

การศึกษาค่ากำลังอัดระบุที่เหมาะสมของรอยต่อแบบเปียกของโครงสร้างคานรูปกล่องสำเร็จรูป

Study on the appropriate nominal strength of Wet Joints of Precast Box Girder Structures

จิรภัทร พัดชื่น¹ และ ทรงพล จารุวิศิษฐ์^{2,*}

¹ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)

² อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)

*Corresponding author; E-mail address: fengspc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บริเวณรอยต่อแบบเปียก (Wet Joint) ของระบบชิ้นส่วนคานรูปกล่องสำเร็จรูป (Precast Segmental Box Girder) ซึ่งเป็นรอยต่อสำหรับประสานช่องว่างของคานสะพานทั้งช่วง โดยทั่วไปจะก่อสร้างโดยใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัย (Ultimate Compressive Strength) มีค่าเท่ากับชิ้นส่วนคานที่ผลิตจากโรงงานและไม่มีการเสริมเหล็กเพิ่มเติม แต่บางโครงการก่อสร้างประสบปัญหาความเสียหายจากรอยตอดังกล่าวที่เกิดการวิบัติ ส่งผลให้โครงสร้างทั้งช่วงความยาวเกิดการพังทลาย บทความนี้จึงศึกษาพฤติกรรมของจตุรรอยต่อแบบเปียก ผลิตชิ้นงานทดสอบกำลังรับแรงอัดของคานอย่างง่าย (Simple Beam) ที่มีชิ้นส่วนรอยต่อแบบเปียก ซึ่งออกแบบชิ้นงานและวิธีการทดสอบให้มีพฤติกรรมเสมือนคานสะพานระบบชิ้นส่วนคานรูปกล่องสำเร็จรูป โดยปรับเปลี่ยนค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต เพื่อให้ทราบค่ากำลังอัดประลัยระบุที่เหมาะสมของรอยต่อแบบเปียก สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการกำหนดค่าแนะนำกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเพื่อใช้เป็นมาตรฐานสำหรับการออกแบบระบบชิ้นส่วนคานรูปกล่องสำเร็จรูปที่เหมาะสมในอนาคต และนอกจากนั้นยังได้เปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตธรรมดากับคอนกรีตชนิดคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Concrete) ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นคือ การพัฒนากำลังได้รวดเร็ว และลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งช่วยลดปัญหาสภาวะโลกร้อนในปัจจุบันตามที่ประเทศไทยมุ่งมั่นที่จะบรรลุเป้าหมายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emissions) ภายในปี 2065

คำสำคัญ: คานรูปกล่องสำเร็จรูป, รอยต่อแบบเปียก, กำลังอัดประลัย, คอนกรีตคาร์บอนต่ำ

Abstract

The wet joint of the precast segmental box girder system, which are used to connect the gaps between bridge girders along their span is typically constructed with an ultimate compressive strength of the concrete equal to that of factory-produced girder segments, without additional reinforcement. However, some construction projects have experienced failures at these joints, leading to the collapse of entire spans. This study examines the behavior of wet joints by producing simple beam test specimens incorporating wet joint segments. The experiments were designed to replicate the behavior of precast segmental box girder bridge systems, with variations in the ultimate compressive strength of the concrete in order to verify

the appropriate nominal concrete strength of wet joints. The Experimental results are expected to give guidelines to specify the ultimate strength of concrete in the design standard for precast segmental box girder systems in the future. Moreover, the study compares ordinary concrete with low-carbon concrete, which offers distinct advantages, such as rapid strength development and reduced carbon dioxide emissions, contributing to the mitigation of global warming. This aligns with Thailand's commitment to achieving net-zero greenhouse gas emissions by 2065.

Keywords: Precast Segmental Box Girder, Wet Joint, Ultimate Compressive Strength, Low Carbon Concrete

1. คำนำ

ปัจจุบันงานก่อสร้างสะพานข้ามทางแยกส่วนใหญ่ออกแบบเป็นระบบชิ้นส่วนคานรูปกล่องสำเร็จรูป (Precast Segmental Box Girder) สามารถก่อสร้างได้รวดเร็วกว่าโครงสร้างชนิดหล่อในที่ (Cast In Place) และสามารถบริหารจัดการจรรยาบรรณระหว่างการก่อสร้างได้ง่ายดายกว่า เนื่องจากผลิตชิ้นส่วนโครงสร้างจากโรงงานขนส่ง และประกอบติดตั้งโดยไม่ต้องปิดการจราจร

การออกแบบโครงสร้างสะพานชิ้นส่วนคานรูปกล่องสำเร็จรูปมักไม่มีการพิจารณารอยต่อสุดท้าย หรือชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีชื่อเรียกว่า “รอยต่อแบบเปียก” หรือ “Wet Joint” เป็นรอยต่อสำหรับประสานช่องว่าง (Gap) ของคานสะพานทั้งช่วง (Beam Span) ก่อนดำเนินการดึงลวดอัดแรง (Prestressed Tendon) ซึ่งรอยตอดังกล่าวไม่มีมาตรฐานหรือข้อกำหนดในการออกแบบ การก่อสร้างโดยทั่วไปจะใช้วิธีเทคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัย (Ultimate Compressive Strength) มีค่าเท่ากับกำลังอัดประลัยสำหรับชิ้นส่วนคานที่ผลิตจากโรงงาน และไม่มีการเสริมเหล็กเพิ่มเติมบริเวณดังกล่าว

โครงการก่อสร้างบางแห่งประสบปัญหาความเสียหายที่เกิดจากรอยตอดังกล่าววิบัติ (Failure) โครงสร้างทั้งช่วงความยาวเกิดการพังทลาย และส่งผลต่อโครงสร้างอื่น ๆ อ้างอิงถึงกรณีโครงการก่อสร้างสะพานข้ามถนนเลียบคลองลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร เกิดความเสียหายระหว่างก่อสร้างสะพานชิ้นส่วนคานรูปกล่องสำเร็จรูปฝั่งลุ่มทั้งช่วงคาน ข้อสันนิษฐานโดยสมาคมวิศวกรโครงสร้างแห่งประเทศไทย [1] พบว่า เกิดการวิบัติที่บริเวณรอยต่อแบบเปียก (Wet Joint) พัฒนากำลังไม่เต็มที่ ไม่สามารถรับกำลังของการเคลื่อนตัวโครงเหล็กติดตั้งคานสะพาน (Launcher Gantry) ได้เพียงพอ

