาะตอม่อตับที่ 6 ซึ่งอยู่บนพื้นดินสามารถเก็บข้อมูลภาคสนามได้อย่างสะดวกและแม่นยำ



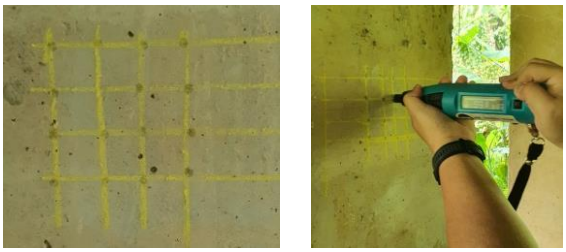
รูปที่ 4 แบบก่อสร้างสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี



รูปที่ 5 แบบก่อสร้างสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรีส่วนตอม่อตับที่ 6

3.1.2 การสำรวจและตรวจสอบตอม่อสะพานจันทบุรีภาคสนาม

การลงภาคสนามสำรวจสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี และทำการวัดระยะจริงเพื่อตรวจสอบความสอดคล้องกันของแบบก่อสร้างและโครงสร้างสะพานจริง โดยจะทำการสำรวจความเสียหายด้วยตาเปล่า จากนั้นจึงทดสอบหากำลังอัดของคอนกรีตที่แท้จริงที่ภาคสนาม ด้วยการใช้ค้อนกระแทก (Schmidt's Hammer) เพื่อให้การสำรวจมีมาตรฐานและความถูกต้อง ได้อ้างอิงจากขั้นตอนการประเมินกำลังอัดของคอนกรีตด้วยการใช้ค้อนกระแทก จากมยผ.1502-51 มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย [9] ทำการกดทั้งหมด 9 เสา เป็นจำนวนทั้งสิ้น 720 จุด โดยกำหนดตำแหน่งทดสอบหลัก 16 จุด ซึ่งแต่ละจุดห่างกันอย่างน้อย 25 มิลลิเมตรตามมาตรฐาน เฉลี่ยค่าทั้ง 16 ค่า โดยกำหนดทุกค่าจะต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยเกิน ±7 และค่าที่นำมาใช้นั้นได้มาจากค่าเฉลี่ยของการกด 1 ชุด



รูปที่ 6 การทดสอบภาคสนามโดย Schmidt's Hammer

3.2 การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างตอม่องสะพาน โดยใช้โปรแกรม ATENA-3D

3.2.1 รายละเอียดแบบจำลอง

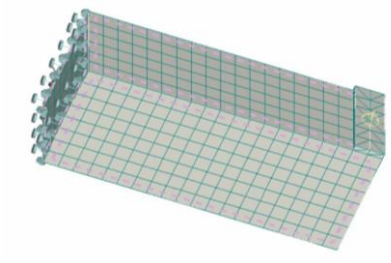
เพื่อให้แบบจำลองมีความใกล้เคียงกับโครงสร้างจริงมากที่สุด คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองมีความสำคัญมากและมีส่งผลต่อผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งโครงสร้างตอม่อสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรีอ้างอิงตามแบบจริงซึ่งใช้แบบมาตรฐานกรมทางหลวง โดยคุณสมบัติของวัสดุที่จะใช้สร้างแบบจำลอง Pile bent มีดังนี้

