

การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นของพฤติกรรมการคืบในคานบากบ่าที่เสริม ด้วยการหุ้มคอนกรีตอัดแรงภายใน

Nonlinear Analysis of the Creep Behavior in Ledge Girders Strengthened with Internal Prestressed Concrete Jacketing

ธนาธิ พูลพันธ์^{1,*}, ธรา ทานวีร์², ศุภศิษฐ์ ศรีวรานันท์³ และ อิศารัตน์ วิสุทธิ์เสวีวงศ์⁴

^{1,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

² NorCiv Engineering Co., Ltd.

*Corresponding author; E-mail address: 6670101021@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

ชิ้นส่วนโครงสร้างของสะพานประวัติศาสตร์ประเภทคานคอนกรีตเสริมเหล็กปลายบาก (RC Ledge Girder) มักประสบปัญหาการเสื่อมสภาพเมื่อเปิดใช้งานเป็นเวลานานจากน้ำหนักบรรทุกสูงและการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ ทำให้สมรรถนะในการรับน้ำหนักลดลงและเกิดรอยแตกร้าว วิธีการเสริมกำลังด้วยการหุ้มคอนกรีตอัดแรงภายใน จึงถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงและยืดอายุการใช้งาน บทความนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นของพฤติกรรมการคืบ (Creep Behavior) ของคานบากบ่าที่เสริมกำลังด้วยวิธีดังกล่าว โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม ATENA Science เพื่อศึกษาการเสียรูปและการแตกร้าวที่เกิดขึ้นสะสมเมื่อโครงสร้างอยู่ภายใต้น้ำหนักคงที่ในระยะยาว พร้อมทั้งพิจารณาผลของความสามารถในการถ่ายแรงเฉือนบริเวณรอยต่อระหว่างคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่ ภายใต้สภาวะการยึดเกาะต่าง ๆ ผลการวิเคราะห์พบว่า พฤติกรรมการคืบของคอนกรีตมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพของคานบากบ่าที่ได้รับการเสริมกำลัง โดยแม้ว่าการเสริมกำลังจะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงในช่วงต้น แต่เมื่อพิจารณาผลในระยะยาวจะพบว่า การคืบตัวของคอนกรีตทำให้เกิดการเสียรูปสะสมและการโก่งตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งข้อมูลการศึกษานี้ช่วยประเมินประสิทธิภาพของวิธีการเสริมกำลัง และให้ข้อมูลสนับสนุนการฟื้นฟูสะพานเก่าในเชิงวิศวกรรม

คำสำคัญ: พฤติกรรมการคืบ, คานบากบ่า, การหุ้มคอนกรีตอัดแรงภายใน, ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น

Abstract

Structural components of historical bridges, particularly reinforced concrete ledge girders, often experience deterioration after extended service periods due to high load demands and environmental fluctuations. This deterioration results in a reduction in load-carrying capacity and the development of

cracks. To address these issues, internal prestressed concrete jacketing has been adopted as a strengthening technique to enhance structural performance and extend service life. This paper focuses on the nonlinear analysis of the creep behavior of RC ledge girders that have been strengthened using this method. A three-dimensional nonlinear finite element analysis (3D NLFEA) was conducted using ATENA Science software to investigate deformation and crack propagation under sustained long-term loading. The study also considers the shear transfer capacity at the interface between the existing and newly applied concrete, under varying bond conditions. The analysis results reveal that concrete creep behavior plays a critical role in the long-term performance of strengthened ledge girders. Although the strengthening method significantly improves the initial load-carrying capacity, long-term effects indicate that creep leads to progressive deformation and increased deflection over time. The findings from this study contribute to assessing the effectiveness of the strengthening technique and provide engineering insights to support the rehabilitation of aging bridge structures.

Keywords: Creep Behavior, Ledge Girder, Internal Prestressed Concrete Jacketing, Nonlinear Finite Element Method

1. คำนำ

โครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีปลายบากบ่ามักปรากฏให้เห็นในระบบโครงสร้างของสะพานทั่วไป และมักเป็นบริเวณที่มีความซับซ้อนทางพฤติกรรมของแรงภายใน จากการใช้งานจริงในอดีตพบว่า คานประเภทนี้มีแนวโน้มเกิดความเสียหายได้ง่ายบริเวณส่วนบาก ไม่ว่าจะเป็นรอยแตกร้าวหรือการหลุดร่อนของเนื้อคอนกรีตจนกระทั่งเผยให้เห็นผิวของเหล็กเสริม ซึ่งก่อให้เกิดการกัดกร่อนตามมา ความเสียหายเหล่านี้เกิดขึ้นจากการรับภาระ

สะสมในระยะยาวและผลกระทบจากสภาพแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ และสารเคมี การซ่อมแซมหรือบูรณะโดยการเสริมกำลังจึงเป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้ในหลายกรณี โดยเฉพาะการเสริมด้วยวิธีหุ้มคอนกรีตอัดแรงภายใน ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้าง

อย่างไรก็ตาม แม้การเสริมกำลังจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถของคานในช่วงต้น แต่ยังมีข้อจำกัดสำคัญที่ต้องพิจารณา โดยเฉพาะพฤติกรรมการคืบของคอนกรีต (Creep) ซึ่งเป็นการเสียรูปอย่างช้า ๆ เมื่อคอนกรีตอยู่ภายใต้ภาระคงที่เป็นระยะเวลานาน พฤติกรรมนี้ส่งผลให้เกิดการโก่งตัวสะสม การพัฒนาแนวรอยร้าว และการเปลี่ยนแปลงของแรงภายใน ซึ่งอาจลดประสิทธิภาพของการเสริมกำลังและส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของโครงสร้างโดยรวมได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบที่มีรอยต่อระหว่างคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่ ซึ่งคุณภาพของรอยต่อดังกล่าวมีบทบาทต่อการถ่ายแรงเฉือนและความต่อเนื่องของพฤติกรรมโครงสร้าง

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมระยะยาวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กบาคาที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยการหุ้มคอนกรีตอัดแรงภายใน โดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Finite Element Analysis) ด้วยโปรแกรมอาเทน่า (ATENA Science) แบบ 3 มิติ ซึ่งได้ทำการจำลองพฤติกรรมการคืบของคอนกรีตในระยะยาวตามแนวทางในมาตรฐาน AASHTO 2015 [1] ด้วยการวิเคราะห์การคืบของคอนกรีตที่เวลาผ่านไป 10 ปี เพื่อสะท้อนพฤติกรรมเสียรูปสะสมของชิ้นส่วนคอนกรีตภายใต้แรงกระทำคงที่ในช่วงเวลาต่าง ๆ และวิเคราะห์พฤติกรรมของรอยต่อระหว่างคอนกรีตเดิมและใหม่ที่มีสถานะการยึดเกาะที่แตกต่างกันตามแนวทางของ fib Model Code 2010 [2] ภายใต้แรงกระทำคงที่ในระยะยาว ผลการศึกษาในครั้งนี้เพื่อประเมินผลกระทบในระยะยาวของปัจจัยดังกล่าวต่อประสิทธิภาพของโครงสร้างเสริมกำลัง และเป็นข้อมูลสนับสนุนสำหรับแนวทางการออกแบบและบูรณะโครงสร้างในอนาคต



