

## สมรรถนะด้านโครงสร้างของทางวิ่งยกระดับในเส้นทางรถไฟความเร็วสูง ไทย-จีน STRUCTURAL PERFORMANCE OF TYPICAL VIADUCT FOR THAI-CHINA HIGHSPEED RAILWAY

ศรัณย์ เรืองศรี<sup>1\*</sup>, นคร วงศ์สว่างทรัพย์<sup>2</sup>, วัฒนา มณีโชติ<sup>3</sup> และ ทศพล ปิ่นแก้ว<sup>4</sup>

<sup>1,4</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร

<sup>2,3</sup> ฝ่ายโครงการพิเศษและก่อสร้าง, การรถไฟแห่งประเทศไทย

\*Corresponding author address: sarun.ruangsee@gmail.com

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันการรถไฟแห่งประเทศไทยได้ริเริ่มโครงการรถไฟความเร็วสูงสายแรกขึ้น โดยในช่วงแรกเป็นงานออกแบบก่อสร้างเส้นทาง กรุงเทพมหานคร – นครราชสีมา ซึ่งจำเป็นต้องทำการทดสอบโครงสร้างจริงในภาคสนามของทางวิ่งยกระดับที่ใช้ในโครงการ เพื่อยืนยันถึงสมรรถนะของโครงสร้างที่ถูกต้องแบบ การทดสอบจะพิจารณาทางวิ่งยกระดับช่วงเดียวซึ่งมีช่วงพาดยาว 32.60 เมตรทั้งเชิงสถิตและเชิงพลวัต เพราะเป็นรูปแบบช่วงพาดที่ใช้งานที่สุดในโครงการ (Typical span) โดยยึดตามเกณฑ์การทดสอบของประเทศจีน (TB 2092-2003) บทความนี้จะศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของโครงสร้างทางวิ่งยกระดับจากผลการทดสอบโครงสร้างจริง แล้วนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์สมรรถนะที่กำหนดตามมาตรฐานของจีน (TB 10621-2014) ซึ่งจะคำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้งาน ความสะดวกสบายในการใช้บริการ และความคงทนของโครงสร้าง โดยการทดสอบเชิงสถิตจะให้แรงกระทำที่ระดับ 1.0, 1.2, 1.6 และ 2.0 ของน้ำหนักบรรทุกทุกออกแบบ ซึ่งคิดเป็นแรงกระทำที่ต้องให้กับสะพานทดสอบสูงถึง 700, 1000, 1500 และ 2000 ตันตามลำดับ ในระหว่างการให้แรงกระทำจะตรวจสอบค่าการแอ่นตัว ค่าความเอียง และค่าความเค้นของโครงสร้างในตำแหน่งวิกฤตต่างๆ ส่วนการทดสอบเชิงพลวัตจะให้แรงกระทำบริเวณกึ่งกลางช่วงด้วยถ่วงทรายหนัก 1 ตัน แล้วตรวจวัดผลตอบสนองค่าความเร่งที่ตำแหน่ง L/3, L/2 และ 2L/3 เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง ท้ายที่สุดผลการทดสอบทั้งหมดจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์ตามมาตรฐานของจีน ซึ่งจะทำให้สามารถสรุปถึงสมรรถนะด้านโครงสร้างของทางวิ่งยกระดับที่ทำการทดสอบได้อย่างน่าเชื่อถือต่อไป

**คำสำคัญ:** รถไฟความเร็วสูง, โครงสร้างทางวิ่งยกระดับ, การทดสอบโครงสร้างจริง, สมรรถนะของโครงสร้าง

### Abstract

Nowadays, the state railway of Thailand has initiated the first high-speed railway project. The first phase is a design and construction of a route from Bangkok-Nakhon Ratchasima. A full-scaled test of one viaduct span is specified to evaluate its structural performance. Based on Chinese code TB 2092-2003, the static and dynamic load tests on a typical span of 32.60 m shall be conducted. In this paper, the viaduct behavior under both loading conditions shall be investigated and compared with the performance requirements on safety, serviceability and durability according to Chinese code TB 10621-2014. The static load test shall be conducted under load levels of 1.0, 1.2, 1.6 and 2.0 of design load which are equivalent to the applied loadings of 700, 1000 1500 and 2000 tons, respectively. During the test, the responses of the viaduct, including deflections, rotations and strains, shall be monitored. The dynamic load test shall be conducted by an impact of a 1-ton sandbag dropping at midspan. The acceleration responses of the viaduct at L/3, L/2 and 2L/3 shall be obtained and analyzed for its fundamental natural frequency. Finally, all obtained test results shall be compared with those from Chinese code and the structural performance of the test viaduct shall be realistically evaluated and reported.

**Keywords:** High-speed railway, Full scaled load test, Viaduct testing, Structural performance

### 1. บทนำ

การรถไฟแห่งประเทศไทยริเริ่มโครงการรถไฟความเร็วสูงขึ้น เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่งและโดยสารของประเทศ โดยโครงการรถไฟความเร็วสูงนั้นได้ถูกออกแบบให้สามารถทำความเร็วได้ 250 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อลดระยะเวลาในการเดินทางโดยรถไฟธรรมดาหรือรถยนต์ระหว่างเมือง

ใหญ่ มีผลทำให้สามารถขยายการพัฒนาไปยังภูมิภาคและเชื่อมโยงเศรษฐกิจระหว่างเมืองใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

โครงการรถไฟความเร็วสูงช่วงกรุงเทพมหานคร-นครราชสีมา เป็นโครงการก่อสร้างทางวิ่งรถไฟความเร็วสูงสายแรกของไทย ซึ่งโครงการเป็นความร่วมมือระหว่างรัฐบาลไทยและจีน ด้วยวงเงินลงทุนประมาณ 1.79 แสนล้านบาท ในส่วนงานโยธาที่งานก่อสร้าง