- คอนกรีตกำลังรับแรงอัด 210 ksc โดยเป็นกำลังอัดคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ (Cube) ที่ 28 วัน
- เหล็กเสริมหลักขนาดหน้าตัดใหญ่กว่า 12 มิลลิเมตร ซึ่งในแบบ Pile bent นี้ใช้ขนาด DB20 และ DB25 โดยใช้ Deformed bar SD30 ; Elastic modulus 200,000 MPa, Yield strength 295 MPa
- เหล็กปลอกขนาดหน้าตัด 9 มิลลิเมตร ใช้ Round bar SR24 ; Elastic modulus 200,000 MPa, Yield strength 235 MPa
- เงื่อนไขการวิเคราะห์แบบจำลองใน ATENA-3D ทำการวิเคราะห์การให้ Load แบบ Displacement control คือ Load กำหนดมาจาก Displacement โดยกำหนดให้กดตรงกึ่งกลาง Cap beam เป็นระยะ Deflection ทีละ 0.1 มิลลิเมตร ทิศลง จากนั้นโปรแกรม ATENA จะทำการวิเคราะห์ค่า Load และในส่วนของจุดรองรับนั้นกำหนดเป็น Fixed support สร้างแบบจำลองเหล็กเสริมหลักแบบ Discrete reinforcement แบบจำลองเหล็กปลอกแบบ Smeared Reinforcement กำหนด Bond ระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตเป็น Perfect bond

3.2.2 Model Verification

ในการวิเคราะห์แบบจำลอง Finite element จำเป็นที่จะต้องทำ Model verification เพื่อเป็นการยืนยันว่าผลลัพธ์ที่ได้มาจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยคอมพิวเตอร์จากโปรแกรม ATENA ถูกต้อง [10] โดยทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมกับการคำนวณมือโดยใช้การวิเคราะห์เชิงเส้น เลือกคานยื่นหน้าตัดขนาดกว้าง 30 ซม ลึก40ซม. ยาว 100 ซม. ให้แรงกระทำที่ปลายคานแบบ Displacement control

จากการเปรียบเทียบทั้ง 2 วิธีค่าต่างกันเพียง 1% ซึ่งมีความใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ด้วยคอมพิวเตอร์จากโปรแกรม ATENA มีความน่าเชื่อถือ

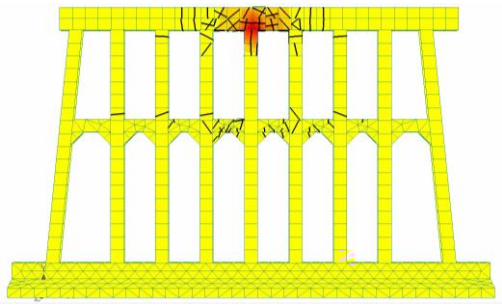


รูปที่ 7 คานยื่นที่ใช้ในกระบวนการทดสอบ

3.2.3 Mesh Convergence Analysis

โดยทั่วไปแล้วการ Mesh ด้วยขนาดละเอียด จะส่งผลให้ผลลัพธ์ FEM ที่ได้เข้าใกล้ Exact solution มากขึ้น แต่ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ของคอมพิวเตอร์ย่อมนานขึ้นตามและในบางกรณีคอมพิวเตอร์อาจคำนวณไม่ไหว ดังนั้นจึงต้องมีการเลือกขนาด Mesh ให้เหมาะสม โดยจะพิจารณาจาก convergence graph ของ Load-Deflection curve, Principal strain และ Crack pattern

สร้างแบบจำลองโดยอ้างอิงตามแบบก่อสร้างของตอม่อสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี กม. 330+939.000 และทำการเลือกขนาด Mesh ให้เหมาะสม โดยในกรณีนี้ได้ทำการวิเคราะห์ convergence graph และขนาด Mesh ที่เหมาะสมคือ ขนาด 40 เซนติเมตร



รูปที่ 8 Crack pattern และ Principal strain ตอม่อสะพาน Mesh 0.4 m.