งานวิจัยนี้จึงดำเนินการศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อแบบเปียก เพื่อให้ทราบค่ากำลังอัดประลัยระบุที่เหมาะสม เป็นมาตรฐานสำหรับการออกแบบระบบชิ้นส่วนคานรูปกล่องสำเร็จรูปที่เหมาะสมในอนาคต และนอกจากนั้นยังได้เปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตธรรมดากับคอนกรีตชนิดคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Concrete) ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นคือ การพัฒนากำลังได้รวดเร็ว และลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Reducing Carbon dioxide Emissions) จากการใช้งานคอนกรีต เปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตแบบทั่วไป (Normal Concrete) และคอนกรีตคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Concrete) เพื่อช่วยลดปัญหาสภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน ตามที่ประเทศไทยมุ่งมั่นที่จะบรรลุเป้าหมายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emissions) ภายในปี 2065 และการใช้งานคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน เช่น งานถนนและสะพานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และความเป็นกลางทางคาร์บอน

2. วัตถุประสงค์ ขอบเขตการศึกษา

2.1 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อแบบเปียก (Wet Joint) ของโครงสร้างคานรูปกล่องสำเร็จรูป (Precast Segmental Box Girder) ดังแสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2
- 2) จำลองพฤติกรรมของคานและรอยต่อโดยการผลิตชิ้นงานทดลอง และปรับเปลี่ยนคุณสมบัติวัสดุ (Concrete Properties) เพื่อหาค่ากำลังอัดประลัยระบุที่เหมาะสม (Ultimate Compressive Strength)
- 3) เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการใช้งานคอนกรีตเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Reducing Carbon dioxide Emissions)



รูปที่ 1 ตำแหน่งของจุดรอยต่อแบบเปียก (Wet Joint)



รูปที่ 2 การเทคอนกรีตบริเวณจุดรอยต่อแบบเปียก (Wet Joint)

2.2 ขอบเขตการศึกษา

- 1) ศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อแบบเปียก (Wet Joint) ของโครงสร้างคานรูปกล่องสำเร็จรูป (Precast Segmental Box Girder) เพื่อนำพฤติกรรมมาออกแบบชิ้นงานและวิธีการทดสอบ
- 2) ผลิตชิ้นงานทดสอบกำลังรับแรงอัดของคานอย่างง่าย (Simple Beam) ที่มีชิ้นส่วนรอยต่อแบบเปียก ซึ่งชิ้นงานและวิธีการทดสอบมีพฤติกรรมเหมือนคานสะพานระบบชิ้นส่วนคานรูปกล่องสำเร็จรูป โดยปรับเปลี่ยนค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต เพื่อให้ทราบค่ากำลังอัดประลัยระบุที่เหมาะสมของรอยต่อแบบเปียก
- 3) เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการใช้งานคอนกรีต ในด้านการลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตแบบทั่วไป (Normal Concrete) และคอนกรีตคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Concrete)

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

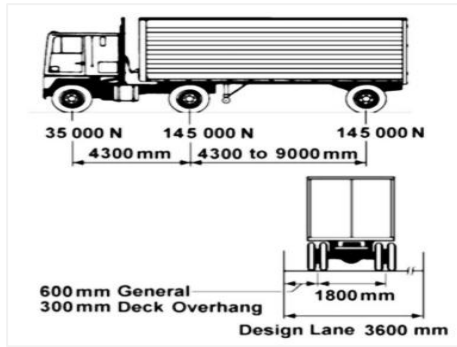
โครงสร้างสะพานระบบชิ้นส่วนคานรูปกล่องสำเร็จรูปสำหรับงานวิจัยนี้ กำหนดขอบเขตเกี่ยวกับสะพานสำหรับยานพาหนะชนิดรถยนต์และรถบรรทุกเท่านั้น โดยมีการทบทวนน้ำหนักบรรทุกและแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างสะพานระบบชิ้นส่วนคานรูปกล่องสำเร็จรูป (Precast Segmental Box Girder) และบริเวณจุดรอยต่อแบบเปียก (Wet Joint) เพื่อตรวจสอบน้ำหนักคงที่ (Dead Load) น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) น้ำหนักกระทำทางช้างที่เกิดจากการอัดแรง (Prestressed) และนำมาออกแบบชิ้นงานและการทดสอบโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 น้ำหนักคงที่ (Dead Load)

งานวิจัยได้ทำการออกแบบชิ้นงานตัวอย่างทดสอบ โดยพิจารณาแบบจากขนาดและมิติที่ระบุตามแบบก่อสร้างของโครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพทางแยกต่างระดับทับข้าง ก่อสร้างสะพานเลี้ยวขวาจากทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 9 ไปยังทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 7 สะพานมีขนาด 2 ช่องจราจรพร้อมไหล่ทาง ความกว้างผิวจราจรประมาณ 10 เมตร พื้นที่หน้าตัดของคานรูปกล่องสำเร็จรูปขนาด 11.55 ตารางเมตรสำหรับหน้าตัดบริเวณรอยต่อ (Wet Joint) ซึ่งไม่มีช่องว่างบริเวณกึ่งกลางหน้าตัด ความหนาบริเวณรอยต่อประมาณ 16.25 เซนติเมตร ดังนั้น รอยตอดังกล่าวสำหรับโครงสร้างปกติจะมีปริมาตร 1.88 ลูกบาศก์เมตร คูณค่าน้ำหนักชนิดคอนกรีตเสริมเหล็กจะได้น้ำหนักคงที่ของจุดรอยต่อแบบเปียก (Wet Joint) เท่ากับ 4.61 ตัน เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักตลอดความยาวช่วง (Span Length) ที่มีน้ำหนักประมาณ 520 ตัน รอยต่อแบบเปียกจะคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 0.88 โดยน้ำหนักส่วนของขนาดและปริมาตรที่ได้มาออกแบบสัดส่วนชิ้นงานตัวอย่างทดสอบต่อไป

3.2 น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load)

