

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา  
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131



รายงานฉบับสมบูรณ์ทุนวิจัย  
ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)  
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2553

โครงการ การประเมินสภาพการใช้งานและความแข็งแรงทางโครงสร้าง  
ของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการทดสอบภาคสนาม  
สัญญาเลขที่ 14.2/2553

ผู้วิจัย  
นายพัชรพงษ์ อาสนจินดา

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยบูรพา

กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2555

สนับสนุนโดย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

เริ่มบริการ

19 ก.ค. 2555

114 พ.ค. 2555

02015700

302538

---

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2553

การประเมินสภาพการใช้งานและความแข็งแรงทางโครงสร้างของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดย  
การทดสอบภาคสนาม

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

---

ตามที่นายพัทรพงษ์ อาสนจินดา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2553 ตามสัญญาเลขที่ 14.2/2553 เพื่อวิจัยเรื่อง การประเมินสภาพการใช้งานและความแข็งแรงทางโครงสร้างของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการทดสอบภาคสนาม ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

|                   |   |                                                        |
|-------------------|---|--------------------------------------------------------|
| ผู้เสนอ           | : | นายพัทรพงษ์ อาสนจินดา                                  |
| หน่วยงาน          | : | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา |
| ระยะเวลาดำเนินการ | : | 12 เดือน                                               |
| งบประมาณ          | : | 154,500 บาท                                            |

---

## บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบระดับความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้จากการทดสอบแบบสถิตย์และแบบพลวัต เพื่อนำเสนอวิธีการทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างสะพาน ซึ่งให้ค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกใกล้เคียงกับกรณีการทดสอบแบบสถิตย์ โดยใช้รถบรรทุกสิบล้อที่ทราบน้ำหนักเพลาและระยะห่างของเพลาที่แน่นอน และศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความเร็วของรถบรรทุกและตำแหน่งการสัญจรในช่องทางจราจรที่แตกต่างกัน โดยได้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดบริเวณผิวด้านใต้ของพื้นสะพาน ได้แก่ อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด , อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งจากการสั่นไหว และอุปกรณ์วัดค่าการเปลี่ยนตำแหน่ง เพื่อนำไปวิเคราะห์หาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นและคำนวณค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐานของ AASHTO

อย่างไรก็ตามเนื่องจากในการทดสอบตามมาตรฐานของ AASHTO ระบุให้ทำการทดสอบด้วยรถบรรทุกมาตรฐานประเภท HS20-44 ซึ่งไม่มีใช้ในประเทศไทย การศึกษาจึงได้ทำการจำลองโครงสร้างสะพานในคอมพิวเตอร์โดยปรับเทียบแบบจำลองด้วยข้อมูลการทดสอบด้วยรถบรรทุกสิบล้อทั่วไปในประเทศ และทำการวิเคราะห์ค่าบ่งชี้การรับน้ำหนักบรรทุกจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ด้วยการเคลื่อนที่น้ำหนักบรรทุกประเภท HS20-44 บนแบบจำลองสะพานที่ปรับเทียบ โดยพบว่าการปรับเทียบแบบจำลองจากค่าการแอ่นตัวของสะพานมีความถูกต้องและเชื่อถือได้มากกว่าการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด และค่าความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 10%

จากผลการศึกษาพบว่าการทดสอบแบบพลวัตด้วยรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่เกิน 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จะได้ค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 5% เท่านั้น และพบว่าการทดสอบด้วยการสัญจรซ้ำมากจะได้ค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกใกล้เคียงกับการทดสอบแบบสถิตย์ ซึ่งสามารถลดเวลาในการทดสอบได้ อีกทั้งการสัญจรรถบรรทุกในช่องจราจรที่แตกต่างกันไม่มีผลกระทบต่อระดับความแข็งแรงที่ประเมินได้

คำสำคัญ : การประเมินความแข็งแรง, สะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก, การทดสอบการรับน้ำหนัก, ค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก, การทดสอบแบบพลวัต

## Abstract

This research project studies and compares the strength levels of reinforced concrete bridge structures from static and dynamic tests. This is to present an appropriate testing scheme for strength evaluation of bridge structures. Load rating factor of an appropriate scenario of the dynamic test is similar to a value obtained from the static test. A ten-wheel truck knowing its actual axle weight and axle spacing is utilized. Effects of the related parameters such as moving truck speed and direction of the travel path in the traffic lane are studied. Measurement sensors including strain gauges, accelerometer and displacement transducers are mounted at the bottom surface of the bridge deck. The member stresses and load rating factor of the bridge are analyzed and calculated according to AASHTO standard.