3.3 การวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของโครงสร้างตอม่อสะพาน โดยใช้โปรแกรม SARA-3D

3.3.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม SARA-3D

การวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของโครงสร้างตอม่อสะพานโดยใช้โปรแกรม SARA-3D มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้ ทำการสร้างและตรวจสอบแบบจำลองของโครงสร้างใน ATENA-3D เลือกสุ่มค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรที่ต้องการจะศึกษา โดยรูปแบบของค่าพารามิเตอร์สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก คือ แบบค่าคงตัว (Deterministic) และแบบค่ากระจายตัว (Distribution) จากนั้นทำการวิเคราะห์แบบจำลองโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวที่ได้ทำการเลือก ในงานวิจัยนี้พารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษา ได้แก่ ค่ากำลังอัดของคอนกรีตซึ่งมีการกระจายตัวแบบ normal distribution นำผลลัพธ์ที่ได้ไปคำนวณหาค่าดัชนีความเชื่อมั่น (Reliability index) และค่าโอกาสการพัง (Probability of Failure) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับ Eurocode เพื่ออธิบายผลต่อไป

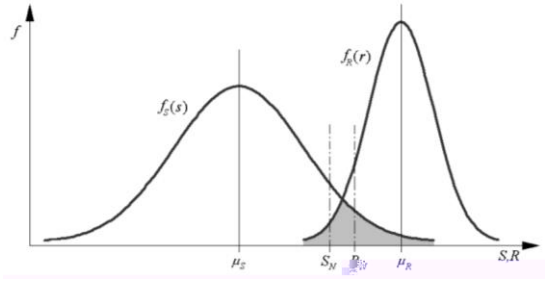
3.3.2 แนวคิดพื้นฐาน (Fundamental concepts)

โดยทั่วไปการออกแบบโครงสร้างต้องคำนึงถึงความปลอดภัย และความทนทานภายใต้น้ำหนักบรรทุก โดยพิจารณาจากตัวแปร 2 ตัว ได้แก่ น้ำหนักบรรทุกและความต้านทานของโครงสร้าง ทั้ง S และ R เป็นตัวแปรแบบสุ่มในธรรมชาติ [11] การสุ่มจะเป็นไปตามฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่สอดคล้องกันของ $f_S(s)$ และ $f_R(r)$ ตามลำดับ ทำการระบุค่าของพารามิเตอร์ S_N และ R_N ที่ใช้ปัจจัยด้านความปลอดภัย โดยพื้นที่ทับซ้อนกันระหว่างเส้นโค้งทั้งสอง คือตัววัดคุณภาพของความน่าจะเป็นของการพัง พื้นที่ของการทับซ้อนกันขึ้นอยู่กับปัจจัยสามประการ ได้แก่

1.ตำแหน่งสัมพัทธ์ของเส้นโค้งทั้งสอง เมื่อระยะห่างระหว่างเส้นโค้งทั้งสองเพิ่มขึ้นความน่าจะเป็นของการพังจะลดลง ตำแหน่งของเส้นโค้งอาจแสดงโดยค่าเฉลี่ยของสองตัวแปร

2.การกระจายตัวของเส้นโค้งทั้งสอง ถ้าเส้นโค้งทั้งสองแคบ พื้นที่ของการทับซ้อนกันและความน่าจะเป็นของการพังมีโอกาสน้อย การกระจายตัวอาจมีลักษณะเฉพาะโดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรทั้งสอง

3.รูปร่างของเส้นโค้งทั้งสอง รูปร่างแสดงโดยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น $f_S(s)$ และ $f_R(r)$



รูปที่ 9 การประเมินความน่าจะเป็นของการพัง

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 ความเสียหายของคานรัดหัวเสา (Cap beam)

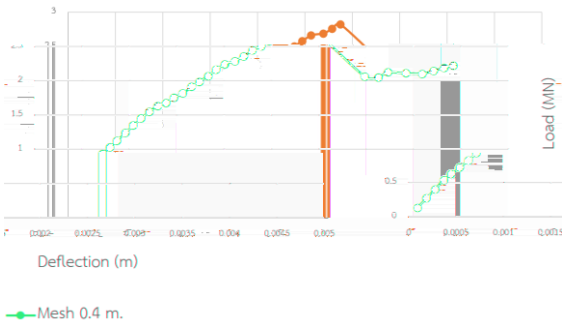
เพื่อความเป็นมาตรฐานได้มีการอ้างอิงเกณฑ์การจัดลำดับความเสียหายของคานรัดหัวเสาจากคู่มือการสำรวจและตรวจสอบสะพานของกรมทางหลวง [12] โดยทำการประเมินด้วยสายตา (Visual Inspection) พบว่ามีคอนกรีตกะเทาะหลุดล่อนเล็กน้อยแต่ลึกไม่ถึงผิวเหล็กเสริม พบรอยแตกขนาดเล็กอยู่ในเกณฑ์ความกว้าง 1.6-3.2 มิลลิเมตร จึงจัดอยู่ในระดับความเสียหายระดับ 3 สภาพพอใช้