รูปที่ 1 ความเสียหายบริเวณบาคา

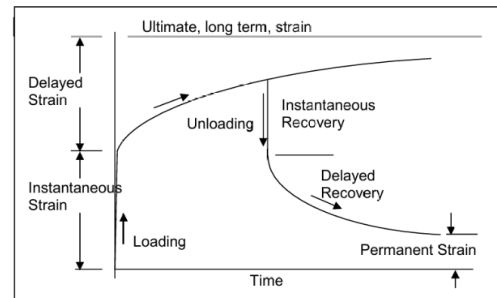


รูปที่ 2 บริเวณรอยต่อระหว่างคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่

2. ขั้นตอนการดำเนินงาน

2.1 การศึกษาพฤติกรรมการคืบตัวของคอนกรีตตามช่วงเวลา

การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรในคอนกรีตสามารถเกิดขึ้นได้จากปรากฏการณ์คืบ (Creep) ซึ่งเป็นลักษณะของการเสียรูปที่ค่อยเป็นค่อยไป เมื่อวัสดุอยู่ภายใต้แรงคงที่เป็นระยะเวลานาน หลังจากที่ถูกคอนกรีตรับแรงจะเกิดการเสียรูปทันทีในลักษณะยืดหยุ่น (Instantaneous Elastic Strain) ซึ่งสัมพันธ์กับมอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ณ ขณะเวลาที่แรงกระทำ และหากแรงดังกล่าวยังคงอยู่ต่อเนื่องโดยไม่ถูกยกออก คอนกรีตจะเกิดการเสียรูปเพิ่มเติมในลักษณะหน่วงเวลา (Delayed Strain) ซึ่งจะสะสมมากขึ้นตามระยะเวลาที่แรงยังคงกระทำค้างไว้อยู่ [1] ดังที่แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การคืบตัวของคอนกรีตตามช่วงเวลาต่าง ๆ [1]

เมื่อมีการปลดปล่อยแรงที่กระทำต่อคอนกรีตในบางช่วงเวลา คอนกรีตจะเกิดการคืนตัวในทันที (Instantaneous Recovery) ซึ่งมีขนาดสัมพันธ์กับมอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปตามอายุของคอนกรีต ต่อจากนั้นจะเกิดการคืนตัวเพิ่มเติมในลักษณะช้า ๆ (Delayed Recovery) ซึ่งเป็นกระบวนการคืนตัวอย่างค่อยเป็นค่อยไป อย่างไรก็ตาม การคืนตัวของคอนกรีตนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ 100% [1]

การคืบตัวของคอนกรีตภายใต้แรงกระทำคงที่สามารถจำแนกได้เป็น 3 ระยะตามลักษณะพฤติกรรมของการเสียรูปที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ได้แก่ ระยะปฐมภูมิ ทุติยภูมิ และตติยภูมิ โดยในระยะปฐมภูมิ คอนกรีตจะแสดงพฤติกรรมการคืบในอัตราที่สูง และจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งมักพบในกรณีที่ระดับความเค้นไม่เกินร้อยละ 40 ของกำลังอัดระยะสั้นของคอนกรีต ถัดมาในระยะทุติยภูมิ อัตราการคืบจะคงที่หรือใกล้เคียงศูนย์ ซึ่งสะท้อนถึงเสถียรภาพในการเสียรูปของวัสดุหากแรงกระทำยังคงอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง ในขณะที่ระยะตติยภูมิจะเกิดขึ้นเมื่อคอนกรีตอยู่ภายใต้แรงเค้นถาวรในระดับสูงมาก ซึ่งนำไปสู่อัตราการคืบที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและอาจนำไปสู่การวิบัติของโครงสร้าง [3] พฤติกรรมในระยะหลังจากนี้ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองยืดหยุ่นทั่วไป ทั้งนี้ การเข้าใจลักษณะของแต่ละระยะมีความสำคัญต่อการประเมินอายุการใช้งานและการออกแบบเสริมกำลังโครงสร้างอย่างเหมาะสมในระยะยาว

2.2 การกำหนดพฤติกรรมการยึดเกาะระหว่างคอนกรีตเดิมและใหม่

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กบาคาที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยการหุ้มคอนกรีตอัดแรงภายใน การกำหนดพฤติกรรมการยึดเกาะ (Bond Behavior) ระหว่างคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่ถือเป็น

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความต่อเนื่องของแรงเฉือน การถ่ายแรง และประสิทธิภาพโดยรวมของโครงสร้างที่เสริมกำลัง

รูปแบบของการยึดเกาะระหว่างวัสดุคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่สามารถจำแนกตามความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของรอยต่อออกเป็นหลายกรณี โดยพิจารณาจากระดับความขรุขระของพื้นผิวสัมผัสและกลไกหลักในการถ่ายแรงเฉือน ได้แก่ แรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) แรงเสียดทาน (Friction) และแรงที่ถ่ายผ่านจากเหล็กเดือย (Dowel Action) [4] ซึ่งมีบทบาทร่วมกันในการเพิ่มความสามารถในการรับแรงของรอยต่อ ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ Cohesion และ Friction ที่แนะนำ ได้มาจากผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตหลากหลายประเภท และสามารถสรุปรวบรวมไว้ในตารางที่ 1 เพื่อใช้ในการประเมินพฤติกรรมของรอยต่อภายใต้สภาวะต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม [2]

ตารางที่ 1 ความต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยของรอยต่อคอนกรีต [2]

Roughness	Adhesive Bond (MPa)	Coefficient of friction
Smooth	0.5 -1.5	0.5 - 0.7
Slightly roughened	1.5 - 2.5	0.8 - 1.0
Very rough	2.5 - 3.5	1.1 - 1.4

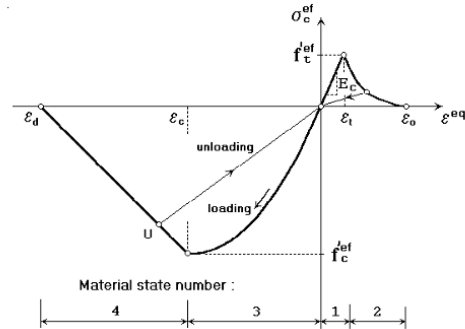
2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