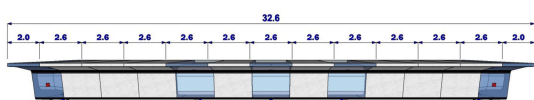
ทางวิ่งยกระดับ (Viaduct) ถือเป็นงานที่มีความสำคัญและมีมูลค่าสูง วิศวกรฝ่ายจีนซึ่งเป็นผู้ออกแบบงานโครงสร้าง จึงกำหนดให้ทำการทดสอบสมรรถนะของโครงสร้างทางวิ่งยกระดับที่ได้ออกแบบไว้ก่อนการก่อสร้างจริง เพื่อใช้ตรวจสอบคุณภาพงานก่อสร้างของผู้รับจ้าง และเพื่อใช้ยืนยันผลการตอบสนองต่างๆ เทียบกับผลการตอบสนองจากการออกแบบของผู้ออกแบบ ที่สำคัญผลทดสอบทำให้สามารถมั่นใจได้ว่าโครงสร้างทางวิ่งยกระดับที่ก่อสร้างนั้น จะมีความปลอดภัยในการใช้งานได้ตามมาตรฐาน

การทดสอบสมรรถนะโครงสร้างทางวิ่งของรถไฟในอดีตนั้น มักทำการทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกไม่เกินน้ำหนักบรรทุกทุกออกแบบ [2, 3, 4] เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบ โดยควบคุมให้การทดสอบเป็นแบบไม่ทำลาย (Non-destructive test) ทำให้สามารถทำการทดสอบบนโครงสร้างจริงได้โดยตรงโดยไม่สร้างความเสียหายหรือกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง โครงสร้างที่ผ่านการทดสอบจึงสามารถนำมาใช้งานต่อภายหลังได้อย่างปลอดภัย

สำหรับโครงการรถไฟความเร็วสูงในความร่วมมือนระหว่างรัฐบาลไทยและจีนนั้น ถือเป็นโครงการสาธารณะขนาดใหญ่และใช้เงินลงทุนมาก ที่สำคัญคือเป็นโครงการแรกของประเทศ ทำให้วิศวกรผู้ออกแบบกำหนดให้มีการทดสอบด้วยน้ำหนักบรรทุกที่สูงกว่าระดับน้ำหนักบรรทุกทุกออกแบบถึง 2 เท่าตัว เพื่อให้ทราบถึงคุณภาพงานก่อสร้างของไทยและพฤติกรรมการรับแรงของโครงสร้างที่แท้จริงภายใต้น้ำหนักบรรทุกสูงดังกล่าว เนื่องจากโครงการออกแบบก่อสร้างตามมาตรฐานของประเทศจีน การทดสอบสมรรถนะครั้งนี้จึงใช้เกณฑ์การทดสอบและการประเมินผลทดสอบตามมาตรฐานของประเทศจีน TB 2092-2003 และ TB 10621-2014 ตามลำดับ

## 2. ลักษณะทางกายภาพของทางวิ่งยกระดับ

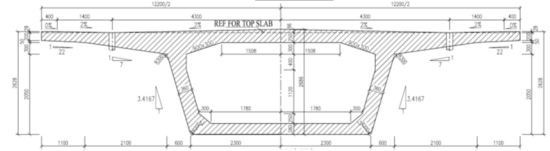
โครงสร้างทางวิ่งยกระดับ (Viaduct) ที่ถูกใช้ในการทดสอบสมรรถนะนั้นเป็นสะพานช่วงเดียวมีความยาวทั้งหมด 32.6 เมตร โดยศูนย์กลางฐานรองรับทั้งสองอยู่ห่างกัน 31.5 เมตร สะพานถูกสร้างขึ้นจากคานคอนกรีตรูปกล่องชนิดหล่อสำเร็จจากโรงงาน (Precast segmental box girder) จำนวน 13 ก่อวางเรียงต่อกันโดยใช้ลวดอัดแรงกำลังสูงอัดแรงแบบภายในคานตลอดความยาว ช่วงดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมีขนาดหน้าตัดของ Segment ที่ฐานรองรับและกึ่งกลางแสดงในรูปที่ 2 และมีภาพถ่ายของ Viaduct ที่ทำการทดสอบหลังการอัดแรงแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 1 โครงสร้าง Viaduct ที่ทำการทดสอบมีความยาว 32.6 ม.



(a) End-span segment



(b) Mid-span segment

รูปที่ 2 ขนาดหน้าตัดของ Box girder



รูปที่ 3 โครงสร้าง Viaduct ที่ใช้ทดสอบ

## 3. วิธีการทดสอบสมรรถนะโครงสร้างและเกณฑ์การประเมิน

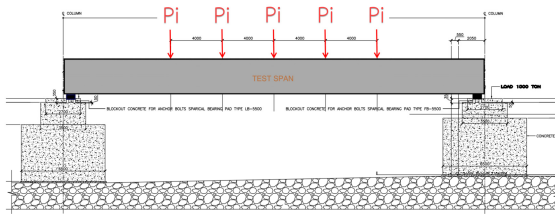
การทดสอบสมรรถนะโครงสร้างทางวิ่งยกระดับแบ่งเป็น 2 ประเภทการทดสอบ ได้แก่ การทดสอบเชิงสถิต และการทดสอบเชิงพลวัต

### 3.1 การทดสอบเชิงสถิต

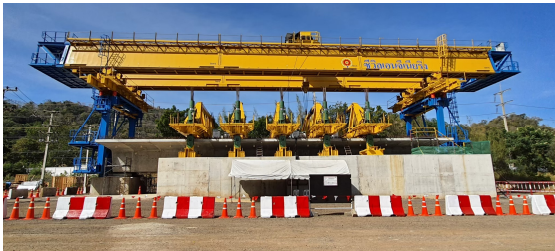
การทดสอบเชิงสถิตแบ่งเป็นการทดสอบ Bending test และการทดสอบ Shear test

