

# การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของเสาตอม่อสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้ความเสื่อมสภาพของคอนกรีตจากการตรวจสอบ

## Reliability Analysis of Reinforced Concrete Bridge Pier using Inspected Concrete Deterioration

ฤทธิพงษ์ บุญเอิบ<sup>1</sup> วัชรพงศ์ ลิ้มตระกูลธงชัย<sup>2</sup> ศุภวิชญ์ ศักดิ์ธนะเศรษฐ์<sup>3</sup> และวิฑิต ปานสุข<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

<sup>4</sup> รองศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการก่อสร้างและการบำรุงรักษาสะพานได้มีการนำเทคโนโลยีมาใช้ช่วยในพัฒนาเพื่อให้มีความสะดวกสบายและความแม่นยำมากยิ่งขึ้น การที่สามารถรู้สภาพความเสียหายและสามารถทำการคาดคะเนความน่าจะเป็นในการชำรุดเสียหายของสะพานได้นั้นจะทำให้สามารถทำให้เกิดการบำรุงรักษาสะพานได้อย่างทันท่วงทีเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการชำรุดของสะพานซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายแก่ผู้สัญจรอยู่บนสะพาน งานวิจัยฉบับนี้เป็นการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของโครงสร้างตอม่อของสะพานกรณีศึกษาจะศึกษาสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี กม.ท้ายสะพาน 331+0.15.00 ที่มีการใช้งานมาอย่างยาวนานกว่า 26 ปี เป็นผลให้ออนาคต สะพานและตอม่อสะพานมีโอกาสเกิดการชำรุดเสียหาย ดังนั้นโครงการฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การชำรุดของตอม่อสะพานโดยใช้ การวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ (FEA) โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ATENA ในการวิเคราะห์จะพิจารณาแรงและการโก่งตัวที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นจะนำมาหาค่าดัชนีความน่าเชื่อถือ (Reliability Index) ของโครงสร้าง โดยนำผล FEA มาวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของโครงสร้างสะพาน โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SARA จากการศึกษาพบว่าสามารถนำข้อมูลค่าดัชนีความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง เพื่อใช้อ้างอิงหรือเป็นประโยชน์ในการประเมินสภาพปัจจุบันของสะพาน และชี้วัดช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการบำรุงรักษาต่อไป

คำสำคัญ: โครงสร้างตอม่อสะพาน, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ค่าดัชนีความน่าเชื่อถือ

### Abstract

In the present time, Technology has been used to help to make the construction and maintenance of bridges more comfortable and accurate. Being able to know the condition of the damage and be able to predict the likelihood of a bridge failure will enable to know when to get the bridge maintenance in order to prevent damage that may occur. This research is to analyze the reliability of the pier structure of the bridge. This case study will study the bridge over the Chanthaburi River, Km. at the end of the bridge 331+0.15.00, which has been in use for more than 26 years. As a result, in the future bridge piers have a chance of getting damage. Therefore, this project aims to analyze the damage of bridge piers by using the 3D Finite Element Method (FEA) analysis by the ATENA computer program considers the force and the deflection that occurring. After that, it will be used to find the Reliability Index of the structure by using the FEA results to analyze the reliability of the bridge structure by the SARA computer program. The study found that it was able to bring the reliability index data to use as a reference in assessing the current condition of the bridge and indicating the period that should be maintenance.

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

### 1. บทนำ

เทคนิคการก่อสร้างสะพานได้มีการพัฒนาและวิวัฒนาการมาอย่างต่อเนื่องโดยการก่อสร้างสะพานในปัจจุบันได้มีการนำความรู้ด้านเทคโนโลยีมาพัฒนาในทั้งด้านการออกแบบและก่อสร้าง เพื่อเพิ่มความสามารถของสะพานโดยง่าย สะพานเมื่อเกิดการใช้งานไปนานๆสะพานอาจจะเกิดการ

เสื่อมสภาพ โดยเฉพาะคอนกรีตเกิดการ กะเทาะและเกิดการแตกร้าวทำให้ สะพานอาจจะเกิดการชำรุดได้ หากสามารถคาดคะเนได้ว่าสะพานจะเกิดการชำรุดในช่วงเวลาใดจะทำให้สามารถป้องกันและซ่อมบำรุงได้อย่างทัน่วงที