น้ำหนักบรรทุกจร ได้แก่ น้ำหนักของยานพาหนะที่จะวิ่งบนสะพานอันประกอบไปด้วย รถบรรทุก รถโดยสาร รถยนต์ส่วนบุคคล น้ำหนักสมทบและน้ำหนักอื่น ๆ โดยกรมทางหลวงมีมาตรฐานในการออกแบบโดยใช้ค่าน้ำหนักออกแบบของรถชนิดรถบรรทุกพ่วงหนัก (Typical Heavy Vehicle HL-93) สำหรับประเมินน้ำหนักสูงสุดที่โครงสร้างสามารถรองรับได้ น้ำหนักบรรทุกจรที่เกิดจากน้ำหนักยานพาหนะตามมาตรฐานสูงสุด 32.5 ตัน (น้ำหนักรถสูงสุด) หรือสูงสุด 14.5 ตันต่อเพล (กรณีวิเคราะห์เป็นเพล) โดยรูปแบบน้ำหนักรถชนิดรถบรรทุกพ่วงหนักและค่ามาตรฐานออกแบบของกรมทางหลวงดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 รูปแบบน้ำหนักรถชนิดรถบรรทุกพ่วงหนัก
และค่ามาตรฐานออกแบบของกรมทางหลวง

งานวิจัยนี้ประเมินว่าอาจมีความเป็นไปได้ที่รถชนิดดังกล่าวเป็นรถบรรทุกวัสดุก่อสร้างหรือรถบรรทุกคันติดตั้งโครงสร้าง (Launcher Gantry) ซึ่งน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดจำกัดรวมระหว่างน้ำหนักรถและน้ำหนักสิ่งของบรรทุกมีค่ารวม 14.5 ตัน โดยคิดที่น้ำหนักเต็มส่วนร้อยละ 100 ตามมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์สะพานที่มีขนาด 2 ช่องจราจร โดยใช้การออกแบบเป็นน้ำหนักกระทำแบบจุด (Point Load) กระทำบริเวณกึ่งกลางของโครงสร้างซึ่งเกิดโมเมนต์สูงสุด (Maximum Moment) บริเวณกึ่งกลางโดยน้ำหนักและแรงกระทำที่เกิดขึ้นนำมาใช้ในการออกแบบชิ้นงานและวิธีการทดสอบของงานวิจัย

3.3 พฤติกรรมของแรงที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อแบบเปียก (Wet Joint)

แรงอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อแบบเปียก สำหรับโครงสร้างสะพานชนิดคานรูปกล่องสำเร็จรูป [2] งานวิจัยนี้ได้ทบทวนเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมที่อาจเกิดขึ้น และนำมาตรวจสอบว่าแรงดังกล่าวสูงเกินกว่าค่าน้ำหนักบรรทุกจรที่จะออกแบบหรือไม่ เพื่อให้ได้ค่าน้ำหนักสูงสุดสำหรับประเมินและออกแบบชิ้นงานตัวอย่างทดสอบและวิธีการทดสอบที่เหมาะสม โดยที่พฤติกรรมของแรงที่อาจเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อแบบเปียกประกอบด้วย

- 1) น้ำหนักกระแทก (Impact) หรือ น้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม (Surcharge Load) เป็นหน่วยแรงซึ่งเกิดจากน้ำหนักบรรทุกจรของรถบรรทุกที่มีการเคลื่อนตัว การสั่นสะเทือน และการเขย่ากระแทกต่อตัวสะพาน โดยแรงที่เกิดขึ้นคิดเป็นร้อยละ 75 ของน้ำหนักบรรทุกจร (ไม่เกินกว่าค่าน้ำหนักจรสูงสุดออกแบบ)
- 2) แรงตามความยาวของสะพาน (Longitudinal Forces) เกิดจากการเร่งและการหยุดของน้ำหนักบรรทุกจร โดยแรงที่เกิดขึ้นคิดเป็นร้อยละ 25 ของน้ำหนักบรรทุกจร (ไม่เกินกว่าค่าน้ำหนักจรสูงสุดออกแบบ)
- 3) แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Forces) โครงสร้างสะพานรองรับการจราจรต้องออกแบบให้รับแรงหนีศูนย์กลางตามรัศมีกระทำในทุกช่องเดินรถ คิดเป็นร้อยละ 2 ของน้ำหนักบรรทุกจร (ไม่เกินกว่าค่าน้ำหนักจรสูงสุดออกแบบ)

3.4 แรงเฉือน (Shear Force)

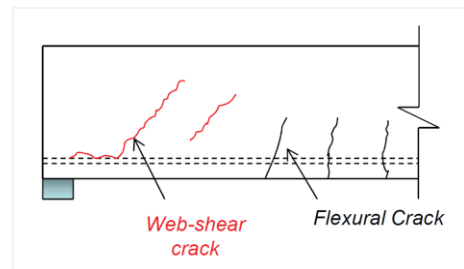
แรงเฉือนในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน คือ แรงที่เกิดจากการกระทำของการน้ำหนักที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะของการขัดขวางหรือเปลี่ยนแปลงการจัดตำแหน่งของโครงสร้างสะพานในทิศทางขวางกับแกนโครงสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของสะพานที่ต้องรับแรงจาก

รถยนต์หรือแรงจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ การคำนวณแรงเฉือนมีความสำคัญในการออกแบบโครงสร้างสะพานเพื่อป้องกันความเสียหายและการแตกร้าวของคานสะพาน รูปแบบและพฤติกรรมของแรงเฉือนเกิดขึ้นเมื่อสะพานรับน้ำหนัก ทั้งน้ำหนักตัวเองและน้ำหนักบรรทุกจรรอยต่อแบบเปียกจะต้องรับแรงเฉือนตามระนาบ (Interface Shear) ระหว่างชิ้นส่วนที่หล่อเสร็จ (Precast) กับรอยต่อแบบเปียกซึ่งเป็นคอนกรีตที่เทภายหลัง (In-situ Concrete) โดยงานวิจัยทำการออกแบบชิ้นงานตัวอย่างทดสอบเป็นคานอย่างง่าย (Simple Beam) ที่มีจุดรองรับบริเวณปลายคานทั้งสองด้านและแรงกระทำสูงสุดกระทำแบบจุดบริเวณกึ่งกลางคาน