#### 3.1.1) Bending Test

การทดสอบแบบ Bending test นั้น จะจำลองการให้โมเมนต์ดัดแก่โครงสร้างทางวิ่งยกระดับโดยใช้ Loading frame จำนวน 5 โครงยึดติดอยู่ด้านบนของโครงสร้างจากนั้นจึงใช้แม่แรงไฮดรอลิก (2 Jack/frame รวมเป็น 10 Jack) ในการดึงน้ำหนักถ่วงคอนกรีตบริเวณฐานด้านล่างเพื่อเพิ่มภาระแรงกระทำแก่โครงสร้างทางวิ่งยกระดับดังแสดงแบบจำลองไว้ในรูปที่ 4 โดยการทดสอบเชิงสถิตนั้นแบ่งออกเป็น 3 ระดับการทดสอบย่อยเพื่อความปลอดภัย ได้แก่ การทดสอบโดยให้ภาระกระทำที่ 1.20, 1.60 และ 2.0 เท่าของค่าออกแบบ (Design load level)



(a) Load configuration for bending test



(b) ภาพการวาง loading frame และแม่แรงไฮดรอลิก  
รูปที่ 4 การทดสอบ Bending test ของโครงสร้าง Viaduct

ในการให้แรงกระทำจะคำนึงถึงน้ำหนักตัวโครงสร้างเอง น้ำหนักของ Loading frame และแม่แรงไฮดรอลิก แล้วทำการให้แรงเพิ่มเพื่อชดเชยค่าน้ำหนักบรรทุก Superimposed dead load (SDL) ต่าง ซึ่งจากการคำนวณจะต้องให้แรงไฮดรอลิกประมาณ 30 ตัน/Jack ร่วมกับน้ำหนักจาก loading frame คิดเป็นภาระแรงดัดกระทำเพิ่มเติมรวม 24,200 kN-m เทียบเท่ากับน้ำหนักแผ่ของ SDL = 192 kN/m ซึ่งคิดเป็นโมเมนต์ดัดที่กึ่งกลางช่วง 23,700 kN-m โดยจะเรียกสภาวะนี้ว่า Base level ( $K_a$ )

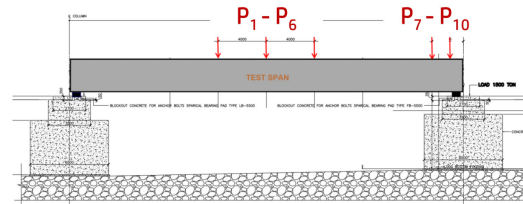
สภาวะภายใต้น้ำหนักบรรทุกจร Static live load ( $K_b$ ) ถูกกำหนดขึ้นเพื่อใช้สำหรับพิจารณาว่าผลตอบสนองอันได้แก่การแอ่นตัวกึ่งกลางช่วง ค่ามุมหมุนที่ฐานรองรับ และค่าความเค้น นั้นเกินกว่าที่มาตรฐานหรือไม่ โดยระดับ Static live load นี้ จะไม่คำนึงถึงผลของแรงกระทำหรือการสั่นไหวของ Viaduct จึงเหมือนการวางน้ำหนักขบวนรถไฟที่จอดนิ่งไว้บนโครงสร้าง ซึ่งจากการคำนวณจะต้องให้แรงไฮดรอลิกประมาณ 700 ตัน (70 ตัน/Jack)

สภาวะภายใต้น้ำหนักบรรทุกออกแบบ Design load ( $K=1.00$ ) เป็นสภาวะการรับน้ำหนักบรรทุกเท่ากับค่าที่ใช้ออกแบบ ซึ่งได้รวมผลของแรงกระทำ (Impact factor) ไว้ด้วยอีประมาณร้อยละ 9.0 สำหรับช่วงพาดที่ทำการทดสอบ ในสภาวะนี้จึงต้องให้แรงไฮดรอลิก 750 ตัน (75 ตัน/Jack)

สำหรับสภาวะภายใต้น้ำหนักบรรทุกมากกว่าน้ำหนักออกแบบที่ 1.20 เท่า ( $K=1.20$ ) นั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันว่าหน้าตัดที่ก่อสร้างไม่เกิดร้าว อันจะทำให้ Viaduct มีความคงทนสามารถใช้งานได้เกิน 100 ปีตามมาตรฐาน ซึ่งการทดสอบต้องให้แรงไฮดรอลิกประมาณ 1,000 ตัน (100 ตัน/Jack) ตามขั้นตอนการให้แรงกระทำดังรูปที่ 17

ส่วนการทดสอบที่น้ำหนักบรรทุกมากกว่าน้ำหนักออกแบบที่ 1.60 และ 2.00 เท่า ( $K=1.20$  และ 2.00) นั้น มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อประเมินระดับน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้หน้าตัดเกิดการแตกร้าว (Cracking resistance) และระดับน้ำหนักบรรทุกที่อาจทำให้เกิดการวิบัติ (Load carrying capacity) ซึ่งการทดสอบต้องให้แรงไฮดรอลิกประมาณ 1,550 ตัน (155 ตัน/Jack) และ 2,050 ตัน (205 ตัน/Jack) ตามลำดับ ตามขั้นตอนการให้แรงกระทำดังรูปที่ 18

### 3.1.2) Shear Test



(a) Load configuration for shear test



(b) ภาพการวาง loading frame และแม่แรงไฮดรอลิก  
รูปที่ 5 การทดสอบ Shear test ของโครงสร้าง Viaduct

การทดสอบแรงเฉือนนั้น เป็นการทดสอบที่มีวัตถุประสงค์ในการจำลองค่าแรงเฉือนสูงสุดที่จะเกิดขึ้นในตัวโครงสร้างจากการใช้งานจริงและระหว่างการก่อสร้าง ด้วยการใช้แม่แรงไฮดรอลิกในการสร้างภาระกระทำเสมือนแก่ตัวโครงสร้าง โดยการทดสอบแรงเฉือนนั้นต้องย้ายตำแหน่ง loading frame และแม่แรงไฮดรอลิกไปยังตำแหน่งที่ระบุไว้ในรูปที่ 5 โดยมีแม่แรงไฮดรอลิกจำนวน 6 Jack อยู่บริเวณกึ่งกลางช่วง และอีกจำนวน 4 Jack อยู่บริเวณฐานรองรับด้านขวา ซึ่งการทดสอบแรงเฉือนนั้นจะให้แรงกระทำเพื่อสร้างแรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับด้านขวาประมาณ 900 ตัน ซึ่งถือเป็นค่าแรงสูงสุดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างการก่อสร้าง ตามขั้นตอนการให้แรงกระทำดังรูปที่ 19