ในการศึกษานี้จะมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์โครงสร้างส่วนที่เป็นตอม่อ สะพาน ซึ่งเป็นส่วนที่วิกฤตมากที่สุด โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ (3D Finite element method, 3D-FEM) ด้วยโปรแกรมATENA-3DและSARA-3Dเพื่อขึ้นโมเดลและวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของเสาตอม่อ สะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก

การศึกษานี้จะนำเสนอวิธีการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการเกิดการ วิกฤติของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงประเภทต่างๆ โดย นำข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างกำลังที่ผิวคอนกรีตจากสภาพหน้า งานจริง ร่วมกับตัวแปรสุ่มต่างๆ มาวิเคราะห์หากำลังรับน้ำหนักของคาน สะพาน มาวิเคราะห์Reliability analysis แล้วนำมาคาดคะเนความน่าจะเป็นที่สะพานจะวิกฤติ เพื่อที่จะวางแผนการซ่อมบำรุงหรือก่อสร้างใหม่ใน อนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ความเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพาน (Bridge deterioration)

#### 2.1.1 สาเหตุความเสื่อมสภาพ

การเสื่อมสภาพทำให้สะพานไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามปกติ ทำให้การเสื่อมสภาพนั้นมีผลกระทบต่อความปลอดภัยและการซ่อมแซมบำรุงรักษาโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมที่ รุนแรง จึงต้องมีความเข้าใจถึงการเสื่อมสภาพของคอนกรีตในสภาวะ ใช้งานภายใต้สิ่งแวดล้อมต่างๆกัน การเสื่อมสภาพของคอนกรีต สามารถจำแนกออกเป็น 5 ชนิด ตามสาเหตุดังนี้

1. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกายภาพ ได้แก่ การหดตัวแบบ แห้ง การทรุดตัว การหดตัวแบบพลาสติก การแข็งตัวและเหลวของน้ำ ในคอนกรีต
2. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางเคมี ได้แก่ คาร์บอนेशन การ กัดกร่อนโดยกรด การกัดกร่อนโดยซัลเฟต ปฏิกริยาระหว่างต่างกับ มวลรวม
3. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกล ได้แก่ การขีดสี การชะล้าง ด้วยกระแสน้ำและกระแสน้ำกรวดทราย การแตกร้าวของฟองน้ำในอากาศ
4. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางชีวภาพ ได้แก่ การเสื่อมสภาพ โดย ตะไคร้ รารากพืชหรือแบคทีเรียบางประเภท
5. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุรวม ได้แก่ การเกิดสนิมในเหล็ก เป็นต้น

#### 2.1.2 การตรวจสอบโครงสร้างสะพานที่เสื่อมสภาพ

การตรวจสอบเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่ใช้จำแนกความเสียหายที่เกิด ขึ้นกับสะพาน ประกอบด้วยขั้นตอนและรายละเอียดต่างๆ ขึ้นอยู่กับวิธี และชิ้นส่วนที่ใช้ในการตรวจสอบขั้นตอนในการตรวจสอบสะพานจะ ขึ้นอยู่กับประเภทวัสดุที่ใช้และสภาพโดยทั่วไปของสะพานเพราะฉะนั้น ผู้ตรวจสอบจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับสะพานหลากหลายรูปแบบ ในการ ตรวจสอบจะต้องมีทั้งความรอบคอบและการเก็บข้อมูลที่สมบูรณ์ การ สังเกตจะต้องเป็นไปอย่างระมัดระวังและตั้งใจ ร่องรอยของการชำรุด ต่างๆต้องได้รับการบันทึกไว้อย่างแม่นยำ โดยในที่นี้เราจะสนใจความเสียหายที่โครงสร้างส่วนล่าง

### 2.2 การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Nonlinear finite element method)

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยคอมพิวเตอร์แบบไม่เชิงเส้นเป็นเครื่องมือที่ เป็นที่ยอมรับสำหรับการประเมินและออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรม ซึ่ง SARA ประกอบด้วยคอนกรีต โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและชิ้นส่วน ต่างๆ การสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นกลายเป็นส่วนสำคัญใน แบบจำลอง fib 2010 สำหรับโครงสร้างคอนกรีต โดยที่จะสามารถให้การตอบสนอง และการต้านทานของโครงสร้างที่สมจริงตามที่วางแผนไว้หรือตามที่อยู่ ภายใต้อิทธิพลของแรง อย่างไรก็ดี ในรูปแบบที่กำหนดขึ้นมีจุดอ่อนบาง ประการคือ พารามิเตอร์ที่ซับซ้อนมักมีความไม่แน่นอน หรือแสดงแบบสุ่ม