การเสียหายด้วยแรงเฉือนในคาน (Shear Failure in Beams) เป็นหนึ่งในรูปแบบความเสียหายหลักที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง โดยเฉพาะในคานที่รองรับน้ำหนักมาก โดยทั่วไปแรงเฉือนจะพยายามตัดคานในแนวดิ่ง หรือบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงมาก เช่น ใกล้จุดรองรับ (Support) ปัจจัยที่ส่งผลต่อความต้านทานแรงเฉือน ได้แก่ ค่ากำลังอัดของคอนกรีต เหล็กเสริมรับแรงเฉือน (เหล็กปลอก) และความลึกของคาน พฤติกรรมความเสียหายจากแรงเฉือนในคานคอนกรีตเสริมเหล็กมี 2 ลักษณะ ประกอบด้วย

3.4.1 บริเวณที่มีแรงเฉือนสูงและโมเมนต์ดัดต่ำ

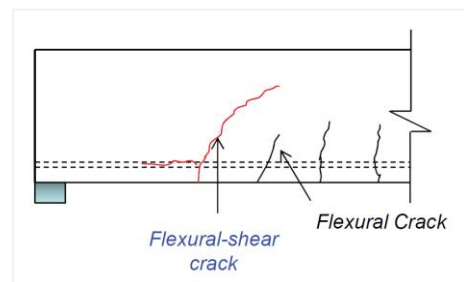
ความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับบริเวณที่มีแรงเฉือนสูงและโมเมนต์ดัดต่ำ (Large shear and Small Bending) จะเกิดรอยร้าวเฉือนในเวคคาน (Web-shear) เมื่อแรงดึงในแนวนอนมีค่าถึงความต้านแรงดึงของคอนกรีต ลักษณะความเสียหายดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
สำหรับบริเวณที่มีแรงเฉือนสูงและโมเมนต์ดัดต่ำ

3.4.2 บริเวณที่มีแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูง

ความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับบริเวณที่มีแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูง (Large shear and Bending Moment) จะเกิดรอยร้าวเฉือนจากดัด (flexural-shear crack) เมื่อแรงดึงในแนวนอนมีค่าถึงความต้านแรงดึงของคอนกรีต มักพบได้บ่อยกว่ารอยร้าวในเวคคาน (Web-shear) ลักษณะความเสียหายดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
สำหรับบริเวณที่มีแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูง

3.5 น้ำหนักกระทำทางข้างที่เกิดจากการอัดแรง (Prestressed)

แรงที่เกิดจากการใช้อุปกรณ์อัดแรง (Prestressing Tendons) ทำให้เกิดการยืดหรือบีบอัดของวัสดุในโครงสร้างสะพาน เพื่อเพิ่มความทนทานและต้านทานแรงดึงหรือแรงอัดในโครงสร้าง ส่งผลให้เกิดแรงทางข้างที่มีผลต่อการกระจายแรงภายในโครงสร้างสะพาน ในกรณีของสะพานชนิดคานรูปกล่องที่มีการอัดแรงโดยใช้ระบบคอนกรีตอัดแรง (Prestressed Concrete) จำเป็นต้องพิจารณาความยืดหยุ่นของวัสดุและลักษณะการกระจายของแรงที่เกิดจากการอัดแรง เช่น คำนึงถึงการกระจายแรงในแกนทางข้างและแรงดึง (Tension) ในแต่ละจุดของสะพานเพื่อให้สะพานสามารถรับน้ำหนักได้โดยไม่เกิดความเสียหายจากการยืดหรือบีบอัดที่มากเกินไป

ค่าน้ำหนักสูงสุดจากน้ำหนักการอัดแรงขึ้นส่วนคานสะพานทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นคานสะพานตลอดช่วง มีการระบุไว้ในแบบก่อสร้างที่มีการใช้ลวดอัดแรง 12.7 มิลลิเมตรถึง 15.2 มิลลิเมตร ที่แรงดึงของลวดอัดแรง 73-156 ตันต่อเส้น จำนวน 16 เส้น ค่าน้ำหนักกระทำทางข้างจากการอัดแรงมีค่าโดยประมาณ 1,168-2,496 ตัน การดึงลวดอัดแรงในระหว่างการก่อสร้างจะมีสัดส่วนการดึงเป็นลำดับ ได้แก่ ดำเนินการเรียงชิ้นส่วนคานสะพานรูปกล่องเข้าด้วยกันจะดึงลวดอัดแรงร้อยละ 10 ของแรงทั้งหมดเพื่อจัดเรียงให้เรียบร้อย หลังจากนั้นเมื่อดำเนินการก่อสร้างเสร็จตลอดช่วงจะดึงลวดร้อยละ 50 ถึง 80 ของแรงอัดสูงสุด โดยจะใช้ค่าร้อยละ 50 สำหรับการประเมินน้ำหนักกระทำทางข้างสำหรับงานวิจัยนี้ และดึงลวดอัดแรงเต็มส่วนร้อยละ 100 เมื่อดำเนินการก่อสร้างแล้วเสร็จ รายละเอียดค่ากำลังอัดจากการอัดแรงของลวดอัดแรงขนาดต่าง ๆ [3] ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดค่ากำลังอัดจากการอัดแรงของลวดอัดแรงขนาดต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASTM A416-85 Grade 270

ชนิดของลวดอัดแรง	12.7 มิลลิเมตร หรือ 0.5 นิ้ว	15.2 มิลลิเมตร หรือ 0.6 นิ้ว
เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	12.7	15.24
พื้นที่หน้าตัด (ตร.มม.)	98.71	140.00
น้ำหนักต่อความยาว (กก./ม.)	0.775	1.102
กำลังคราก (MPa)	1,670	1,670
กำลังดึงประลัย (MPa)	1,860	1,860
แรงดึงประลัย (kN)	183.7	260.7
โมดูลัสยืดหยุ่น (MPa)	195,000	