However, testing procedure provided by the AASHTO standard requires a standard truck of HS20-44 type which is not available in Thailand. The computer simulation of bridge structure is therefore conducted. The bridge model is calibrated with respect to the test data carried out by ordinary ten-wheel truck in Thailand. Thus, the load rating factor can be calculated through the computer model by traveling a group of HS20-44 loading on the calibrated bridge model. It is found that using deflection from displacement transducer in the calibration has more accuracy and reliability than using strain gauges. In addition, the obtained bridge natural frequency exhibits within 10% error.

From the results of the study, it is observed that conducting the dynamic load test with moving truck speed less than 20 km/hr provides the load rating factor with the error within 5% only. Moreover, it is also indicated that testing at very slow truck speed can perform load rating factor that is very close to the static load testing. By this means, the test duration can be reduced. Besides, testing by traveling the truck at the different traffic lanes does not influence on the evaluated strength levels.

Keywords : Evaluation strength, Existing Reinforced Concrete Bridge, Load testing, Load Rating Factor, Dynamic testing



## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2553 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยบูรพา ที่สนับสนุนการดำเนินงานวิจัยนี้

นายพัทรพงษ์ อาสนจินดา

ผู้วิจัย

## สารบัญ

|                                                      | หน้า   |
|------------------------------------------------------|--------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                 | ข      |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                              | ค      |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                 | ง      |
| สารบัญ.....                                          | จ      |
| สารบัญตาราง.....                                     | ช      |
| สารบัญรูป.....                                       | ซ      |
| <br>บทที่ 1 บทนำ.....                                | <br>1  |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....                 | 1      |
| 1.2 งานวิจัยในอดีต.....                              | 3      |
| 1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....                      | 6      |
| 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....                           | 6      |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                   | 6      |
| 1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....                         | 7      |
| <br>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....                  | <br>11 |
| 2.1 การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกจริงแบบสถิตย์.....    | 11     |
| 2.2 การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกจริงแบบพลวัต.....     | 12     |
| 2.3 การหาคุณสมบัติพื้นฐานเชิงกลของสะพาน.....         | 13     |
| 2.4 การวิเคราะห์กำลังต้านทานของหน้าตัดโครงสร้าง..... | 18     |
| 2.5 ค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก.....    | 20     |
| <br>บทที่ 3 การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน..... | <br>25 |
| 3.1 ลักษณะของน้ำหนักทดสอบ.....                       | 25     |
| 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด.....      | 26     |

สารบัญ (ต่อ)

|                                                                                           | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.3 สะพานที่ทำการทดสอบ.....                                                               | 29   |
| 3.4 ลักษณะการวางน้ำหนัทดสอบ.....                                                          | 31   |
| 3.5 การตรวจวัดภายใต้้น้ำหนักบรรทุก.....                                                   | 42   |
| 3.6 การปรับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบภาคสนาม.....                                            | 42   |
| บทที่ 4 การวิเคราะห์ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง.....                      | 46   |
| 4.1 การสร้างแบบจำลองโครงสร้างสะพานทางคอมพิวเตอร์.....                                     | 46   |
| 4.2 การเปรียบเทียบแบบจำลองโครงสร้างทางคอมพิวเตอร์.....                                    | 49   |
| 4.3 แรงภายในที่เกิดขึ้นภายใต้้น้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุกมาตรฐาน.....                        | 52   |
| 4.4 การคำนวณวิเคราะห์หาค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของ<br>โครงสร้างสะพาน..... | 55   |
| บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....                                                  | 71   |
| 5.1 สรุปผลการศึกษา.....                                                                   | 71   |
| 5.4 ข้อเสนอแนะ.....                                                                       | 72   |
| เอกสารอ้างอิง.....                                                                        | 74   |