โดยทั่วไป พฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตจะเริ่มต้นจากพฤติกรรมเชิงเส้น (Linear Behavior) ซึ่งองค์ประกอบของโครงสร้างสามารถรับแรงได้ในขอบเขตความยืดหยุ่นของวัสดุ แต่เมื่อเกิดความเสียหาย เช่น การแตกร้าวของคอนกรีตหรือการยึดตัวเกินขีดจำกัดของเหล็กเสริม พฤติกรรมของโครงสร้างจะเปลี่ยนไปสู่ลักษณะไม่เชิงเส้น (Nonlinear Behavior) ซึ่งมีความซับซ้อนในการวิเคราะห์มากขึ้น โดยเฉพาะในกรณีของคานคอนกรีตเสริมเหล็กปลายบากที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยการหุ้มคอนกรีตอัดแรงภายใน ซึ่งมีปฏิสัมพันธ์ของวัสดุต่างชนิด เช่น คอนกรีตเดิม คอนกรีตใหม่ เหล็กเสริม และลวดอัดแรง การจำลองพฤติกรรมโครงสร้างที่แม่นยำจึงจำเป็นต้องใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นสามมิติ (3D Nonlinear Finite Element Method) เพื่อสะท้อนพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงภายใต้แรงกระทำคงที่ในระยะยาว งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้โปรแกรม GiD Simulation สำหรับเตรียมแบบจำลองเรขาคณิต กำหนดโครงสร้างชิ้นส่วนเหล็กเสริม และวัสดุ และนำแบบจำลองเข้าสู่โปรแกรม ATENA Studio เพื่อทำการวิเคราะห์เชิงโครงสร้าง [5] โดยครอบคลุมทั้งพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของวัสดุคอนกรีต (Material Nonlinearity) พฤติกรรมการคืบ (Creep) การยึดเกาะของพื้นผิวรอยต่อ (Bond Interface)

2.3.1 แบบจำลองคอนกรีต

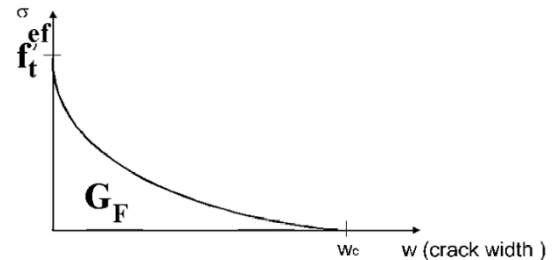
พฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นของคอนกรีตสามารถถ่ายทอดและอธิบายได้อย่างชัดเจนผ่านแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

ภายใต้แรงกระทำในแนวแกนเดียว (Uniaxial Stress-Strain Law) ซึ่งแสดงถึงลักษณะการตอบสนองของวัสดุคอนกรีตต่อแรงกระทำในทิศทางเดียว โดยสะท้อนทั้งพฤติกรรมในช่วงยืดหยุ่น การเกิดจุดสูงสุดของกำลังรับแรง และพฤติกรรมหลังจุดวิกฤตในลักษณะของการอ่อนกำลัง ดังแสดงในรูปที่ 4



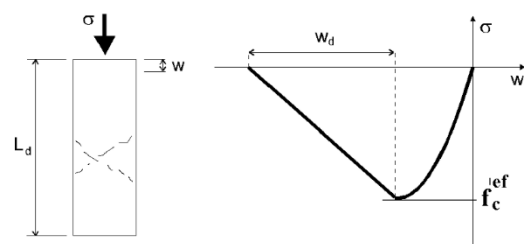
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดภายใต้แรงกระทำในแนวแกนเดียว [8]

พฤติกรรมของคอนกรีตภายใต้แรงดึงที่ยังไม่เกิดรอยร้าว จะถือว่าเป็นพฤติกรรมเชิงเส้นยืดหยุ่น (linear elastic) และพฤติกรรมภายใต้แรงดึงหลังเกิดรอยร้าวสามารถใช้แบบจำลองรอยร้าวสมมติ (fictitious crack model) ที่อิงตามกฎความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างรอยร้าว (crack-opening law) และพลังงานการแตกร้าว (fracture energy) ซึ่งเหมาะสำหรับการจำลองการกระจายของรอยร้าวในคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แบบจำลองการอ่อนตัว [8]

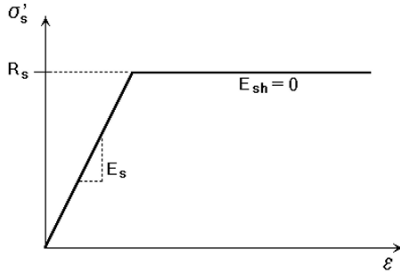
พฤติกรรมของคอนกรีตในช่วงอินอีลาสติกภายใต้แรงอัดสามารถอธิบายโดยใช้แบบจำลองระนาบแรงอัดสมมติ (Fictitious Compression Plane Model) ดังรูปที่ 6 โดยตั้งสมมุติฐานที่ว่า การวิบัติจากแรงอัดจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ในระนาบที่ตั้งฉาก (plane Normal) กับทิศทางของความเค้นหลักในแรงอัด (compressive principal stress)



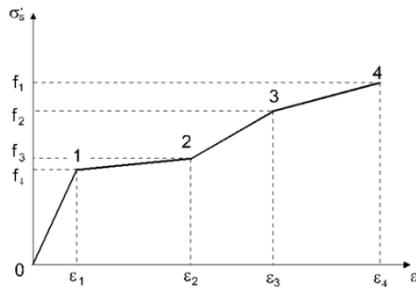
รูปที่ 6 แบบจำลองการอ่อนตัว [8]

2.3.2 แบบจำลองของเหล็กเสริม

แบบจำลองพฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเสริมอยู่ 2 รูปแบบหลัก ได้แก่ Bilinear Law และ Multi-line Law ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้จำลองพฤติกรรมของเหล็กเสริมภายใต้แรงดึงสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงกระทำแบบสถิต โดยสามารถอธิบายได้ผ่านความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริม
แบบ Bilinear Law [8]



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริม
แบบ Multi-Line Law [8]

2.3.3 แบบจำลองการคืบตัว

แบบจำลองวัสดุสำหรับการพยากรณ์การคืบตัว (Creep Prediction Model) ได้ใช้แบบจำลอง Model B3 ซึ่งพัฒนาโดย Bazant and Baweja [9] โดยพื้นฐานของการวิเคราะห์การคืบตัวในแบบจำลองนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า ฟังก์ชันการยอมรับของวัสดุ จะขึ้นอยู่กับเฉพาะองค์ประกอบของวัสดุ อุณหภูมิ รูปร่างหรือรูปทรงของชิ้นงาน ช่วงเวลาที่ทำการสังเกต และช่วงเวลาที่เริ่มรับน้ำหนัก

$$\phi(t, t') = q_1 + C_0(t, t') \quad (1)$$

โดยที่ $C_0(t, t')$ คือ ฟังก์ชันการยอมรับสำหรับการคืบพื้นฐาน (basic creep) ซึ่งเกิดขึ้นภายใต้สภาวะความชื้นคงที่และไม่มีการเคลื่อนที่ของความชื้นผ่านวัสดุ และ q_1 คือ ความเครียดทันทีเนื่องจากความเค้นหนึ่งหน่วย

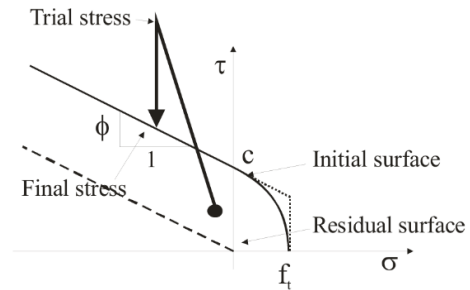
ค่าการยอมรับของการคืบพื้นฐานถูกจัดให้อยู่ในรูปอัตราเวลา (time rate) โดยมีนิยามของค่าตามสมการที่ 2

$$C_0(t, t') = \frac{n(q_2 t'^{-m} + q_3)}{(t - t') + (t - t')^{1-n}} + \frac{q_4}{t} \quad (2)$$