4. ระเบียบวิธีวิจัย/วิธีดำเนินงานวิจัย

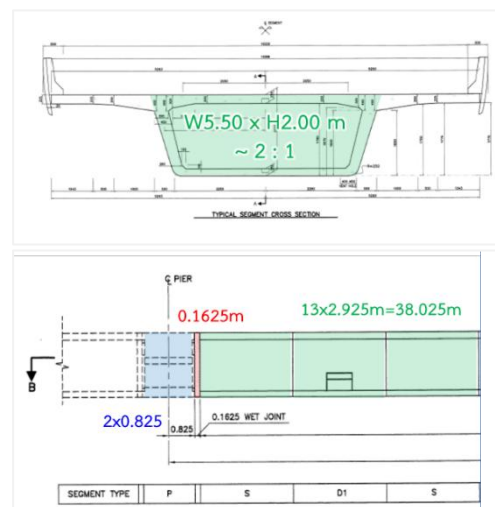
ศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างสะพานระบบชิ้นส่วนคานรูปกล่องสำเร็จรูป (Precast Segmental Box Girder) เพื่อจำลองพฤติกรรมการใช้งานและผลิตชิ้นงานทดลองคานอย่างง่าย (Simple Beam) ผลจากการทดสอบจะช่วยให้ทราบค่ากำลังอัดประลัยระบุที่เหมาะสมของรอยต่อแบบเปียกสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการกำหนดค่าแนะนำกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเป็นมาตรฐานสำหรับการออกแบบระบบชิ้นส่วนคานรูปกล่องสำเร็จรูปที่เหมาะสมในอนาคต

ผลิตชิ้นงานทดสอบคานอย่างง่าย (Simple Span) โดยจำลองรอยต่อโครงสร้างคานสะพานที่มีจุดรอยต่อแบบเปียก (Wet Joint) บริเวณริมจุดรองรับ (Support) ตัวแปรในการศึกษาประกอบด้วย

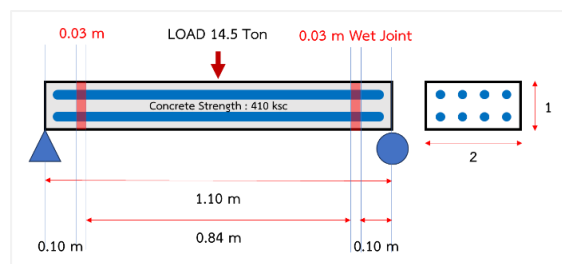
- 1) ค่ากำลังอัดของคอนกรีต (Concrete Strength) : ค่ากำลังอัดประลัย (Ultimate Compressive Strength : f'_c) ของจุดรอยต่อแบบเปียก (Wet Joint) ของคานตัวอย่างทดสอบ

- 2) ประสิทธิภาพของคอนกรีต (Concrete Properties) : ทำการปรับเปลี่ยนชนิดของคอนกรีต เนื่องจากคุณสมบัติที่ต้องการของการก่อสร้างจตุรรอยต่อแบบเปียก (Wet Joint) คือการพัฒนากำลังได้รวดเร็ว โดยคอนกรีตชนิดคาร์บอนต่ำมีคุณสมบัติเด่นในการพัฒนากำลังได้รวดเร็ว ดังนั้น งานวิจัยจะเลือกใช้ตัวแปรคอนกรีต ได้แก่ คอนกรีตชนิดปกติ (Normal Concrete) และคอนกรีตชนิดคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Concrete)
- 3) ตรวจวัดกำลังกดสูงสุดจากเครื่องกดทดสอบคาน (Maximum Bearing Load) และตรวจสอบลักษณะหรือพฤติกรรมการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบ ที่เป็นผลมาจากแรงเฉือนบริเวณรอยต่อแบบเปียก (Wet Joint)

ผลิตชิ้นงานทดสอบกำลังรับแรงอัดของคานอย่างง่าย (Simple Beam) ที่มีชิ้นส่วนรอยต่อแบบเปียก ซึ่งออกแบบชิ้นงานและวิธีการทดสอบให้มีพฤติกรรมเสมือนคานสะพานระบบชิ้นส่วนคานรูปกล่องสำเร็จรูป พิจารณาจากแบบโครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพทางแยกต่างระดับทับข้างสะพานมีขนาด 2 ช่องจราจรพร้อมไหล่ทาง ความกว้างผิวจราจรประมาณ 10 เมตร โดยมีสัดส่วนพื้นที่เหลี่ยมผืนผ้าแนวนอน อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงโดยประมาณ 2:1 รอยต่อแบบเปียก (Wet Joint) ความหนา 0.1625 เมตรหรือ 16.25 ซม. คิดเป็นร้อยละ 0.4 ของความยาวช่วง (Span) ทั้งสิ้น 40 เมตร จึงออกแบบคานตัวอย่างทดสอบ 1.10 เมตร และมีขนาดรอยต่อความหนา 3 ซม. มากกว่าค่าที่คำนวณได้ 0.61 ซม. เนื่องจากขนาดโตสุดของมวลหยาบในคอนกรีตเพื่อให้สะดวกต่อการเทคอนกรีต สัดส่วนของหน้าตัดคานและขนาดของรอยต่อแบบเปียกของสะพานดังแสดงในรูปที่ 6 และการออกแบบคานตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7 ตามลำดับ



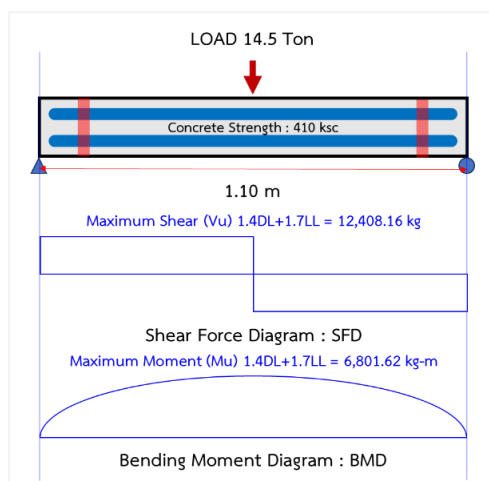
รูปที่ 6 สัดส่วนของหน้าตัดคานและขนาดของรอยต่อแบบเปียกของสะพาน