## สารบัญตาราง

|                                                                                                                                                                       | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตารางที่ 3.1 การจัดวางรถบรรทุกแต่ละกรณีในการทดสอบภาคสนาม.....                                                                                                         | 32   |
| ตารางที่ 4.1 ข้อมูลสรุปจากการเปรียบเทียบแบบจำลองโครงสร้างสะพานเทียบกับโครงสร้าง<br>สะพานจริง.....                                                                     | 53   |
| ตารางที่ 4.2 ข้อมูลสรุปของแรงภายในหลังจากที่รถ HS20-44 เคลื่อนที่บนแบบจำลองโครงสร้าง<br>สะพานที่ทำการเปรียบเทียบแล้ว.....                                             | 54   |
| ตารางที่ 4.3 ค่าหน่วยแรงและค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของแผ่นพื้นสะพาน<br>ของกรณีการทดสอบแบบสถิตย์โดยวางน้ำหนักบรรทุกในแนวกึ่งกลางสะพาน                  | 57   |
| ตารางที่ 4.4 ค่าหน่วยแรงและค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานตามแนว<br>ขวางของสะพานของกรณีการทดสอบแบบสถิตย์โดยวางน้ำหนักบรรทุกในแนว<br>กึ่งกลางสะพาน..... | 57   |
| ตารางที่ 4.5 ค่าหน่วยแรงและค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาตอม่อของ<br>สะพานกรณีการทดสอบแบบสถิตย์โดยวางน้ำหนักบรรทุกในแนวกึ่งกลางสะพาน<br>.....         | 58   |
| ตารางที่ 4.6 ค่าหน่วยแรงและค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของแผ่นพื้นสะพาน<br>.....                                                                          | 59   |
| ตารางที่ 4.7 ค่าหน่วยแรงและค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างคาน<br>ตามขวาง.....                                                                    | 61   |
| ตารางที่ 4.8 ค่าหน่วยแรงและค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างเสา<br>ตอม่อสะพาน.....                                                                 | 63   |
| ตารางที่ 4.9 ค่าความเครียดสูงสุดและค่าตัวคูณขยายจากการทดสอบ.....                                                                                                      | 64   |

## สารบัญรูป

|                                                                                              | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 1.1 ระบบพื้นฐานในการตรวจวัดผลตอบสนองของสะพาน .....                                    | 8    |
| รูปที่ 1.2 ลักษณะตัวอย่างรถบรรทุกสิบล้อที่ใช้ทดสอบ .....                                     | 8    |
| รูปที่ 2.1 การทดสอบโครงสร้างสะพานด้วยน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตย์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ<br>บนสะพาน ..... | 12   |
| รูปที่ 2.2 การทดสอบโครงสร้างสะพานด้วยน้ำหนักบรรทุกแบบพลวัตที่ตำแหน่งต่าง ๆ บน<br>สะพาน ..... | 12   |
| รูปที่ 2.3 ตัวอย่างประวัติเวลาของการแอ่นตัวในแนวดิ่งที่ได้จากการตรวจวัด .....                | 17   |
| รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการสั่นไหวแบบอิสระของโครงสร้างสะพาน .....                                 | 17   |
| รูปที่ 2.5 ตัวอย่าง Frequency Domain ของการสั่นไหวแบบอิสระของโครงสร้างสะพาน .....            | 18   |
| รูปที่ 3.1 ขนาดของรถบรรทุกสิบล้อไทยที่ใช้ในการทดสอบ .....                                    | 25   |
| รูปที่ 3.2 การชั่งน้ำหนักของรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบโดยตาชั่งลอย .....                       | 26   |
| รูปที่ 3.3 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด .....                                    | 27   |
| รูปที่ 3.4 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าการแอ่นตัว .....                                 | 27   |
| รูปที่ 3.5 ลักษณะของอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งจากการสั่นไหว .....                                | 27   |
| รูปที่ 3.6 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ ใต้พื้นสะพาน .....                            | 28   |
| รูปที่ 3.7 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด .....                                              | 28   |
| รูปที่ 3.8 อุปกรณ์แปลงสัญญาณบันทึกผลและอุปกรณ์แสดงผล .....                                   | 29   |
| รูปที่ 3.9 ลักษณะโครงสร้างของสะพานที่ทำการทดสอบ .....                                        | 30   |
| รูปที่ 3.10 ลักษณะช่องทางของสะพานที่ทำการทดสอบ .....                                         | 30   |
| รูปที่ 3.11 รูปตัดสะพานที่ทำการทดสอบ .....                                                   | 30   |
| รูปที่ 3.12 ลักษณะทางกายภาพของสะพานที่ทำการทดสอบ .....                                       | 31   |
| รูปที่ 3.13 การจัดวางน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตย์ กรณีที่ 1 ในการทดสอบภาคสนาม .....                | 32   |
| รูปที่ 3.14 การจัดวางน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตย์ กรณีที่ 2 ในการทดสอบภาคสนาม .....                | 33   |
| รูปที่ 3.15 การจัดวางน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตย์ กรณีที่ 3 ในการทดสอบภาคสนาม .....                | 33   |
| รูปที่ 3.16 การจัดวางน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตย์ กรณีที่ 4 ในการทดสอบภาคสนาม .....                | 34   |