### 3.2 การทดสอบเชิงพลวัต

ข้อจำกัดของการออกแบบรถไฟความเร็วสูงอย่างหนึ่งที่สำคัญคือขีดจำกัดของความถี่ธรรมชาติ เนื่องจากความถี่ธรรมชาตินั้นเป็นเสมือนดัชนีที่สะท้อนถึงแนวโน้มและโอกาสที่ขบวนรถไฟความเร็วสูงอาจเกิดการสั่นพ้องกับทางวิ่ง ซึ่งจะก่อให้เกิดการสั่นของห้องโดยสารที่รุนแรงอันกระทบต่อความสะดวกสบายของผู้โดยสาร

การทดสอบเชิงพลวัตนั้น จะใช้การปล่อยตุลทรายน้ำหนักประมาณ 1 ตันที่ความสูง 1 เมตรเหนือผิวบนของ Viaduct ที่

กึ่งกลางช่วง ดังแสดงในรูปที่ 6 เพื่อกระตุ้นให้เกิดการสั่นของโครงสร้างพร้อมบันทึกค่าความเร่งที่เกิดขึ้น แล้วจึงทำการแปลงสัญญาณค่าความเร่งที่บันทึกได้เป็นค่าความถี่ตามธรรมชาติ ซึ่งอาจหาได้ด้วยวิธีการแปลงสัญญาณฟูเรียร์ (Fourier transform) หรือหาจากค่าความถี่ของสัญญาณช่วงการสั่นอิสระ (Free vibration) อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของ Viaduct ที่ทำการทดสอบยังขาดมวลของ SDL อีกจำนวนหนึ่ง จึงต้องทำการปรับแก้ค่าที่ได้เพื่อชดเชยมวลที่ขาดหายไปด้วย



รูปที่ 6 การทดสอบเชิงพลวัตด้วยการกระแทกด้วยถุงทราย

### 3.3 เกณฑ์การประเมินโครงสร้างตามมาตรฐาน

#### 3.2.1 เกณฑ์ค่าการแอ่นตัวของโครงสร้าง

การแอ่นตัวสูงสุดของทางวิ่งยกระดับจะต้องไม่มากกว่า  $L/1400$  หรือ 22.5 มม. ภายใต้ Static live load ซึ่งการประเมินจะพิจารณาจากค่าการแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นหลังจาก Viaduct มีการแอ่นตัวเนื่องจากผลของน้ำหนักบรรทุกทุกในสถานะ Base level (Ka)

#### 3.2.2 เกณฑ์ค่ามุมหมุนของฐานรองรับ

ค่ามุมหมุนของฐานรองรับทั้งสองด้านของสะพานนั้นจะต้องไม่มากกว่า 0.002 เรเดียน ภายใต้ Static live load ซึ่งการประเมินพิจารณาจากค่ามุมหมุนของฐานรองรับที่เพิ่มขึ้นหลังจากสถานะ Base level (Ka)

#### 3.2.3 เกณฑ์ค่าความเค้นของโครงสร้าง

เกณฑ์จำกัดค่าความเค้นใช้ตามระบุในตารางที่ 1 โดยคำนวณมาจากค่ากำลังของคอนกรีตออกแบบเกรด C50 ซึ่งมีค่า Modulus of Elasticity และ Compressive strength เท่ากับ 33,500 MPa และ 33.0 MPa ตามลำดับ

### ตารางที่ 1 เกณฑ์จำกัดค่าความเค้น

	Admissible Stress Values (MPa)	
	ZK live load equivalent	ZK live load equivalent + Superimposed DL
Max. Normal stress of top flange	$0.5f_c = 16.75$	$0.55f_c = 18.43$
Min. Normal stress of top flange	0.00	0.00
Max. Normal stress of bottom flange	$0.5f_c = 16.75$	$0.55f_c = 18.43$
Min. Normal stress of bottom flange	0.00	0.00
Min. Normal stress at epoxy joint	1.00	1.00
Max. Shear stress	$0.17f_c = 5.70$	$0.17f_c = 5.70$
Max. Principle compressive stress	$0.60f_c = 20.10$	$0.66f_c = 22.11$
Max. Principle tensile stress	$f_{ct} = 3.10$	$f_{ct} = 3.10$

#### 3.2.4 เกณฑ์รอยร้าว

การตรวจสอบรอยร้าวที่ผิวคอนกรีตของ Viaduct จะตรวจสอบที่น้ำหนักบรรทุกระดับ 1.20 เท่าของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ ( $K=1.20$ ) โดยจะต้องค้างแรงกระทำไว้ 20 นาทีก่อนเข้าตรวจสอบ โดยหากไม่พบรอยร้าวจึงถือว่าโครงสร้างนั้นผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

#### 3.2.5 เกณฑ์ด้านความถี่ของโครงสร้าง

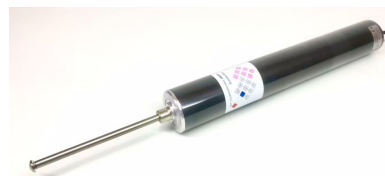
ผลการทดสอบเชิงพลศาสตร์จะทำให้ได้ค่าความถี่ตามธรรมชาติของ Viaduct ที่แท้จริง ซึ่งการประเมินจะยึดตามข้อกำหนดโดยมาตรฐาน TB 10621-2014 ที่กำหนดขีดจำกัดต่ำสุดของความถี่ธรรมชาติเป็นฟังก์ชันของความยาวช่วงตามสมการที่ 1 เมื่อพิจารณาความยาวช่วง 31.5 เมตรจะได้ความถี่ขีดจำกัดที่ 3.059 Hz

$$f(L) = 23.58L^{-0.592} \quad (1)$$

## 4. อุปกรณ์และการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

### 4.1 การทดสอบเชิงสถิต

ผลตอบสนองของ Viaduct ระหว่างการทดสอบเชิงสถิตจะทำการตรวจวัดค่าและบันทึกด้วยอุปกรณ์วัดค่า Displacement sensor (DP), Inclinator (IC) และ Strain gauge (SG) ดังแสดงในรูปที่ 7 ถึงรูปที่ 9 ตามลำดับ โดยการตรวจวัดค่าจะกระจายไปยังตำแหน่งที่สำคัญหรือคาดว่าจะเป็จุดวิกฤติของโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 10 ถึงรูปที่ 14