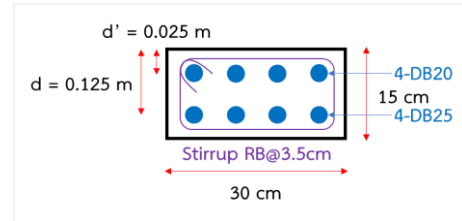
รูปที่ 7 การออกแบบคานตัวอย่างทดสอบ

คานตัวอย่างทดสอบได้พิจารณาออกแบบให้มีการเสริมเหล็กเพื่อให้สามารถรองรับแรงเฉือน (Shear) และโมเมนต์ดัด (Bending Moment) ทั้งในส่วนที่เป็นผลจากน้ำหนักคงที่ของคานตัวอย่างทดสอบและค่าแรงกดทดสอบโดยพิจารณาใช้ค่า 14.5 ตัน ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานสูงสุดสำหรับการออกแบบคานสะพานตามรายละเอียดที่กล่าวในหัวข้อ 3.2 ที่ผ่านมา และคำนวณออกแบบคานตัวอย่างโดยใช้วิธีกำลัง (Strength Design Method : SDM) และเสริมเหล็ก (Reinforcement) ตามมาตรฐานสถาบันคอนกรีตอเมริกัน (The American Concrete Institute : ACI) โดยอ้างอิง ACI318 [4] พบว่าผลจากการคำนวณได้ค่าแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 7.20 ตัน และโมเมนต์สูงสุดเท่ากับ 3.99 ตัน โดยอัตราส่วนตัวคูณกำลัง 1.4 เท่าสำหรับน้ำหนักคงที่และ 1.7 เท่าสำหรับน้ำหนักบรรทุกจร (1.4 DL + 1.7 LL) ค่าแรงเฉือนได้ค่าแรงเฉือนสูงสุด (V_u) เท่ากับ 12.4 ตัน และโมเมนต์สูงสุด (M_u) เท่ากับ 6.8 ตัน ออกแบบเป็นคานคอนกรีตหน้าตัดกว้าง 30 ซม. และความลึก 15 ซม. มีเหล็กเสริมล่างรับแรงดึง (A_s) เป็นเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร และเหล็กเสริมบนรับแรงอัด (A_s') เป็นเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. และออกแบบเหล็กปลอกรับแรงเฉือนในหน้าตัดคานเป็นเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. ทุกระยะประมาณ 3.5 ซม. เพื่อควบคุมการวิบัติที่เกิดจากแรงเฉือนที่บริเวณรอยต่อแบบเปียก (Wet Joint) นอกจากนั้น ยังมีการออกแบบการอัดแรงโดยใช้สตัดเกลียวขนาด 5/16 นิ้ว ใช้งานร่วมกับนอตตัวเมียทดแทนลวดอัดแรง (Prestressed Tendon) โดยมีลักษณะเป็นสกรูเกลียวและนอต (Bolts & Nut) โดยใช้สตัดเกลียวมีค่ากำลังแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) อ้างอิง ASTM A307 Grade A [5] เท่ากับประมาณ 1.43 ตันต่อเส้น ใช้งานทั้งหมด 3 เส้น ซึ่งมีค่ากำลังอัดประมาณ 4.29 ตัน แรงอัดทดแทนสูงสุดดังกล่าวคิดเป็นประมาณร้อยละ 5 ของอัตราส่วนแรงในการอัดแรงจริงของชิ้นส่วนสะพาน โดยการผลิตจริงจะใช้การวางท่อพลาสติกขนาด 3/16 นิ้ว เพื่อใช้สำหรับร้อยสตัดเกลียวขนาด 5/16 นิ้วเข้าไปในชิ้นงานก่อนขันนอตตัวเมียตามระยะที่ออกแบบเพื่อให้ได้แรงอัดตามที่คำนวณไว้

แผนภูมิค่าแรงเฉือนสูงสุดและโมเมนต์สูงสุดออกแบบดังแสดงในรูปที่ 8 และหน้าตัดคานตัวอย่างทดสอบที่มีการเสริมเหล็กเพื่อควบคุมการวิบัติเป็นการเสียหายด้วยแรงเฉือนที่บริเวณรอยต่อแบบเปียกดังแสดงในรูปที่ 9 รวมถึงชิ้นงานตัวอย่างทดสอบคานอย่างง่ายซึ่งออกแบบชิ้นงานและวิธีการทดสอบให้มีพฤติกรรมเสมือนคานสะพานระบบขึ้นส่วนคานรูปกล่องสำเร็จรูปดังแสดงในรูปที่ 10 และรูปที่ 11



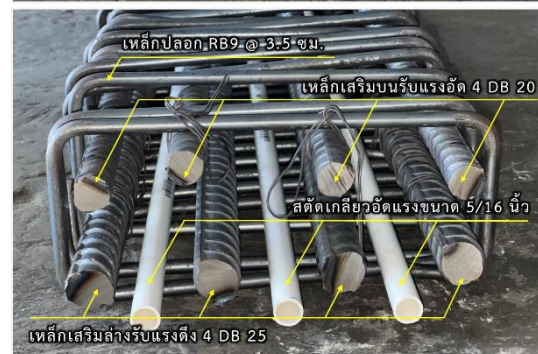
รูปที่ 8 แผนภูมิค่าแรงเฉือนสูงสุดและโมเมนต์สูงสุดออกแบบ



รูปที่ 9 หน้าตัดคานตัวอย่างทดสอบที่มีการเสริมเหล็กเพื่อควบคุมการวิบัติเป็นการเสียหายด้วยแรงเฉือนที่บริเวณรอยต่อแบบเปียก



รูปที่ 10 ชิ้นงานตัวอย่างทดสอบคานอย่างง่ายที่มีพฤติกรรมเสมือนคานสะพานระบบขึ้นส่วนคานรูปกล่องสำเร็จรูป (ด้านข้าง)



รูปที่ 11 ชิ้นงานตัวอย่างทดสอบคานอย่างง่ายที่มีพฤติกรรมเสมือนคานสะพานระบบขึ้นส่วนคานรูปกล่องสำเร็จรูป (รอยต่อและการเสริมเหล็ก)