โดยค่า q_2 , q_3 และ q_4 คือ Empirical constitutive parameters เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง เพื่อใช้แทนลักษณะพฤติกรรมของวัสดุในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

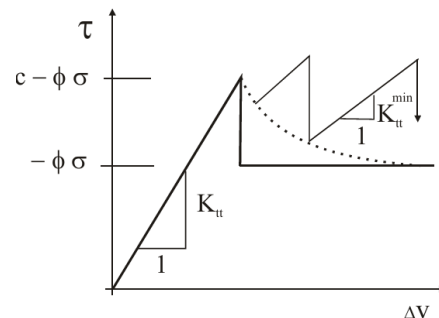
2.3.4 แบบจำลองพื้นผิว

แบบจำลองวัสดุพื้นผิวสามารถใช้เพื่อจำลองการสัมผัสระหว่างวัสดุสองชนิด เช่น รอยต่อระหว่างชิ้นส่วนคอนกรีตสองชิ้นในการก่อสร้าง หรือการสัมผัสระหว่างฐานรากกับโครงสร้างคอนกรีต โดยอิงตามเกณฑ์ Mohr-Coulomb ดังที่แสดงในรูปที่ 9

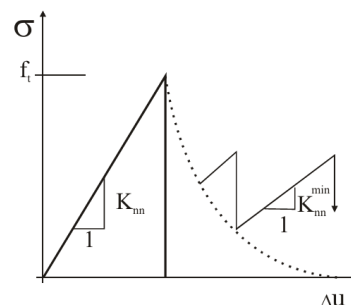


รูปที่ 9 พื้นผิวการวิบัติสำหรับ interface elements [6]

สำหรับแบบจำลองวัสดุของพื้นผิวใน ATENA มีพารามิเตอร์อยู่ 2 ประเภท พารามิเตอร์ประเภทที่ 1 คือ พารามิเตอร์ที่อธิบายสมบัติทางกายภาพ (physical properties) จริงของพื้นผิว ได้แก่ กำลังรับแรงดึง แรงยึดเหนี่ยว และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน พารามิเตอร์ประเภทที่ 2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็ง (stiffness coefficients) ซึ่งกำหนดขึ้นเพื่อใช้ในวัสดุประสงค์เชิงตัวเลข ได้แก่ ความแข็งในแนวปกติ (normal stiffness) และแนวสัมผัส (tangential stiffness)



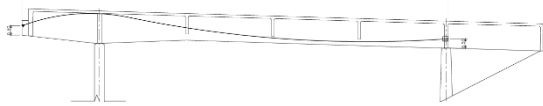
รูปที่ 10 พฤติกรรมของแบบจำลองพื้นผิวในกรณีรับแรงเฉือน [6]



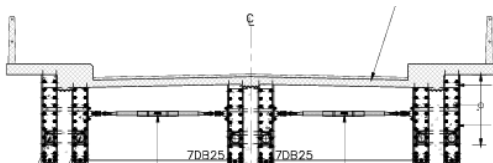
รูปที่ 11 พฤติกรรมของแบบจำลองพื้นผิวในกรณีรับแรงดึง [6]

2.3.5 การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม GiD Simulation

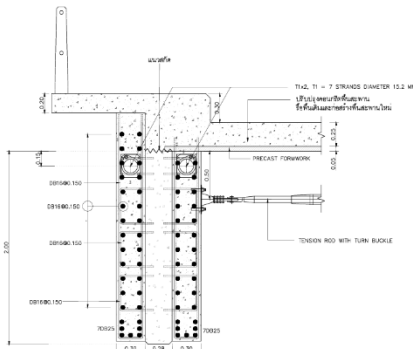
ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตของคานคอนกรีตเสริมเหล็กปลายบาทที่เสริมกำลังด้วยการหุ้มคอนกรีตอัดแรงภายใน ได้อ้างอิงรายละเอียดจากแบบก่อสร้างจริงของโครงสร้างดังที่แสดงในรูปที่ 12, 13 และ โดยแบบจำลองประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก ได้แก่ คอนกรีตเดิม คอนกรีตใหม่ที่ใช้หุ้ม เหล็กเสริมภายใน เหล็กเดือย (Dowel Bars) และลวดอัดแรงฝังภายใน (Prestressing Tendons) สำหรับรายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุทั้งหมดรวมถึงค่าสัมประสิทธิ์ของการคืบแสดงไว้ในตารางที่ 2, 3. นอกจากนี้ ยังได้กำหนดค่ากำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่จุดครากจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งแสดงไว้ในตารางเดียวกัน เพื่อใช้ในการนิยามพฤติกรรมของวัสดุในแบบจำลองการวิเคราะห์



รูปที่ 12 ภาพตัดตามยาวแสดงรายละเอียดแนวอัดแรง [6]



รูปที่ 13 ภาพตัดตามขวางของสะพานช่วงที่เสริมกำลัง [6]



รูปที่ 14 ภาพตัดตามขวางแสดงรายละเอียดเหล็กเสริม [6]

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของคอนกรีต และคุณสมบัติของเหล็กเสริม [6]

คอนกรีตเดิม	
กำลังอัดของคอนกรีต, f_c' (MPa)	24
มอดูลัสยืดหยุ่น, E_c (GPa)	31.68
ความหนาแน่น, Density (kg/m ³)	2,320
คอนกรีตใหม่	
กำลังอัดของคอนกรีต, f_c' (MPa)	40
มอดูลัสยืดหยุ่น, E_c (GPa)	34.13
ความหนาแน่น, Density (kg/m ³)	2320
เหล็กเสริม	
กำลังรับแรงดึงที่จุดครากเหล็ก DB25, f_y (MPa)	443
กำลังรับแรงดึงที่จุดครากเหล็ก DB16, f_y (Mpa)	443
มอดูลัสยืดหยุ่น, E_s (Gpa)	200

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของการคืบตัวคอนกรีต [2]

สัมประสิทธิ์ของการคืบคอนกรีตเดิม	
ความหนา (m)	0.12888
ความชื้นสัมพัทธ์	0.8
อัตราส่วนมวลรวมต่อน้ำซีเมนต์	4.44
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	0.5
การบ่ม	AIR
ระยะเวลาสิ้นสุดการบ่ม	7
สัมประสิทธิ์ของการคืบคอนกรีตใหม่	
ความหนา (m)	0.13728
ความชื้นสัมพัทธ์	0.8
อัตราส่วนมวลรวมต่อน้ำซีเมนต์	4.44
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	0.5
การบ่ม	AIR
ระยะเวลาสิ้นสุดการบ่ม	7

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของลวดอัดแรง [7]