ซอฟต์แวร์ SARA จะเป็นการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นที่เสมือนจริงของ แบบจำลองโครงสร้าง ซอฟต์แวร์ SARA จะช่วยให้มีการสุ่มการจำลอง ตัวเลขซึ่งเป็นเครื่องมือใหม่สำหรับการออกแบบและประเมินโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็ก แบบจำลองความต้านทานตามการวิเคราะห์แบบไม่เชิง เส้นจำเป็นต้องมีการตรวจสอบแบบจำลองที่เพียงพอและมีรูปแบบความ ปลอดภัยในระดับสากลสำหรับการตรวจสอบการออกแบบ การจำลองเชิง ตัวเลขร่วมกับการสุ่มตัวอย่างที่รวมอยู่ในเครื่องมือซอฟต์แวร์ SARA ทำให้ เกิดการประเมินความปลอดภัยขั้นสูง แบบจำลองการคำนวณสำหรับการ จำลองความต้านทานในโครงการ SARA นั้นอิงจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิ เมนต์แบบไม่เชิงเส้นที่ใช้ในซอฟต์แวร์ ATENA โดยมีพื้นฐานมาจากการ ในยุคแรกๆของCervenkaโดยวิธีแก้ปัญหามาแบบไม่เชิงเส้นจะทำโดย กระบวนการทำซ้ำและแก้ไข (รูปแบบต่างๆ ของวิธีนิวตัน-ราฟสัน) การ แก้ปัญหาจะถูกประเมินโดยการวิเคราะห์เชิงเส้นโดยพิจารณาจากความตึง ของวัสดุหรือความแข็งเริ่มต้นของวัสดุ โดยการแก้ปัญหาจะได้รับการ ปรับปรุงในระลอกถัดไป โดยอ้างอิงจากกฎส่วนประกอบที่ไม่เป็นเชิงเส้น กระบวนการวนซ้ำจะหยุดเมื่อความแตกต่างระหว่างตัวทำนายและตัวแก้ไข

คุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตคือการสะท้อนสถานะความเค้นแบบ หลายแกน กล่าวคือ การเพิ่มกำลังอย่างมีนัยสำคัญภายใต้ความเค้นแบบ ไฮโดรสแตติก โดยโหมตจาก Willam ใช้ใน ATENA สำหรับการสร้าง แบบจำลองคอนกรีตภายใต้แรงอัด วิธีการย่อยสลายความเครียด โดยที่

ความเครียดทั้งหมดเป็นผลรวมเนื่องมาจากการแตกหักจะถูกใช้เพื่อแก้ปัญหา ความเป็นพลาสติก การคืบ ฯลฯ

### 2.3 การวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของโครงสร้าง (Reliability Analysis of Structures)

จากงานวิจัยของ Andrzej S. Nowak, Kevin R. Collins [1] ที่ศึกษาเรื่องความน่าเชื่อถือของโครงสร้างได้เสนอแนวคิดวิธีการหาค่า Reliability index,  $\beta$  (ตรรกษีความน่าเชื่อถือ), Probability of failure (โอกาสการพัง) ได้จากสมการ

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}}$$

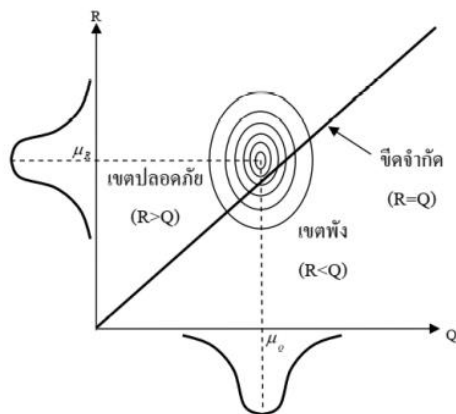
โดย  $\beta$  คือค่า Reliability Index ซึ่งเป็นส่วนกลับของสัมประสิทธิ์ของการแปรผัน(COV) ของฟังก์ชัน