โดยคุณสมบัติคอนกรีตที่แนะนำตามแบบใช้ค่ากำลังอัดประลัย (Ultimate Compressive Strength) เท่ากับ 40 MPa หรือประมาณ 410 ksc สำหรับตัวอย่างทรงกระบอก (Cylinder) ที่อายุ 28 วัน และค่ากำลังอัดประลัย 50 MPa หรือ 510 ksc สำหรับตัวอย่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (Cube) ที่อายุ 28 วัน เป็นคอนกรีตที่นำมาใช้ในการออกแบบชิ้นงานตัวอย่างทดสอบ โดยในการทดสอบจะปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของคอนกรีตบริเวณรอยต่อแบบเปียกให้มีค่ากำลังอัดแตกต่างกันกับคานหลัก เพื่อให้ทราบค่ากำลังอัดประลัยระยะที่เหมาะสมของรอยต่อแบบเปียก โดยค่ากำลังอัดประลัยของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2

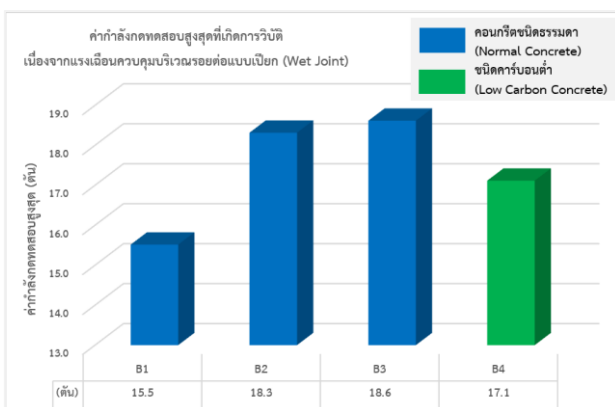
ตารางที่ 2 ค่ากำลังอัดประลัย (Ultimate Compressive Strength : f'_c)

ชิ้นงานทดสอบ	ค่ากำลังอัดคอนกรีตของคานหลัก (ksc cube)	ค่ากำลังอัดคอนกรีตของรอยต่อ (ksc cube)	ชนิดคอนกรีตของรอยต่อ
B1	410	360	คอนกรีตธรรมดา (Normal Concrete)
B2	410	410	คอนกรีตธรรมดา (Normal Concrete)
B3	410	460	คอนกรีตธรรมดา (Normal Concrete)
B4	410	360	คอนกรีตชนิดคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Concrete)

เมื่อผลิตคานแล้วเสร็จทำการทดสอบโดยกดทดสอบด้วยเครื่องทดสอบวัสดุเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine : UTM) Tinius Olsen Maximum Load Testing 100 Ton ตรวจวัดค่าสูงสุดเมื่อคานเกิดการวิบัติ (Failure) ซึ่งมีรอยร้าวที่เกิดจากแรงเฉือน (Shear Failure) ในลักษณะที่แตกต่างกันออกไปตามคุณสมบัติของคอนกรีตของตัวอย่างทดสอบ

5. ผลการวิจัย

ตัวอย่างทดสอบคานอย่างง่าย (Simple Beam) ที่มีชิ้นส่วนรอยต่อแบบเปียก (Wet Joint) ซึ่งออกแบบชิ้นงานและวิธีการทดสอบให้มีพฤติกรรมเหมือนคานสะพานระบบชิ้นส่วนคานรูปกล่องสำเร็จรูป โดยปรับเปลี่ยนค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต เพื่อให้ทราบค่ากำลังอัดประลัยระดับที่เหมาะสมของรอยต่อแบบเปียก และปรับเปลี่ยนชนิดของคอนกรีตระหว่างคอนกรีตธรรมดา (Normal Concrete) กับคอนกรีตชนิดคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Concrete) พบว่า คานเสียหายโดยรอยร้าวที่เกิดจากแรงเฉือน (Shear Failure) คานตัวที่ 1 (B1) ค่ากำลังอัดประลัย (Ultimate Compressive Strength : f'_c) ของรอยต่อแบบเปียก 360 ksc คอนกรีตชนิดธรรมดา ซึ่งน้อยกว่าคานหลัก 410 ksc เกิดความเสียหายที่ค่ากดทดสอบน้อยที่สุด รองลงมาเป็น คานตัวที่ 4 (B4) ค่ากำลังอัดประลัยของรอยต่อแบบเปียก 360 ksc คอนกรีตชนิดคาร์บอนต่ำ นอกจากนั้น คานตัวที่ 2 (B2) ค่ากำลังอัดประลัยของรอยต่อแบบเปียก 410 ksc คอนกรีตชนิดธรรมดา และคานตัวที่ 3 (B3) ค่ากำลังอัดประลัยของรอยต่อแบบเปียก 460 ksc คอนกรีตชนิดธรรมดาเกิดความเสียหายที่ระยะรอยต่อระหว่างคานปกติกับรอยต่อแบบเปียก แผนภูมิกำลังกดทดสอบสูงสุดของคานทดสอบดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 แผนภูมิกำลังกดทดสอบสูงสุดของคานทดสอบ

6. บทสรุป

โครงสร้างสะพานระบบชิ้นส่วนคานรูปกล่องสำเร็จรูปนำมาออกแบบชิ้นงานและวิธีการทดสอบให้มีพฤติกรรมเหมือนคานสะพานโดยปรับเปลี่ยนค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต เพื่อให้ทราบค่ากำลังอัดประลัยระดับที่เหมาะสมของรอยต่อแบบเปียก พบว่า การลดค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตบริเวณรอยต่อแบบเปียกลดลงเหลือประมาณร้อยละ 90 ของกำลังอัดของคานหลัก สามารถรองรับแรงกดทดสอบสูงสุด 1.07 เท่าของค่าแรงกดออกแบบ นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบคอนกรีตธรรมดา (Normal Concrete) และคอนกรีตชนิดคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Concrete) ที่ค่ากำลังอัดประลัยเท่ากัน พบว่า คอนกรีตชนิดคาร์บอนต่ำสามารถรองรับกำลังกดทดสอบสูงสุดได้มากกว่า เนื่องจากคุณสมบัติเด่นคือการพัฒนากำลังได้รวดเร็ว การลดค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตบริเวณรอยต่อแบบเปียกลดลงเหลือประมาณร้อยละ 90 ของกำลังอัดของคานหลัก สามารถรองรับแรงกดทดสอบสูงสุด 1.18 เท่าของค่าแรงกดออกแบบ ซึ่งกำลังสูงที่สุดมากกว่าคอนกรีตชนิดธรรมดา พัฒนากำลังได้รวดเร็วกว่าในจำนวนวันของอายุคอนกรีตเท่ากัน