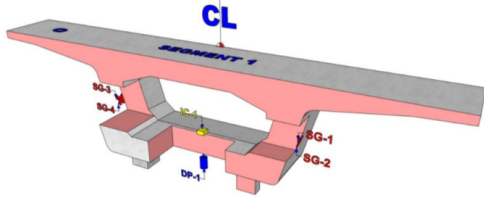
รูปที่ 7 Displacement sensor (DTH-A-50, Kyowa)



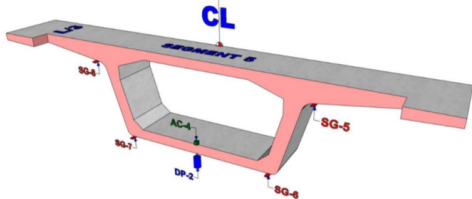
รูปที่ 8 Inclinator (Level developments)



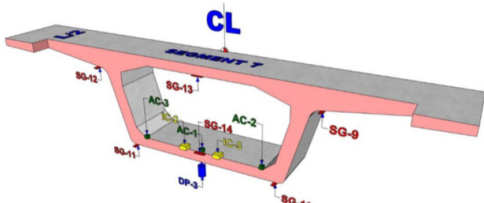
รูปที่ 9 Strain gauge (Kyowa)



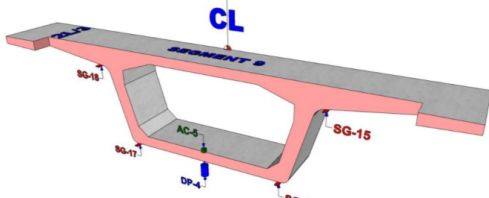
รูปที่ 10 การติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าบริเวณฐานรองรับด้านซ้าย



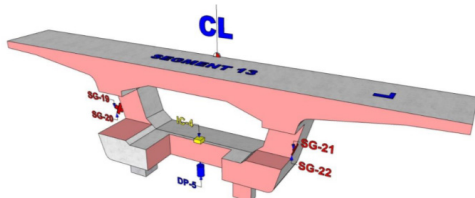
รูปที่ 11 การติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าบริเวณ L/3



รูปที่ 12 การติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าบริเวณกึ่งกลางช่วง



รูปที่ 13 การติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าบริเวณ 2L/3



รูปที่ 14 การติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าบริเวณฐานรองรับด้านขวา

#### 4.2 การทดสอบเชิงพลวัต

ผลตอบสนองของ Viaduct ระหว่างการทดสอบเชิงพลวัตจะทำการตรวจวัดค่าและบันทึก ด้วยอุปกรณ์ตรวจจับความเร่งชนิดความไวสูง (AC-1) และชนิดทั่วไป (AC-2 ถึง AC-5) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 15 และรูปที่ 16 ตามลำดับ และตำแหน่งการติดตั้งตัวตรวจจับนั้นถูก

แสดงไว้ในรูปที่ 10 ถึงรูปที่ 14 ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองชนิดนั้นสามารถเก็บข้อมูลได้ที่ความเร็วมากกว่า 250 ข้อมูลต่อวินาทีเพื่อให้ข้อมูลที่เก็บได้นั้นมีความน่าเชื่อถือเพียงพอต่อการแปลงผลและรายงานผลการทดสอบ



รูปที่ 15 อุปกรณ์ตรวจจับความเร่งความไวสูง (Kinematics)



รูปที่ 16 อุปกรณ์ตรวจจับความเร่ง (Kyowa)

### 5. ผลการทดสอบสมรรถนะโครงสร้าง

#### 5.1 ผลการทดสอบเชิงสถิต

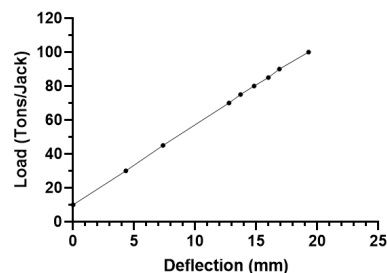
##### 5.1.1 ผลการทดสอบแบบ 1.20 เท่าของ Design load (K=1.20)

ผลการทดสอบพบว่า ค่าผลตอบสนองของ Viaduct ทั้งค่าการแอ่นตัว ค่ามุมหมุนที่ฐานรองรับ และค่าความเค้นที่ตำแหน่งต่างๆ กับแรงกระทำยังคงมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้น (Linear elastic) โดยตลอดการทดสอบไม่พบรอยร้าวอันเนื่องมาจากแรงกระทำแต่อย่างใด ค่าผลตอบสนองสูงสุดแสดงไว้ในตารางที่ 2 และความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวของโครงสร้างที่ Mid-span แสดงในรูปที่ 20

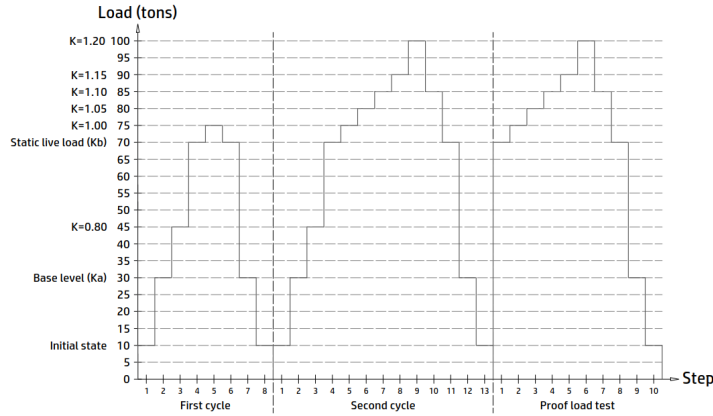
ตารางที่ 2 ค่าผลตอบสนองสูงสุดจากการทดสอบ K=1.20