$g(R,Q) = R - Q$  ซึ่ง R, Q เป็นอิสระต่อกัน ถ้า R, Q มีการกระจายตัวแบบ Normal distribution ดังนั้น

Reliability index และ Probability of failure จะสัมพันธ์โดยสมการ

$$\beta = -\phi^{-1}(P_f) \text{ หรือ } P_f = \phi(-\beta)$$

ถ้ากำหนดให้ตัวแปร Q แทนน้ำหนักบรรทุก และตัวแปร R แทนความสามารถในการรับแรง โดยที่ทั้ง R และ Q มีการกระจายตัวแบบ Normal distributions เมื่อนำมาพล็อตจะได้



รูปที่ 2-1 เขตปลอดภัยและเขตการพังในกราฟ 2 มิติ

จากรูปขอบเขตจะถูกแบ่งโดยฟังก์ชันขีดจำกัด ( $R=Q$ ) โดยจะแบ่งออกเป็น 2 เขตคือเขตปลอดภัยและเขตพัง กล่าวคือถ้า  $R > Q$  : ความสามารถในการรับแรงมากกว่าน้ำหนักบรรทุก โครงสร้างจะปลอดภัย ถ้า  $R < Q$  : ความสามารถในการรับแรงน้อยกว่าน้ำหนักบรรทุก โครงสร้างจะพัง ดังนั้นเราสามารถคำนวณโอกาสการพัง คือความน่าจะเป็นที่  $R < Q$ : ความสามารถในการรับแรงน้อยกว่าน้ำหนักบรรทุก

$$P_f = P(R < Q)$$

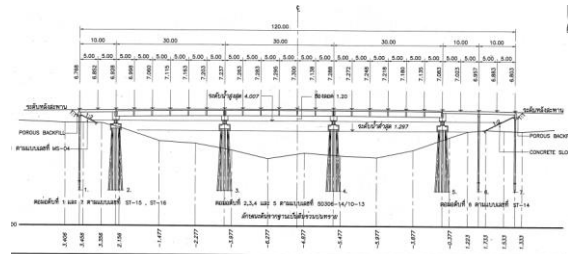
### 3. ระเบียบวิธีวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนโดยเรียงตามลำดับการดำเนินการดังนี้ กำหนดปัญหาที่เกี่ยวข้องและวัตถุประสงค์ของโครงการงาน ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ศึกษาทำความเข้าใจแบบโครงสร้างภาพรวมของโครงการ และรายละเอียดแบบต่อมือ การสำรวจและการตรวจสอบภาคสนามภาพรวมของต่อมือสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี นำผลการทดสอบและสำรวจที่ได้มาวิเคราะห์ด้วย ATENA3D แบบแรงกระทำพลวัตและวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของโครงสร้างด้วย SARA3D อภิปรายผลการวิเคราะห์และหาทางแก้ไขในกรณีพบปัญหา สรุปผลของโครงการ

#### 3.1 ศึกษาแบบก่อสร้างจริงของต่อมือสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี

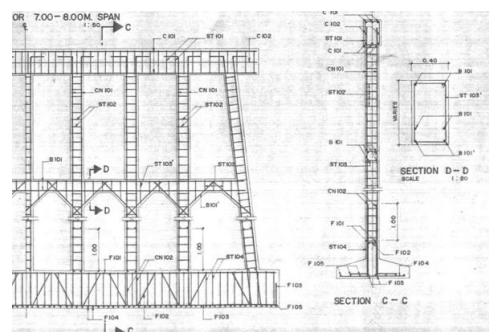
##### 3.1.1 รายละเอียดสะพานที่ศึกษา

ในโครงการนี้เราจะมุ่งเน้นไปที่รายการประกอบแบบของต่อมือสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี โดยจากการศึกษาแบบก่อสร้างจริงของสะพานพบว่าสะพานแห่งนี้เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก แบ่งความยาวช่วงได้ 2 ช่วงคือ ช่วงยาว 10 ม.และ ช่วงยาว 30 ม. โดยที่ช่วงยาว 30 เมตรเป็นส่วนที่อยู่กลางน้ำ มีทั้งหมด 3 ช่วง และส่วนช่วงความยาว 10 เมตรเป็นส่วนที่อยู่บนพื้นดินมีทั้งหมด 3 ช่วง