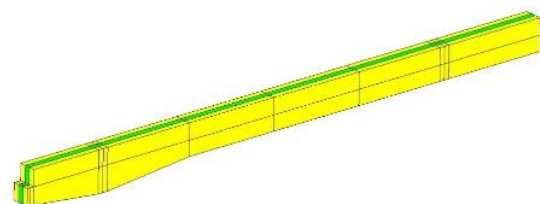
สายเคเบิล	
มอดูลัสยืดหยุ่น, E_s (GPa)	195
กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก, f_y (Mpa)	1581
กำลังรับแรงดึงที่จุดประลัย, f_u (MPa)	1860

ลวดอัดแรงที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ได้รับการกำหนดคุณสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM A416 [7] ซึ่งเป็นมาตรฐานของเหล็กลวดอัดแรงแรงดึงสูงชนิดหลายเส้น (Strand) ที่ใช้ในคอนกรีตอัดแรง โดยเฉพาะเหล็กลวดอัดแรงแบบ Low - Relaxation Seven-Wire Strand ซึ่งใช้ในระบบอัดแรงภายในของโครงสร้าง เช่น คานสะพาน เสา หรือแผ่นพื้น

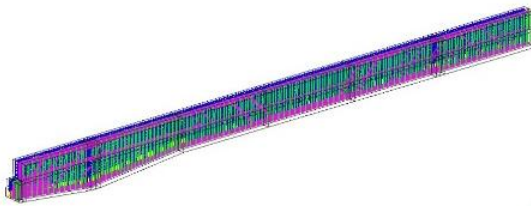
ในแบบจำลองได้มีการสร้างเพลทเหล็กบริเวณตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกคงที่จากสะพานช่วงอื่นที่มากกระทำ โดยเพลทเหล็กที่ใช้กำหนดให้เป็นวัสดุ Solid Steel และใช้แบบจำลองพฤติกรรมแบบ Von Mises 3D [8] รายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุแสดงไว้ใน ตารางที่ 5

ตารางที่ 5 คุณสมบัติเพลทเหล็ก [8]

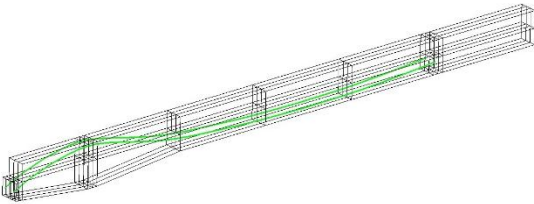
แผ่นเหล็ก	
กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก, f_y (MPa)	550
มอดูลัสยืดหยุ่น, E_s (GPa)	200
อัตราส่วนปัวซอง	0.3



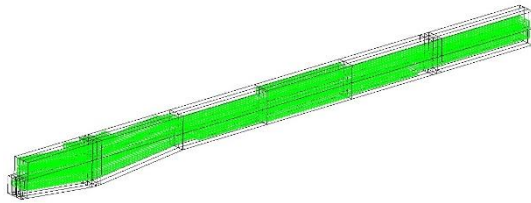
รูปที่ 15 แบบจำลองคอนกรีต



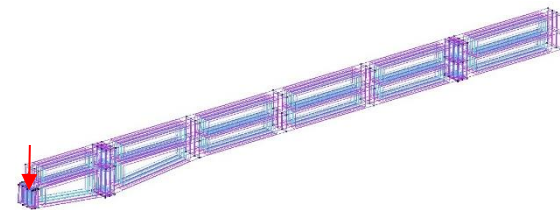
รูปที่ 16 แบบจำลองเหล็กเสริม



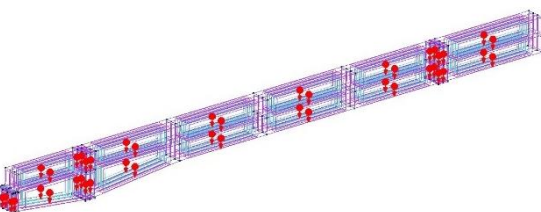
รูปที่ 17 แบบจำลองลวดอัดแรง



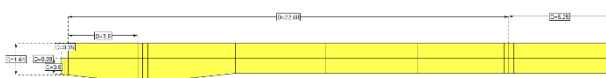
รูปที่ 18 แบบจำลองพื้นผิวระหว่างคอนกรีต



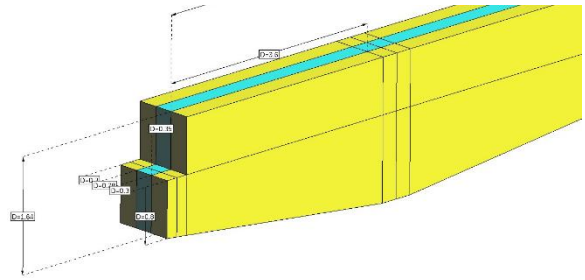
รูปที่ 19 ตำแหน่งน้ำหนักที่กระทำต่อคาน



รูปที่ 20 เงื่อนไขการรื้อน้ำหนักรบรรทุกคงที่



รูปที่ 21 รายละเอียดขนาดและความยาวคานคาน



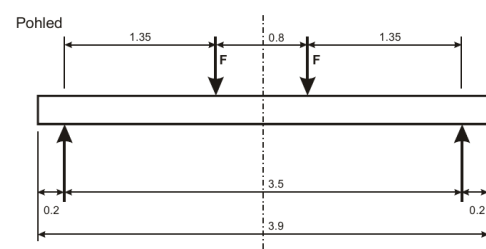
รูปที่ 22 รายละเอียดขนาดและความยาวคานคาน

2.3.6 การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรม ATENA Studio

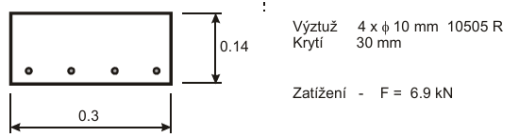
หลังจากดำเนินการสร้างแบบจำลองเรขาคณิตของโครงสร้างคานคาน บ่าและนิยามคุณสมบัติวัสดุต่าง ๆ ด้วยโปรแกรม GiD Simulation แล้ว แบบจำลองดังกล่าวถูกนำเข้าสู่โปรแกรม ATENA Studio [5] ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Finite Element Analysis) ที่สามารถจำลองพฤติกรรมวัสดุได้อย่างละเอียด ทั้งในส่วนของคอนกรีต เหล็กเสริม และลวดอัดแรง โดยในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์ในลักษณะการคืบ (Creep Analysis) ของคอนกรีตภายใต้แรงกระทำคงที่ในระยะยาว เพื่อศึกษาผลกระทบของพฤติกรรมการคืบตัวของคอนกรีตในระยะยาว และผลของเงื่อนไขการยึดเกาะระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตใหม่ โดยกำหนดขอบเขตของแบบจำลองให้สอดคล้องกับสภาพจริงของโครงสร้างในภาคสนาม เช่น การรองรับที่ปลายคานแบบยึดแน่น (Fixed Support) และการกระจายแรงกระทำผ่านพื้นที่โหนดบนแผ่นเหล็ก ในแต่ละกรณีของพฤติกรรมการคืบตัวและสถานะการยึดเกาะที่ต่างกันระหว่างคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่ ได้มีการติดตามพฤติกรรมการเสียรูป รอยร้าวที่เกิดขึ้น และการเปลี่ยนแปลงของแรงในลวดอัดแรงเมื่อเวลาผ่านไป