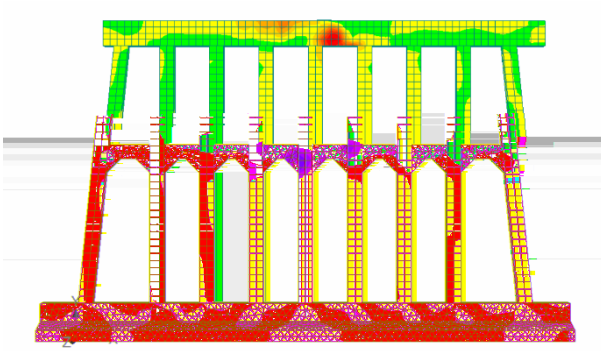
รูปที่ 10 ภาพความเสียหายของคานรัดหัวเสา

4.2 ผลการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างตอม่อสะพาน โดยใช้โปรแกรม ATENA-3D

สร้างแบบจำลองโดยอ้างอิงตามแบบก่อสร้างของตอม่อสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี กำหนดให้ตอม่อสะพานรับน้ำหนักจุดเดียวที่กลางคานรัดหัวเสา (Cap beam) เพื่อสังเกตุการโก่งตัวของโครงสร้าง และทำการเลือกขนาด Mesh ให้เหมาะสม โดยในงานวิจัยนี้ขนาดที่เหมาะสมคือ 40 ซม. โดยจากการวิเคราะห์แบบ Displacement control ได้ผลตอม่อสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี รับแรงได้สูงสุดที่ 2816 KN



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำและระยะการโก่งตัว



รูปที่ 12 รูปแบบการกระจายตัวของความเค้น

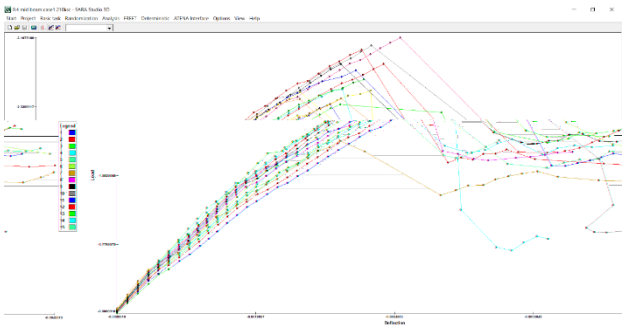
4.3 ผลการวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของโครงสร้างตอม่อสะพาน โดยใช้โปรแกรม SARA-3D

การวิเคราะห์โปรแกรม SARA ทำการแบ่งกรณีทั้งหมดเป็น 3 กรณีหลัก ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยกรณีแรกใช้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตจากแบบแปลนก่อสร้าง (210 ksc) กรณีสองใช้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตจริงจากการทดสอบในสนาม (300 ksc) และกรณีสุดท้ายลดค่ากำลังอัดของคอนกรีตจริงจากการทดสอบในสนามลง 50% (150 ksc) เพื่อดูความแตกต่างของค่าดัชนีความเชื่อมั่น (Reliability index) และ ค่าโอกาสการพัง (Probability of Failure) โดยแต่ละกรณีหลักโปรแกรม SARA จะทำการสร้างกราฟค่ากำลังอัดคอนกรีตที่กำหนดเป็นแบบ normal distribution มา 1 กราฟ เพื่อใช้คำนวณขณะใส่ load ทั้งหมด 15 ค่า นับเป็น 15 กรณีย่อย หรือ 15 เส้นสี ดังแสดงในรูปที่ 13 และ 14 การแบ่งกรณีต่างๆเพื่อความละเอียดน่าเชื่อถือและครอบคลุมตามหลักการวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของโครงสร้าง