รูปที่ 3-1 แบบก่อสร้างสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี

โครงการนี้เป็นการประเมินสภาพโครงสร้างส่วนล่างของสะพานเจาะจงไปยังต่อมือของสะพาน โดยส่วนอื่นของสะพานจะไม่พิจารณา พิจารณาเฉพาะต่อมอดับที่ 6



รูปที่ 3-2 แบบก่อสร้างสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรีส่วนต่อมือ

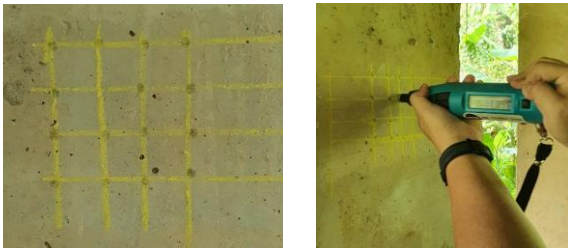
### 3.1.2 การสำรวจและตรวจสอบตอม่อสะพานจันทบุรีภาคสนาม

การลงภาคสนามสำรวจสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี เพื่อให้การสำรวจมีมาตรฐานและความถูกต้อง ได้อ้างอิงจากคู่มือสำรวจ และตรวจสอบสะพาน โดยสำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวง (2555) และทำการวัดระยะจริง เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องกันของแบบก่อสร้างและโครงสร้างสะพานจริง โดยจะทำการสำรวจความเสียหายด้วยตาเปล่า จากนั้นจึงทดสอบหากำลังอัดของคอนกรีตที่แท้จริงที่ภาคสนาม ด้วยการใช้ Schmidt's Hammer



รูปที่ 3-3 Schmidt's Hammer

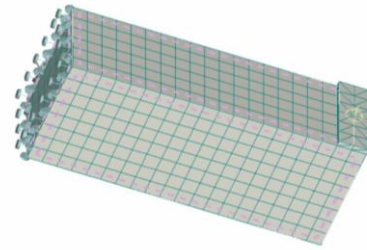
โดยจะทำการกดทั้งหมด 9 เส้า เป็นจำนวนทั้งสิ้น 720 จุด โดยกำหนดตำแหน่งทดสอบ 16 จุด ซึ่งแต่ละจุดห่างกันอย่างน้อย 30 มิลลิเมตร เฉลี่ยค่าทั้ง 16 ค่า โดยทุกค่าจะต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยเกิน  $\pm 7$  โดยค่าที่จะนำมาใช้ได้มาจากค่าเฉลี่ยของกรกด 1 ชุด



รูปที่ 3-4 การทดสอบโดย Schmidt's Hammer

### 3.2 การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในสะพาน โดยใช้โปรแกรม ATENA-3D

เพื่อเป็นการยืนยันว่าผลลัพธ์ที่ได้มาจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยคอมพิวเตอร์ถูกต้อง โดยวิธีการก็คือเราจะทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณมือโดยใช้การวิเคราะห์เชิงเส้น โดยจะทดสอบโดยการใช้น้ำหนักตั้งรูป



รูปที่ 3-4 คานยื่นที่ใช้ในกระบวนการทดสอบ

ซึ่งค่าที่ได้ Deflection ที่คำนวณได้จากทั้ง 2 วิธี ต่างกันเพียง 1% ถือว่าโปรแกรมสามารถนำมาวิเคราะห์ได้

สร้างแบบจำลองโดยอ้างอิงตามแบบก่อสร้างของตอม่อสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรีและทำการเลือกขนาด Mesh ให้เหมาะสมโดยในกรณีนี้เลือกขนาด 40 ซม. โดยจากการวิเคราะห์แบบ Displacement control ได้ผลว่าตอม่อสะพานนี้รับแรงได้สูงสุดที่ 2816 KN

### 3.3 การวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของโครงสร้างสะพาน (Reliability Analysis of Bridge Structures) โดยใช้โปรแกรม SARA-3D