Second cycle	Load step		
	Ka (30T/Jack)	Kb (70T/Jack)	K=1.20 (75T/Jack)
Maximum Response			
Deflection (mm)	4.39	12.97	19.59
Inclination (rad)	0.00043	0.00128	0.00193
Tensile stress (MPa)	2.99	8.87	14.29
Compressive Stress (MPa)	-0.58	-1.54	-2.36

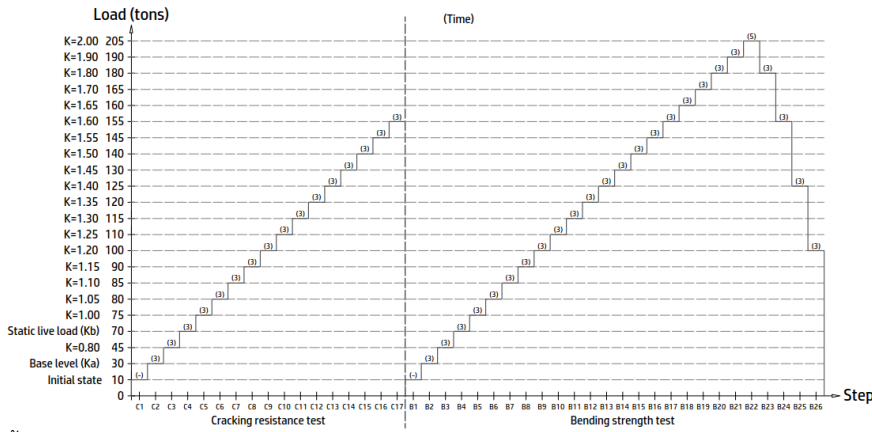
Load-deflection (Second cycle)



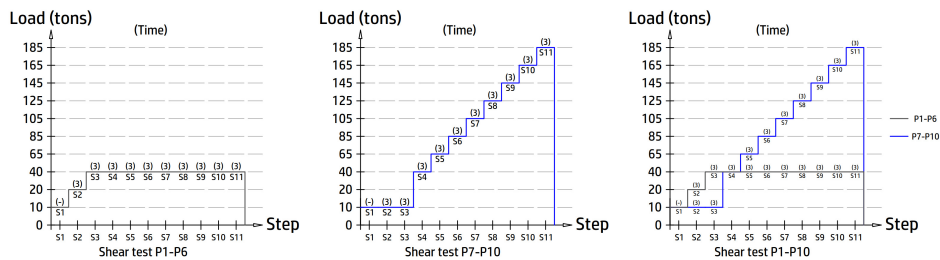
รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการแอ่นตัวที่ Mid-span



รูปที่ 17 ขั้นตอนการให้แรงกระทำ Viaduct ในการทดสอบแบบ 1.20 (K=1.20) เท่าของ Design load



รูปที่ 18 ขั้นตอนการให้แรงกระทำ Viaduct ในการทดสอบแบบ 1.60 (K=1.60) และ 2.00 (K=2.00) เท่าของ Design load



รูปที่ 19 ขั้นตอนการให้แรงกระทำ Viaduct ในการทดสอบแรงเฉือน

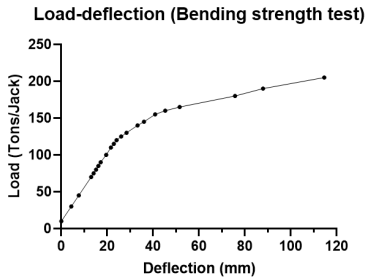
### 5.1.2 ผลการทดสอบแบบ 1.60 (K=1.60) และ 2.00 (K=2.00) เท่าของ Design load

ผลการทดสอบพบว่า เมื่อเพิ่มการให้แรงเกิน K=1.40 จะเกิดรอยร้าวขึ้นและการแอ่นตัวของโครงสร้างเริ่มไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งผลการตอบสนองสูงสุดแสดงในตารางที่ 3 โดยภายหลังการเกิดรอยร้าวพบว่าค่าความเค้นที่บันทึกได้เกิดการเปลี่ยนแปลง จึงไม่แสดงผลในตาราง รูปที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวของโครงสร้างที่ Midspan ซึ่งพบว่าโครงสร้างเริ่มมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น เมื่อให้แรงกระทำเกิน 125 ตัน/Jack

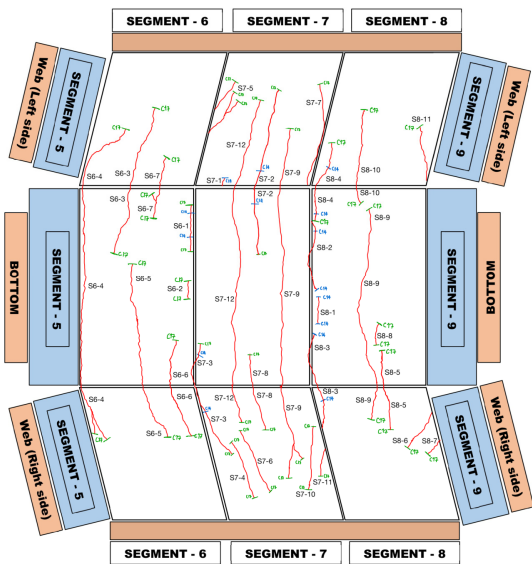
ผลการตรวจสอบรอยร้าวในส่วน Bottom slab และ Web ของ Box girder ใน 3 Segment ที่อยู่บริเวณกึ่งกลางช่วงของ Viaduct (Segment No. 6 ถึง 8) ที่ระดับการให้แรง 1.60 เท่าของ Design load (K=1.60) แสดงแนวของรอยแตกร้าวในรูปที่ 22 ซึ่งจะเห็นว่าโครงสร้างเกิดรอยแตกร้าวกระจายไปในส่วนโครงสร้างแล้วจำนวนมาก โดยจากการตรวจสอบขนาดของรอยแล้วที่ระดับการให้แรงดังกล่าว พบรอยร้าวมีความกว้างสูงสุดเท่ากับ 0.138 มม. ที่ผิว Bottom slab ของ Mid-span segment (Segment ที่ 7) ดังแสดงในรูปที่ 23