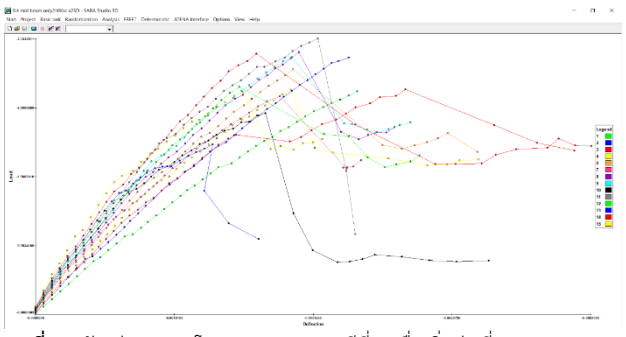
ตารางที่ 1 สรุปผลดัชนีความเชื่อมั่นและค่าโอกาสการพัง

กรณี	Reliability Index β	Probability of Failure, Pf
1. จากแบบแปลนก่อสร้าง (210 ksc)	4.74	1.045×10^{-6}
2. จากการทดสอบในสนาม 100% (300 ksc)	4.94	3.824×10^{-7}
3. จากการทดสอบในสนาม 50% (150 ksc)	4.51	3.248×10^{-6}

*** Limit Deflection ที่ 1.3 mm. (ASSTHO)*



รูปที่ 13 ตัวอย่างผลจากโปรแกรมSARA กรณีที่ 1



รูปที่ 14 ตัวอย่างผลจากโปรแกรมSARA กรณีที่ 1 เมื่อเพิ่มค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ขึ้น2เท่า

5. สรุปผลการวิจัย

การประเมินด้วยสายตา (Visual Inspection) อ้างอิงเกณฑ์การจัดลำดับความเสียหายของคานรัดหัวเสาจากคู่มือการสำรวจและตรวจสอบสะพานของกรมทางหลวง พบว่าจัดอยู่ในระดับความเสียหายระดับ 3 สภาพพอใช้

การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างตอม่อสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี โดยใช้โปรแกรม ATENA-3D ขึ้นแบบจำลองเสมือนจริง พบว่าขนาด Mesh ที่เหมาะสมคือ 40 เซนติเมตร และจากการวิเคราะห์แบบ Displacement control ได้ผลโครงสร้างตอม่อสะพานรับแรงได้สูงสุดที่ 2816 KN

การวิเคราะห์หาค่าดัชนีความเชื่อมั่น (Reliability Index,β) แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ จำลองตอม่อสะพานที่ใช้คอนกรีตกำลังรับแรง 210 ksc, 300 ksc, และ 150 ksc จากการเปรียบเทียบพบว่าได้ค่าดัชนีความเชื่อมั่นเป็น 4.74, 4.94, และ 4.51 ตามลำดับ โดยที่ค่ามากคือ

โครงสร้างมีความน่าเชื่อถือมาก ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงของคอนกรีตที่ใช้ในการวิเคราะห์ คอนกรีตจากการทดสอบในสนามด้วยการใช้ค้อนกระแทก (Schmidt's Hammer) ได้กำลังรับแรง 300 ksc ให้ค่าดัชนีความเชื่อมั่นที่มากที่สุด คือ 4.94 โดยอ้างอิงจาก Eurocode โครงสร้างตอม่อสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรีในปัจจุบันอยู่ใน Consequences Class 3 หมายความว่า มีความเชื่อมั่นที่สูงเหมาะสำหรับโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ที่ให้ความสำคัญกับคุณภาพชีวิตเป็นอย่างมาก