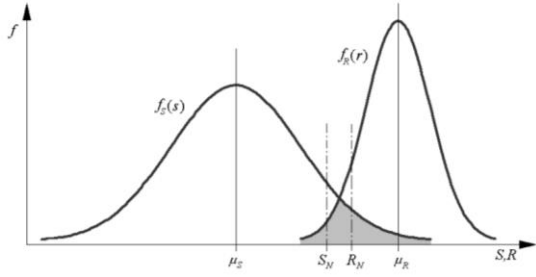
#### 3.3.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ใช้โปรแกรม SARA-3D

โดยการวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของโครงสร้างสะพานโดยใช้โปรแกรม SARA-3D จะมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้ สร้างและตรวจสอบแบบจำลองโครงสร้างใน ATENA-3D เลือกสุ่มค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรที่ต้องการจะศึกษา ทำการวิเคราะห์โมเดลโดยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว และนำผลลัพธ์ที่ได้ไปคำนวณหาค่า Reliability Index และ Propability of failure แล้วนำมาเปรียบเทียบกับ Eurocode เพื่ออธิบายผลต่อไป

#### 3.3.2 แนวคิดพื้นฐาน (Fundamental concepts)

โดยทั่วไป การออกแบบโครงสร้างประกอบด้วยการจัดสัดส่วนองค์ประกอบของโครงสร้างให้เป็นไปตามสัดส่วนและเป็นไปตามเกณฑ์ความปลอดภัย เซอร์วิซิบลิตี และความทนทานภายใต้แรงกระทำภายใต้น้ำหนักบรรทุก โดยมีแผนผังแสดงการประเมินความน่าจะเป็นของการพังในรูปที่ 3-24 โดยพิจารณาจากตัวแปร 2 ตัว (ตัวหนึ่งคือโหลดบนโครงสร้างและอีกตัวหนึ่งถึงความต้านทานของโครงสร้าง) ทั้ง S และ R เป็นตัวแปรแบบสุ่มในธรรมชาติ การสุ่มจะเป็นไปตามฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่สอดคล้องกันของ FS(s) และ FR(r) ตามลำดับ รูปที่ 3-7 ยังระบุค่าของพารามิเตอร์ SN และ RN ที่ใช้ปัจจัยด้านความปลอดภัย โดยพื้นที่ทับซ้อนกันระหว่างเส้นโค้งทั้งสอง คือตัววัดคุณภาพของความน่าจะเป็นของการพัง พื้นที่ของการทับซ้อนกันขึ้นอยู่กับปัจจัยสามประการ คือ

- ตำแหน่งสัมพัทธ์ของเส้นโค้งทั้งสอง: เมื่อระยะห่างระหว่างเส้นโค้งทั้งสองเพิ่มขึ้นความน่าจะเป็นของการพังจะลดลง ตำแหน่งของเส้นโค้งอาจแสดงโดยค่าเฉลี่ย ( $\mu S$  และ  $\mu R$ ) ของสองตัวแปร
- การกระจายตัวของเส้นโค้งทั้งสอง: ถ้าเส้นโค้งทั้งสองแคบ พื้นที่ของการทับซ้อนกันและความน่าจะเป็นของการพังมีน้อย การกระจายตัวอาจมีลักษณะเฉพาะโดยมาตรฐานค่าเบี่ยงเบน ( $\sigma S$  และ  $\sigma R$ ) ของตัวแปรทั้งสอง
- รูปร่างของเส้นโค้งทั้งสอง: รูปร่างแสดงโดยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น FS(s) และ FR(r)



รูปที่ 3-7 การประเมินความน่าจะเป็นของการพัง

#### 4. ผลการดำเนินงานวิจัย

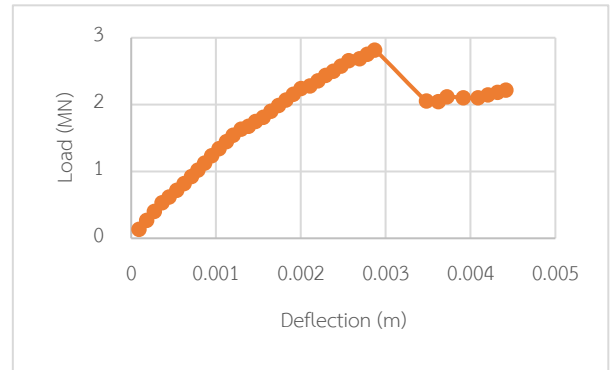
##### 4.1 ความเสียหายของคานรัดหัวเสา (Cap beam)