2.3.7 การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

การตรวจสอบความถูกต้องของของแบบจำลอง ได้ดำเนินการโดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงจากงานวิจัยของ Dr. Jan Vitek [8] ซึ่งทำการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำคงที่อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 360 วัน โดยใช้การทดสอบแบบดัดสี่จุด (Four-point bending test) ซึ่งเป็นวิธีการที่ช่วยกระจายแรงเฉือนออกจากบริเวณกลางคาน ทำให้สามารถสังเกตพฤติกรรมการดัดได้อย่างชัดเจน การทดสอบดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าการโก่งตัว (deflection) ของคานในระยะยาว อันเนื่องมาจากพฤติกรรมการคืบ (creep behavior) ของคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 22 รายละเอียดขนาดและความยาวคานทดสอบ [8]



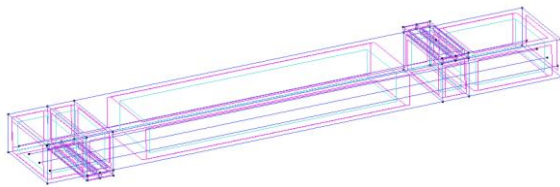
รูปที่ 22 รายละเอียดการเสริมเหล็กในคานทดสอบ [8]

ตารางที่ 6 คุณสมบัติของคอนกรีต และคุณสมบัติของเหล็กเสริม- [8]

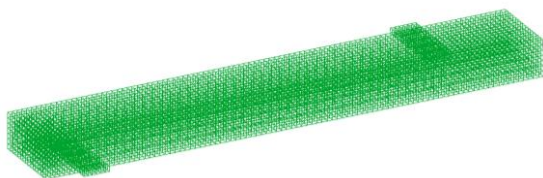
คอนกรีต	
กำลังอัดของคอนกรีต, f_c' (MPa)	43.75
มอดูลัสยืดหยุ่น, E_c (GPa)	34.20
ความหนาแน่น, Density (kg/m ³)	2,370
เหล็กเสริม	
กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก, f_y (MPa)	210
มอดูลัสยืดหยุ่น, E_s (GPa)	400

ตารางที่ 7 คุณสมบัติของการคืบตัวคอนกรีต [8]

สัมประสิทธิ์ของการคืบคอนกรีตเดิม	
ความหนา (m)	0.05138
ความชื้นสัมพัทธ์	0.6
อัตราส่วนมวลรวมต่อปูนซีเมนต์	4.44
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	0.5
การบ่ม	AIR
ระยะเวลาสิ้นสุดการบ่ม	7



รูปที่ 23 แบบจำลองคอนกรีตและเหล็กเสริมของคานทดสอบ



รูปที่ 24 การแบ่งโครงตาข่ายของคอนกรีตและเหล็กเสริมของคานทดสอบ

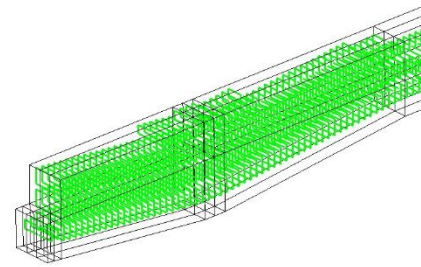
3. ผลการดำเนินงาน

ในบทความนี้ได้ดำเนินการจำลองการศึกษาโดยใช้คานคอนกรีตเสริมเหล็กปลายากที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยการหุ้มคอนกรีตอัดแรงภายในเป็นต้นแบบ เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างในระยะยาว โดยเฉพาะผลกระทบจากพฤติกรรมการคืบตัวของคอนกรีตและลักษณะการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวคอนกรีต ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบเสริมกำลัง ในการวิเคราะห์มุ่งเน้นที่ช่วงเวลาการรับน้ำหนักที่

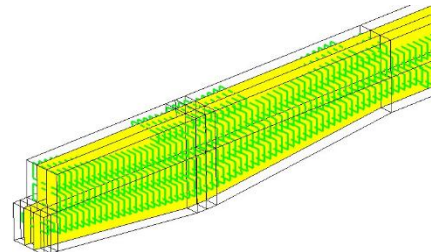
10 ปี ซึ่งสะท้อนผลกระทบระยะยาวที่ครอบคลุมของคอนกรีต และผลของลักษณะการยึดเกาะระหว่างคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่ 4 รูปแบบ ได้แก่

- 1) กรณียึดเกาะแบบ เฉพาะเหล็ก Dowel
- 2) กรณียึดเกาะแบบ เหล็ก Dowel ร่วมกับ Smooth Interface
- 3) กรณียึดเกาะแบบ เหล็ก Dowel ร่วมกับ Rough Interface

ผลจากการจำลองการศึกษาในงานวิจัยนี้ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของพฤติกรรมการคืบและการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวที่มีต่อการโก่งตัวในระยะยาวและรอยแตกร้าวของคานบาค่าที่เสริมกำลัง ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของโครงสร้างเสริมกำลังได้อย่างชัดเจนในระยะยาว และสนับสนุนการออกแบบและบูรณะโครงสร้างให้มีความมั่นคงปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

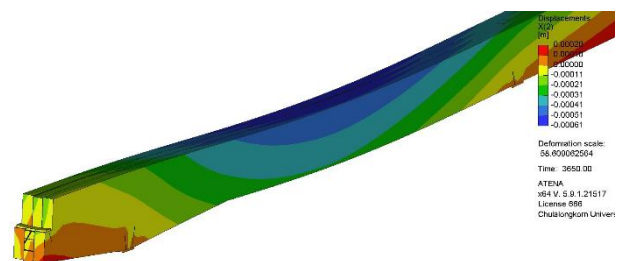


รูปที่ 25 การยึดเกาะเฉพาะเหล็ก Dowel

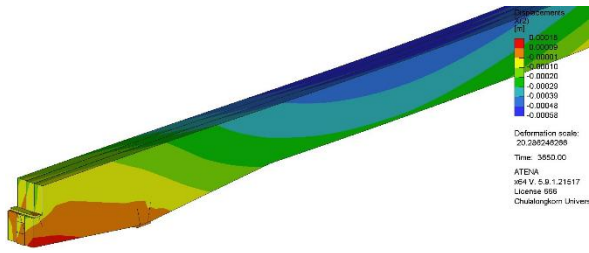


รูปที่ 26 การยึดเกาะด้วยเหล็ก Dowel ร่วมกับความขรุขระของพื้นผิวสัมผัส

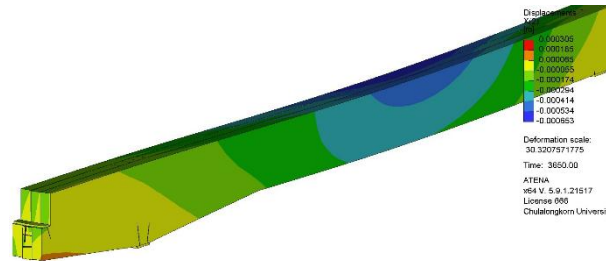
3.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ



รูปที่ 27 รอยแตกร้าวและการเคลื่อนตัวบริเวณพื้นผิวกรณีการยึดเกาะเฉพาะเหล็ก Dowel

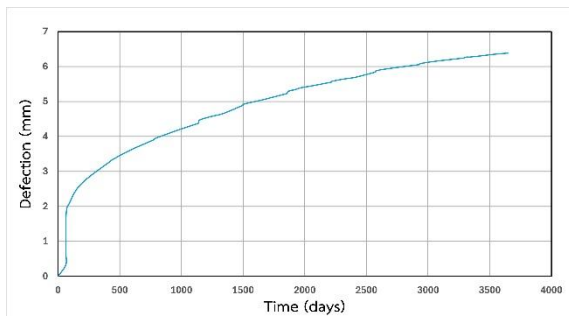


รูปที่ 28 รอยแตกร้าวและการเคลื่อนตัวของบริเวณพื้นผิว
กรณีการยึดเกาะแบบเกลี้ยง Dowel ร่วมกับ Smooth Interface

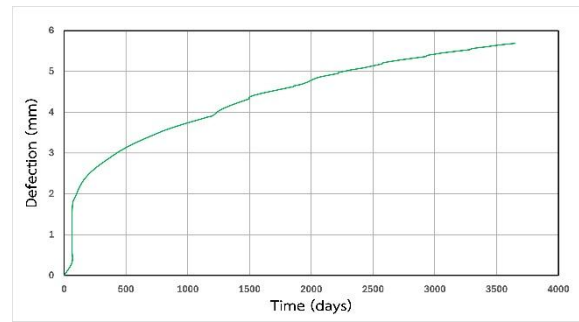


รูปที่ 29 รอยแตกร้าวและการเคลื่อนตัวของบริเวณพื้นผิว
กรณีการยึดเกาะแบบเกลี้ยง Dowel ร่วมกับ Rough Interface

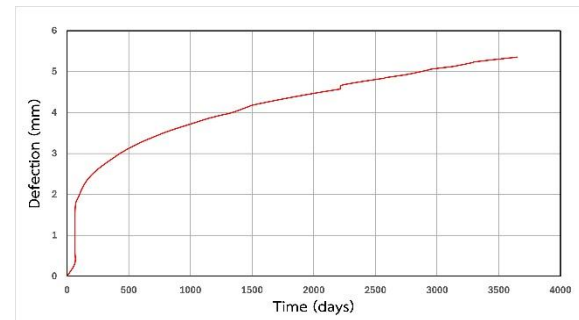
จากรูปที่ 27 ถึง 29 แสดงผลของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นและการเคลื่อนตัวของบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นผิวคอนกรีต ภายใต้เงื่อนไขการยึดเกาะระหว่างคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่ที่แตกต่างกัน โดยพบว่าในกรณีที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวจากผิวสัมผัส (Dowel Only) แนวรอยแตกร้าวมีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนบริเวณรอยต่อและปลายบาค่า สะท้อนถึงความไม่ต่อเนื่องในการถ่ายโอนแรงเฉือน ซึ่งนำไปสู่การกระจุกตัวของแรงดึงและการเสียรูปในตำแหน่งดังกล่าว ในขณะที่กรณีที่มีการปรับปรุงสภาพผิวให้เรียบและมีการทำให้ผิวขรุขระตามลำดับ พบว่าการกระจายของแรงและการลดลงของรอยแตกร้าวที่ผิวแสดงถึงประสิทธิภาพในการถ่ายโอนแรงเฉือนที่ดีกว่า โดยเฉพาะในกรณีที่ผิวขรุขระ พบว่าช่วยลดการเคลื่อนตัวและควบคุมการขยายตัวของรอยแตกร้าวที่ผิวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณสมบัติของผิวรอยต่อมีความสำคัญอย่างยิ่งในการเพิ่มสมรรถนะของโครงสร้างเสริมกำลังในระยะยาว โดยสามารถลดการสะสมของการเสียรูปและการเคลื่อนตัวที่ไม่พึงประสงค์ในระบบได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 30 กราฟแสดงการโก่งตัวในระยะยาวของคานที่เสริมกำลัง
กรณีการยึดเกาะเฉพาะเกลี้ยง Dowel

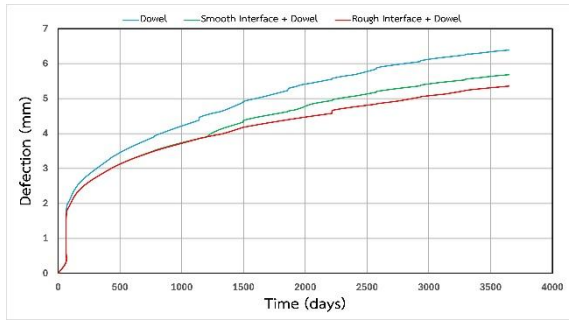


รูปที่ 31 กราฟแสดงการโก่งตัวในระยะยาวของคานที่เสริมกำลัง
กรณีการยึดเกาะแบบเกลี้ยง Dowel ร่วมกับ Smooth Interface



รูปที่ 32 กราฟแสดงการโก่งตัวในระยะยาวของคานที่เสริมกำลัง
กรณีการยึดเกาะแบบเกลี้ยง Dowel ร่วมกับ Rough Interface

จากรูปที่ 30 ถึง 32 แสดงผลการวิเคราะห์การโก่งตัวของบริเวณช่วงกลางของคานบาค่าที่ได้รับการเสริมกำลัง ภายใต้แรงกระทำคงที่เป็นระยะเวลา 10 ปี โดยพิจารณาผลกระทบของพฤติกรรมการคืบตัวของคอนกรีตร่วมกับลักษณะการยึดเกาะที่รอยต่อระหว่างคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่ ผลการวิเคราะห์พบว่า ระยะเวลาในช่วงต้น (0-1,000 วัน) พฤติกรรมการโก่งตัวของคานในทุกกรณีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์การคืบ (Creep Coefficient) ที่สูงในช่วงเริ่มต้นของการรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ และเมื่อเวลาผ่านไปค่าการโก่งตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยกรณีของการยึดเกาะเฉพาะเกลี้ยง Dowel มีค่าโก่งตัวสูงสุดประมาณ 6.3 มิลลิเมตร ที่เวลา 3,650 วัน ในขณะที่กรณีการยึดเกาะแบบเกลี้ยง Dowel ร่วมกับ Smooth Interface ให้ค่าโก่งตัวประมาณ 5.5 มิลลิเมตร และกรณีการยึดเกาะแบบเกลี้ยง Dowel ร่วมกับ Rough Interface ให้ค่าโก่งตัวต่ำที่สุดประมาณ 4.8 มิลลิเมตร ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการถ่ายโอนแรงเฉือนที่รอยต่อระหว่างคอนกรีตเดิมและใหม่ มีบทบาทสำคัญต่อการโก่งตัวสะสมของโครงสร้างในระยะยาวอย่างชัดเจน