นอกจากนั้น ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตบริเวณรอยต่อแบบเปียกเท่ากับกำลังอัดของคานหลัก สามารถรองรับแรงกดทดสอบสูงสุด 1.26 เท่าของค่าแรงกดออกแบบ และค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตบริเวณรอยต่อแบบเปียกมากกว่ากำลังอัดของคานหลัก สามารถรองรับแรงกดทดสอบสูงสุด 1.28 เท่าของค่าแรงกดออกแบบ

คอนกรีตชนิดคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Concrete) ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นคือการพัฒนากำลังได้รวดเร็วและยังมีความสามารถในการลดอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหลือเพียงประมาณร้อยละ 55 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตชนิดธรรมดา คอนกรีตชนิดธรรมดาปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 358 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ในขณะที่คอนกรีตชนิดคาร์บอนต่ำปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เพียง 200 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม. การใช้งานคอนกรีตสำหรับโครงสร้างสะพานตลอดช่วงความยาว (Span Length) ประมาณ 40 เมตร มีการใช้ปริมาณคอนกรีตทั้งสิ้นประมาณ 215 ลบ.ม. หากเลือกใช้คอนกรีตชนิดคาร์บอนต่ำจะสามารถลดอัตราการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 33,970 กิโลกรัม หรือประมาณ 34 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นตัวเร่งสภาวะโลกร้อนในปัจจุบันให้ทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น ผลจากงานวิจัยนี้จึงเลือกเปรียบเทียบคุณสมบัติสำหรับรอยต่อแบบเปียกที่เลือกใช้คอนกรีตชนิดคาร์บอนต่ำ พบว่า กำลังและความแข็งแรงดีกว่าแต่ปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัด ภาพรวมจากงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- 1) ค่ากำลังอัดประลัย (Ultimate Compressive Strength : f'_c) ของคอนกรีตที่ใช้บริเวณรอยต่อแบบเปียกสำหรับโครงสร้างคานสะพานสามารถปรับลดได้ร้อยละ 10 ของค่ากำลังอัดประลัยที่ใช้ในคานหลัก สามารถรองรับแรงได้ตามค่าที่ออกแบบไว้
- 2) ค่ากำลังอัดประลัย (Ultimate Compressive Strength : f'_c) ของคอนกรีตที่ใช้บริเวณรอยต่อแบบเปียกสำหรับโครงสร้างคานสะพานกรณีใช้งานที่ค่ากำลังอัดเท่ากันหรือมากกว่าคานหลักหรือชิ้นส่วนสำเร็จรูปที่ผลิตและนำมาติดตั้งเป็นคานสะพาน พบว่า สามารถรองรับแรงได้ตามค่าที่ออกแบบไว้ประมาณ 1.3 เท่า
- 3) คอนกรีตชนิดคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Concrete) พัฒนากำลังได้รวดเร็วกว่าคอนกรีตชนิดธรรมดา ค่ากำลังอัดประลัยเท่ากันในจำนวนวันของอายุคอนกรีตเท่ากัน รองรับแรงได้ตามค่าที่ออกแบบไว้ผ่านเกณฑ์ทั้งสองชนิด โดยสามารถรองรับแรง

ได้ตามค่าที่ออกแบบไว้ประมาณ ประมาณ 1.1 เท่า สำหรับคอนกรีตชนิดธรรมดาและ 1.2 เท่า สำหรับคอนกรีตชนิดคาร์บอนต่ำ ซึ่งสรุปได้ว่าคอนกรีตชนิดคาร์บอนต่ำมีกำลังอัดดีกว่า 1.1 เท่า

- 4) การเลือกใช้คอนกรีตชนิดคาร์บอนต่ำสำหรับออกแบบสะพานช่วงทั่วไป 40 เมตร ลดอัตราการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้ประมาณ 34 ตันคาร์บอนไดออกไซด์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ กรมทางหลวง ในความอนุเคราะห์แบบก่อสร้างสะพาน โครงการก่อสร้างเพิ่มประสิทธิภาพทางแยกต่างระดับทับช้าง เพื่อใช้ศึกษาวิจัย และขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ทรงพล จารุวิศิษฐ์ ที่กรุณาสละเวลาอ่านเอกสารการศึกษา ตลอดจนให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่าง ๆ อันเป็นความรู้ที่มีประโยชน์ต่อผู้วิจัยเป็นอย่างยิ่ง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ฐานเศรษฐกิจ (2566). ถอดบทเรียน เหตุสะพานถล่มลาดกระบัง. <https://www.thansettakij.com/news/general-news/570486> 12 ก.ค. 2566.
- [2] Kai Wang (2022). Flexural behaviour analysis of wet joint with UHPC. *Advances in Structural Engineering*, Jiangxi, China, Article 1369433222
- [3] มนต์เกียรติ์ ชนินทรลีลา (2558). Bridge Design. กองทุนเพื่อการศึกษาและวิจัยทางด้านวิศวกรรมศาสตร์, หน้า 239-246
- [4] ACI318-19 (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete. ACI Committee 318.
- [5] ASTM A307 (2021). Standard Specification for Carbon Steel Bolts Studs and Threaded Rod Tensile Strength. American Society for Testing and Materials.
- [6] Wenwei, Y. (2021). Bridge Structure Repair and Strengthening. *Hindawi Advances in Materials Science and Engineering*, Gansu, China, Article ID 9486940
- [7] Ittipong Khe (2018). Structural health monitoring system. *JIST Journal of Information Science and Technology*, Bangkok, Thailand, Volume 8 NO 2, pp. 83-96
- [8] Song, Q., Deng, W., Liu, D., Pei, H., Peng, Z., Zhang, J. (2023). Optimal Design of Segment Storage and Hoisting of Precast Segmental. *mdpi journal buildings*, Basel, Switzerland, buildings 13030801
- [9] Li, Y., Yu, Z., Liu, Y. (2022). Ultimate Flexural Capacity of Prestressed Strengthened Composite Box Girders. *mdpi journal materials*, Basel, Switzerland, ma16062476
- [10] Chakrapan, T. (2024). Shear behavior in RC members. *behavior of reinforced concrete member and composites*, LT0229563, pp.6.1-6.47.