จากตารางสรุปผลค่าโอกาสการพัง (Probability of Failure, Pf) แปรผกผันกับค่าดัชนีความเชื่อมั่น (Reliability Index,β) ถูกตามทฤษฎี

แต่อย่างไรก็ตามวิธีการหาค่าดัชนีความเชื่อมั่นเป็นวิธีการทางสถิติที่ทำการสุ่มค่าตัวแปรต่างๆ มาวิเคราะห์โดยมีทั้งค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละตัวแปร ในงานวิจัยฉบับนี้พิจารณาเพียงค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต เพื่อให้การวิเคราะห์ดัชนีความเชื่อมั่น ใกล้เคียงความเป็นจริงควรจะมีการเก็บข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุอื่นๆ เช่น ระยะหุ้มเหล็ก ขนาดหน้าตัดเหล็กจริง เป็นต้น เพื่อใช้เป็นตัวแปรสุ่มในการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ผู้เขียนขอขอบคุณกรมทางหลวงที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และให้รายละเอียดแบบแปลนสะพานข้ามแม่น้ำบริเวณอำเภอเมืองจังหวัดจันทบุรี กม. 330+939.000 ในการเก็บข้อมูลเพื่อทำงานวิจัย

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และทีมงานเก็บข้อมูลภาคสนามเป็นอย่างสูงที่สละเวลาช่วยเหลือ ส่งผลให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ด้วยดี

7. อ้างอิง

[1] สำนักก่อสร้างสะพานระบบการบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน (2555). *คู่มือการซ่อมแซมและบำรุงสะพาน (Bridge Repair and Maintenance).* มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,หน้า1-2.

[2] Sajdlov, T.,(2006). *ATENA program documentation Part 4-9.*Prague: Cervenka Consulting.

[3] Novák, D. and R. Pukl,(2012). *Reliable/reliability computing for concrete structures: Methodology and software tools*.

[4] Bergmeister, K., et al.,(2009). Structural assessment and reliability analysis for existing engineering structures, theoretical background. *Structure and infrastructure engineering*, pp. 267-275.

[5] Červenka, V., L. Jendele, and J. Červenka (2000). ATENA Program Documentation–Part 1. *Cervenka Consulting sro*.

[6] Lu, N.L. and M. Noori (2019), Risk and Reliability in Structural Engineering : Theoretical Basis. Sustainable Structural Systems Collection.

[7] เพ็ญวิสุทธิ์ ยิ้มแฉ่ง และสหรัฐ พุทธวรรณะ (2563), การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของโครงสร้างฐานรากแผ่ สาหรับพื้นที่ชั้นดินเหนียวและชั้นทราย, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25, ชลบุรี, 15-17 กรกฎาคม 2563, หน้า 1-2.

[8] Derakhshan Alamdarloo, P. and M. Azhdary Moghaddam (2020). The calculation of the reliability index in nonlinear problems: A new method. *Ain Shams Engineering Journal*, pp. 705-716.

[9] กรมโยธาธิการและผังเมือง(2551). *มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย*. กระทรวงมหาดไทย, หน้า 19-22.

[10] Cervenka, V., J. Cervenka, and R. Pukl (2002), *ATENA—A tool for engineering analysis of fracture in concrete*. Sadhana, pp. 485-492.

[11] วินัย อวยพรประเสริฐ และ กิจเกษม คล้ายกรุต (2565), การศึกษารูปแบบการใช้ไม้ยางพาราสำหรับเป็นหมอนรองเสาเข็มคอนกรีต, วรสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี Journal of Engineering, RMUTT (JERMUTT) Vol 20, Issue 1, 2022 (January – June)

[12] สำนักก่อสร้างสะพานระบบการบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน(2555). *คู่มือการสำรวจและตรวจสอบสะพาน*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 4-68.