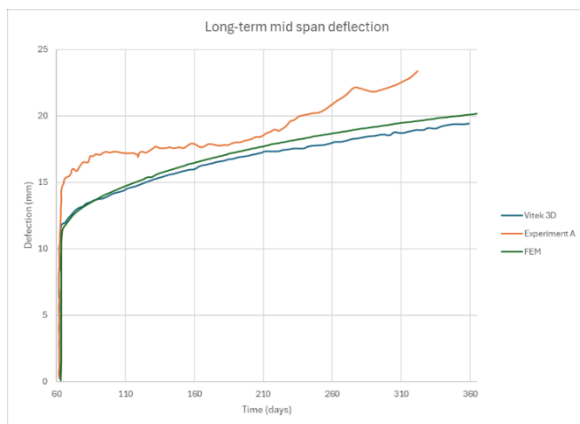


รูปที่ 33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการโก่งตัวในระยะยาวของคานเสริมกำลังภายใต้เงื่อนไขการยึดเกาะที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 33 แสดงถึงการเปรียบเทียบพฤติกรรมการโก่งตัวในระยะยาวของคานภายใต้เงื่อนไขการยึดเกาะที่แตกต่างกัน พบว่าการเพิ่มความสามารถในการถ่ายโอนแรงเฉือนบริเวณรอยต่อ เช่น การทำผิวสัมผัสให้ขรุขระร่วมกับการใช้เหล็ก Dowel มีผลโดยตรงต่อการลดการสะสมของการเสียรูปในโครงสร้างได้อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการกระจายแรงที่ต่อเนื่องบริเวณรอยต่อ ดังนั้นลักษณะทางกลบริเวณรอยต่อและกลไกการยึดเกาะจึงมีบทบาทสำคัญต่อการควบคุมพฤติกรรมการโก่งตัวของคานในระยะยาว ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพและสมรรถนะโดยรวมของระบบเสริมกำลังในระยะยาว

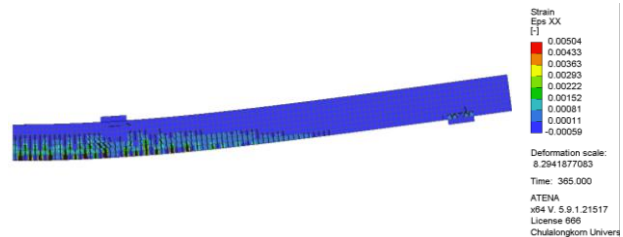
3.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้อง

จากผลการวิเคราะห์การคืบตัวของคานคอนกรีตภายใต้แรงกระทำคงค้าง พบว่าค่าการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานตลอดระยะเวลา 360 วัน มีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์แบบจำลองมิติของ Vitek3D และผลการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ โดยแบบจำลองทั้งสองสามารถจำลองแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของการโก่งตัวได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและความถูกต้องของแบบจำลอง แม้ว่าจะไม่ได้มีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติมใด ๆ



รูปที่ 34 แผนภาพเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวกลางคานและระยะเวลา จากการวิเคราะห์และผลการทดสอบของคานทดสอบ

นอกจากนี้ รูปที่ 35 ได้นำเสนอการกระจายตัวของความกว้างรอยแตก (Crack Width) ที่เกิดขึ้นในคานหลังจากระยะเวลา 360 วัน ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นตำแหน่งและระดับความเสียหายของโครงสร้างได้อย่างชัดเจน ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสอดคล้องกับพฤติกรรมที่คาดการณ์ในการเคียวร้าวบริเวณกึ่งกลางคาน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด



รูปที่ 35 ความกว้างของรอยร้าวและการโก่งตัวของคานทดสอบ

4. บทสรุป

จากการศึกษาพฤติกรรมการคืบของคานบาคาที่ได้รับเสริมกำลังด้วยการหุ้มคอนกรีตอัดแรงภายใน โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น 3 มิติ (Nonlinear Finite Element Method) ผ่านโปรแกรม ATENA Studio พบว่า พฤติกรรมการคืบของคอนกรีตส่งผลโดยตรงต่อการสะสมของการเสียรูป การโก่งตัว และพฤติกรรมการแตกร้าวในระยะยาวของโครงสร้าง แม้การเสริมกำลังด้วยการหุ้มคอนกรีตอัดแรงภายในจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการรับแรงของคานได้ในช่วงต้น แต่ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า การคืบตัวภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่เปลี่ยนระยะเวลา 10 ปี ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมการถ่ายแรงและทำให้เกิดความเสียหายสะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณรอยต่อระหว่างคอนกรีตเดิมและคอนกรีตใหม่ ทั้งนี้การพิจารณารูปแบบการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวคอนกรีต เช่น การใช้เหล็ก Dowel ร่วมกับการปรับผิวสัมผัสให้ขรุขระ มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความต่อเนื่องของการถ่ายโอนแรงเฉือนและลดการกระจุกตัวของแรงดึงบริเวณรอยต่อ ส่งผลให้เกิดการกระจายแรงที่มีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น ผลการศึกษานี้จึงสามารถใช้เป็นแนวทางในการประเมินประสิทธิภาพของระบบการเสริมกำลังในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องรับน้ำหนักบรรทุกในระยะยาวได้อย่างแม่นยำและเหมาะสมในทางวิศวกรรม

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ กรมทางหลวง และเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับสะพาน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อการดำเนินงานวิจัยฉบับนี้

นอกจากนี้ คณะผู้จัดทำขอแสดงความขอบคุณอย่างสูงต่อ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการสนับสนุนด้านสถานที่ เครื่องมือ อุปกรณ์ทดลอง และความเอื้อเฟื้อในด้านวิชาการตลอดกระบวนการศึกษาและปฏิบัติการตั้งแต่เริ่มต้นจนแล้วเสร็จอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2015). *AASHTO LRFD Bridge Design Specification, 7th Edition*. Washington, DC.
- [2] Du Béton, F. I. (2010). *Model code 2010—First complete draft*. fib Bulletin, 55, 318.
- [3] Randl, N. (2013). *Design recommendations for interface shear transfer in fib Model Code 2010*. Structural Concrete, 14(3), 230-241.
- [4] Bockhold, J., & Stangenberg, F. (2004). *Modellierung des nichtlinearen Kriechens von Beton*. Beton-und Stahlbetonbau, 99(3), 209-216.
- [5] Zdenka Procházková, Jan Červenka, Zdeněk Janda, Dobromil Pryl, Jitka Mikolášková. (2019). *ATENA Program Documentation (ATENA Science – GiD Tutorial)*, Červenka Consulting s.r.o.
- [6] สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง. (2563). *โครงการศึกษาจัดทำแนวทางบูรณะสะพานก่อนประวัติศาสตร์ของกรมทางหลวงที่ก่อสร้างก่อนปี พ.ศ.2500*. บริษัท แอสโคนา เอ็ม จำกัด.
- [7] ASTM. (2022). *Standard Specification for Low-Relaxation and Stress-Relieved Seven-Wire Steel Strand for Prestressed Concrete*. ASTM A416/A416M-22.
- [8] Vladimír Červenka, Libor Jendele, and Jan Červenka. (2022). *ATENA Program Documentation (Theory)*, Červenka Consulting s.r.o.
- [9] Bazant, Z. P., & Baweja, S. (2000). *Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: Model B3*. ACI Special Publications, 194, 1-84.