ตารางที่ 3 ค่าการตอบสนองสูงสุดจาก Bending strength test

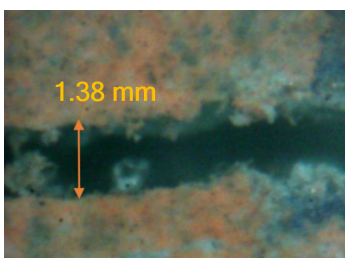
Bending strength test	Load step		
	Ka (30T/Jack)	Kb (70T/Jack)	K=2.00 (205T/Jack)
Deflection (mm)	4.31	12.97	114.03
Inclination (rad)	0.00043	0.00129	0.00916
Tensile stress (MPa)	2.89	8.98	-
Compressive Stress (MPa)	-0.64	-1.30	-



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการแอ่นตัวที่ Mid-span



รูปที่ 22 แนวรอยร้าวที่ผิวคอนกรีต Bottom slab และ Web ของ Segment No. 6-8



รูปที่ 23 ตัวอย่างภาพรอยร้าวที่ผิวคอนกรีต Bottom slab ของ Segment No. 7 (Mid-span)

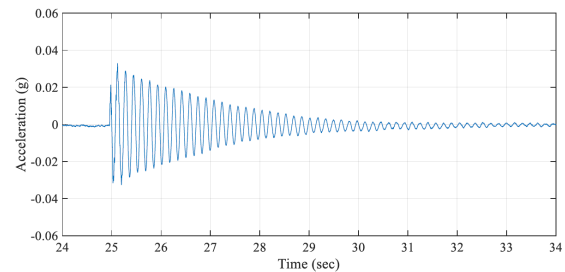
### 5.1.3 การทดสอบแรงเฉือน (Shear test)

ผลการตรวจสอบการทดสอบแรงเฉือนนั้น ตลอดการทดสอบ ทุกขั้นตอนการให้แรงกระทำไม่พบว่ามีเกิดรอยร้าวขึ้นบริเวณใกล้ฐานรองรับของโครงสร้าง Viaduct แต่อย่างใด ทั้งนี้ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่ตรวจวัดได้มีค่า 1.72 MPa ที่ตำแหน่งแกนสะเทินห่างจากฐานรองรับในแนวราบประมาณ 1.70 เมตร

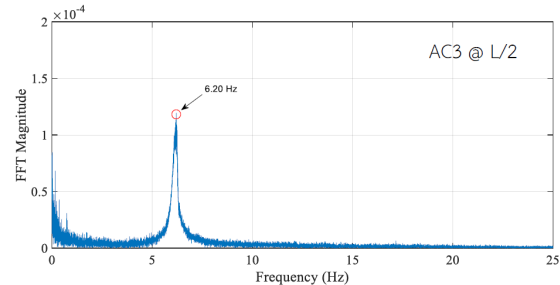
## 5.2 ผลการทดสอบเชิงพลวัต

ผลการทดสอบเชิงพลวัตด้วยการให้แรงกระทำด้วยตุร่ายบนโครงสร้าง Viaduct นั้น ทำให้สามารถบันทึกสัญญาณความเร่งที่ Mid-span ได้ดังตัวอย่างจากอุปกรณ์วัดความเร่ง AC-3 ในรูปที่ 24 เมื่อนำสัญญาณความเร่งที่บันทึกได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์สัญญาณเพื่อหาค่าความถี่ด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 25 หรือหากหาค่าความถี่ของสัญญาณในช่วงการสั่นอิสระ (Free vibration) พบว่าความถี่ธรรมชาติแนวตั้งของ Viaduct มีค่าอยู่ในช่วง 6.16-6.20 Hz ดังนั้นจึงพิจารณาใช้ค่าความถี่ 6.16 Hz ในการรายงานผลเพราะเป็นค่าต่ำสุด

หลังจากนั้นจึงทำการปรับปรุงค่าความถี่ธรรมชาติโดยการเพิ่มน้ำหนักคงที่ส่วนเพิ่ม (Superimposed dead load) ให้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง ซึ่งผลการปรับปรุงค่าความถี่ธรรมชาติแสดงในตารางที่ 4



รูปที่ 24 สัญญาณความเร่งที่ Mid-span บันทึกจาก AC-3



รูปที่ 25 การวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์

ตารางที่ 4 ผลการปรับปรุงค่าความถี่ธรรมชาติ

Viaduct Configuration	Mass (tons)		Frequency Hz
	Loading Frame	SDL	
Viaduct without SDL	151.3	0	6.16 (Dynamic test)
Viaduct with SDL=173kN/m	0	574.9	5.03
Viaduct with SDL=192kN/m	0	631.4	4.92
Viaduct with SDL=209kN/m	0	694.6	4.81

## 6. สรุปผลการประเมินโครงสร้าง

### 6.1 การทดสอบเชิงสถิต

จากผลการทดสอบโครงสร้าง Viaduct ภายใต้แรงกระทำเชิงสถิตแบบ Bending test ที่ระดับการให้แรง 1.20, 1.60 และ 2.00 เท่าของ Design Load รวมถึงการทดสอบภายใต้แรงกระทำเชิงสถิตแบบ Shear test ที่ระดับการให้แรงเฉือนสูงสุดในการใช้งาน สามารถสรุปผลการทดสอบตามมาตรฐานของประเทศจีน ได้ดังนี้

### 6.1.1 เกณฑ์การแอ่นตัวของโครงสร้าง

การทดสอบพบการแอ่นตัวของ Viaduct เนื่องจากผลของน้ำหนักบรรทุกทุกจร (Static train load) สูงสุดเท่ากับ 8.31 mm ซึ่งไม่เกิน 22.5 mm จึงผ่านเกณฑ์มาตรฐานของประเทศจีน

### 6.1.2 เกณฑ์มุมหมุนที่ฐานรองรับ

การทดสอบพบมุมหมุนที่ฐานรองรับของ Viaduct เนื่องจากผลของน้ำหนักบรรทุกทุกจร (Static train load) สูงสุดเท่ากับ 0.00086 rad ซึ่งไม่เกิน 0.00200 rad จึงผ่านเกณฑ์มาตรฐานของประเทศจีน