ระดับความเสียหายตามมาตรฐานกรมทาง	รายละเอียดความเสียหาย
2 (สภาพชำรุด)	แตกร้าวถึงเหล็กเสริมที่เป็นสนิม
2 (สภาพชำรุด)	คอนกรีตมีโพรงขนาดเล็กหลายจุด
2 (สภาพชำรุด)	กะเทาะหลุดล่อนถึงเหล็กเสริม
2 (สภาพชำรุด)	รอยแตกขนาดกลางพร้อมขี้เกลือคราบน้ำสนิม
2 (สภาพชำรุด)	สีกร่อน หลุดร่อน และเป็นรังผึ้งบริเวณแคบ



##### 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตอม่อ

สะพาน



\*\*กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Deflection จาก FEA กำหนดให้ตอม่อสะพานรับ Point load ที่กลางคานรัดหัวเสาใช้ขนาด Mesh 40 cm

##### 4.3 ผลการวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของโครงสร้างสะพาน

Case	Reliability Index, $\beta$	Probability of Failure, $P_f$
1. ตามแบบก่อสร้าง (210 ksc)	4.74	$1.045 \times 10^{-6}$
2. จากการทดสอบในสนาม 100% (300 ksc)	4.94	$3.824 \times 10^{-7}$
2. จากการทดสอบในสนาม 50% (150 ksc)	4.51	$3.248 \times 10^{-6}$

#### 5. สรุปผลการวิจัย

บทความนี้ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์หาความน่าเชื่อถือของโครงสร้างตอม่อสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี โดยพิจารณาจากค่าดัชนีความน่าเชื่อถือ (Reliability Index) โดยจะแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ แบบจำลองตอม่อสะพานที่ใช้คอนกรีตกำลังรับแรง 210 ksc, 300 ksc, และ 150 ksc

จากการเปรียบเทียบพบว่าได้ค่าดัชนีความน่าเชื่อถือเป็น 4.74, 4.94, และ 4.51 ตามลำดับ โดยที่ค่ายิ่งมกยิ่งดีกล่าวคือโครงสร้างยิ่งมีความน่าเชื่อถือมาก ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงของคอนกรีตที่ใช้ในการวิเคราะห์คือคอนกรีตกำลังรับแรง 300 ksc ให้ค่าดัชนีความน่าเชื่อถือที่มากที่สุด โดยเมื่อพิจารณาค่าดัชนีความน่าเชื่อถือที่ได้จากการวิเคราะห์ค่ากำลังรับแรงของคอนกรีต 300 ksc ที่ได้จากการสำรวจภาคสนามได้ค่าดัชนีความน่าเชื่อถืออยู่ที่ 4.94 โดยอ้างอิงจาก Eurocode ตอม่อสะพานในปัจจุบันอยู่ใน Consequences Class 3 หมายความว่า มีความเชื่อมั่นที่สูงเหมาะสมสำหรับโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ที่ให้ความสำคัญกับคุณภาพชีวิตเป็นอย่างมาก

แต่อย่างไรก็ตามวิธีการหาค่าความน่าเชื่อถือเป็นวิธีการทางสถิติ ที่ทำการสุ่มค่าตัวแปรต่างๆ มาวิเคราะห์โดยมีทั้งค่าเฉลี่ย, ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของแต่ละตัวแปร ในโครงการนี้พิจารณาเพียงแค่ค่ากำลังรับ แรงอัดของคอนกรีต เพื่อให้การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือใกล้เคียงความเป็นจริงควรมีการเก็บข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุอื่นๆ เช่น ระยะเวลาเหล็ก หนาดัดเหล็กจริง เป็นต้น เพื่อใช้เป็นตัวแปรสุ่มในการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณรศ.ดร.วิฑิต ปานสุข สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Andrzej S. Nowak, Kevin R. Collins. Reliability of Structures, 2000.
- [2] Reliability analysis of shear strength of reinforced concrete deep beams using NLFEA
- [3] Reliability assessment of concrete bridges
- [4] Safety analysis and reliability assessment of engineering structures–The success story of SARA
- [5] On the value of a reliability-based nonlinear finite element analysis approach in the assessment of concrete structures