### 6.1.3 เกณฑ์ความเค้นในหน้าตัด

การทดสอบพบความเค้นของหน้าตัดคอนกรีตของ Viaduct ในตำแหน่งสำคัญต่างๆ ภายใต้แรงกระทำระดับ Static live load (Kb) มีค่าความเค้นดึง ค่าความเค้นอัด และค่าความเค้นเฉือนสูงสุด (ประเมินรวมค่าความเค้นจากน้ำหนักคงที่และค่าความเค้นจากลวดอัดแรงที่ประมาณจาก FEM model) เท่ากับ -5.96, -7.92 และ 3.55 MPa ซึ่งไม่เกิน 3.10, -18.43 และ 5.70 MPa ตามลำดับ จึงผ่านเกณฑ์มาตรฐานของประเทศจีน

### 6.1.4 เกณฑ์การเกิดรอยร้าว

การทดสอบ Bending test ที่ระดับแรงกระทำ 1.20 เท่าของ Design load ไม่พบรอยร้าวหรือพบรอยร้าวที่เปิดกว้างไม่เกิน 0.2 mm จึงผ่านเกณฑ์มาตรฐานของประเทศจีน

### 6.1.5 เกณฑ์การรับแรงเฉือน

การทดสอบ Shear test ที่ระดับแรงกระทำเทียบเท่าแรงเฉือนสูงสุดที่ใช้ งาน ไม่พบรอยร้าวหรือพบรอยร้าวที่เปิดกว้างไม่เกิน 0.2 mm ทั้งค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่แนวแกนสะเทินบริเวณใกล้ฐานรองรับมีค่า 1.72 MPa ไม่เกิน 5.70 MPa จึงผ่านเกณฑ์มาตรฐานของประเทศจีน

### 6.1.6 การประเมินด้านอื่น

การทดสอบพบว่าโครงสร้าง Viaduct ยังคงมีพฤติกรรมอยู่ในช่วง Linear elastic ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกจรปกติ ( $K=1.00$ ) จึงมีสัดส่วนความปลอดภัยในการใช้งานสูงเพียงพอตามมาตรฐาน ผลการทดสอบความสามารถด้านทานการแตกร้าว (Cracking resistance) ซึ่งพบว่ามีค่าระดับการให้แรงกระทำที่สูงกว่า 1.40 เท่าของ Design load บ่งชี้ถึงความทนทานของส่วนโครงสร้างที่จะไม่เสื่อมสภาพหรือเกิดสนิมในเหล็กเสริมหรือลวดอัดแรงด้านในได้โดยง่าย จึงคาดว่าจะมีอายุใช้งานยาวนานกว่าอายุใช้งานออกแบบที่ 100 ปี ทั้งการทดสอบที่เพิ่มระดับการให้แรงกระทำสูงถึง 2.00 เท่าของ Design load ก็แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าแม้โครงสร้างจะเกิดรอยแตกร้าวจำนวนมาก และมีพฤติกรรมที่เลยช่วงเชิงเส้นไปแล้ว แต่โครงสร้างโดยรวมยังคงสามารถแบกทานน้ำหนักบรรทุกดังกล่าวไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้าง Viaduct ที่ทำการทดสอบมีสัดส่วนความปลอดภัยในการรับน้ำหนักบรรทุกมากกว่า 2.0 เท่า

### 6.2 การทดสอบเชิงพลวัต

การทดสอบเชิงพลวัตด้วยการให้แรงกระทำด้วยรถขบวน Viaduct นั้น ทำให้ทราบว่าโครงสร้าง Viaduct มีความถี่ตามธรรมชาติในแนวตั้งเท่ากับ 4.81 Hz ซึ่งเกินกว่าค่าขั้นต่ำที่ระบุไว้ที่ 3.059 Hz สำหรับความยาวช่วงพาดที่ทำการทดสอบ จึงผ่านเกณฑ์มาตรฐานของประเทศจีน

ผลการทดสอบทั้งหมดข้างต้นบ่งชี้ว่า Viaduct ที่ทำออกแบบก่อสร้างมีคุณภาพงานก่อสร้าง (Construction quality) ความสามารถในการใช้งาน (Serviceability) ความปลอดภัยในการใช้งาน (Safety) และความคงทนต่อการใช้งาน (Durability) ที่เพียงพอตามเกณฑ์มาตรฐานของประเทศจีน

อย่างไรก็ตามเนื่องจากโครงสร้างทางวิ่งยกระดับนี้มีมูลค่าก่อสร้างที่สูง การออกแบบก่อสร้างในอนาคต อาจพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการปรับปรุงการออกแบบหน้าตัดให้ประหยัดยิ่งขึ้น แต่ยังคงระดับความปลอดภัย ความสามารถในการใช้งาน และความคงทนที่ไม่ด้อยกว่าเกณฑ์มาตรฐาน เพื่อประโยชน์ในการลดต้นทุนค่าก่อสร้างและงบประมาณของประเทศต่อไป

### 7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนอุดหนุนการศึกษาเพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงเจริญพระชนมายุครบ ๗๒ พรรษา ระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### เอกสารอ้างอิง

- [1] TB10621-2014 (2014) Code for design of high speed railway, China.
- [2] Pham H., Yakel A., Azizinamini A. (2020). Experimental investigation of redundancy of twin steel box-girder bridges under concentrated loads. Journal of Constructional Steel Research vol.177.
- [3] Tarozzi M., Pignagnoli G., Benedetti A. (2020). Identification of damage-induced frequency decay on a large-scale model bridge. Engineering Structures vol. 221.
- [4] Wang F., et al. (2021). Experimental study on stability of orthotropic steel box girder of self-anchored suspension cable-stayed bridge. Thin-Walled Structures vol.163.
- [5] Laura M., Francesco C., Antonio F. (2020). Static and dynamic testing of highway bridges: a best practice example. Journal of Civil Structural Health Monitoring, vol.10, pp. 43-56.