## สารบัญรูป(ต่อ)

|                                                                                            | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 3.17 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบสถิติ กรณีที่ 5 ในการทดสอบภาคสนาม.....              | 34   |
| รูปที่ 3.18 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบสถิติ กรณีที่ 6 ในการทดสอบภาคสนาม.....              | 35   |
| รูปที่ 3.19 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัต กรณีที่ 1 ในการทดสอบภาคสนาม.....              | 35   |
| รูปที่ 3.20 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัต กรณีที่ 2 ในการทดสอบภาคสนาม.....              | 36   |
| รูปที่ 3.21 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัต กรณีที่ 3 ในการทดสอบภาคสนาม.....              | 36   |
| รูปที่ 3.22 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัต กรณีที่ 4 ในการทดสอบภาคสนาม.....              | 37   |
| รูปที่ 3.23 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัต กรณีที่ 5 ในการทดสอบภาคสนาม.....              | 37   |
| รูปที่ 3.24 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัต กรณีที่ 6 ในการทดสอบภาคสนาม.....              | 38   |
| รูปที่ 3.25 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัต กรณีที่ 7 ในการทดสอบภาคสนาม.....              | 38   |
| รูปที่ 3.26 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัต กรณีที่ 8 ในการทดสอบภาคสนาม.....              | 39   |
| รูปที่ 3.27 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัต กรณีที่ 9 ในการทดสอบภาคสนาม.....              | 39   |
| รูปที่ 3.28 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัต กรณีที่ 10 ในการทดสอบภาคสนาม.....             | 40   |
| รูปที่ 3.29 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัต กรณีที่ 11 ในการทดสอบภาคสนาม.....             | 40   |
| รูปที่ 3.30 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัต กรณีที่ 12 ในการทดสอบภาคสนาม.....             | 41   |
| รูปที่ 3.31 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัต กรณีที่ 13 ในการทดสอบภาคสนาม.....             | 41   |
| รูปที่ 3.31 ตัวอย่างของการสั่นไหวอิสระและช่วงที่พิจารณาความถี่ธรรมชาติของสะพาน.....        | 44   |
| รูปที่ 3.32 การจัดรถบรรทุกแบบพลวัตแบบที่ 3 ในการทดสอบภาคสนามครั้งที่ 2.....                | 45   |
| รูปที่ 3.33 ตัวอย่างของสัญญาณที่ได้หลังจากทำการกรองสัญญาณ.....                             | 45   |
| รูปที่ 3.34 ตัวอย่างของข้อมูลที่ได้หลังจากทำการปรับลดขนาดข้อมูล (Re-sampling).....         | 45   |
| รูปที่ 3.35 การเปรียบเทียบข้อมูลค่าความเครียดที่ตำแหน่งเดียวกันด้วยความเร็วต่าง ๆ.....     | 46   |
| รูปที่ 3.36 การเปรียบเทียบข้อมูลค่าความเครียดที่ตำแหน่งเดียวกันของการขับรถต่างช่องทาง..... | 46   |
| รูปที่ 4.1 อุปกรณ์ชนิดแฮมเมอร์และการอ่านค่าการสะท้อนกลับ.....                              | 47   |
| รูปที่ 4.2 แบบจำลองโครงสร้างสะพานและกำลังประลัยของชิ้นส่วนต่าง ๆ.....                      | 47   |
| รูปที่ 4.3 แบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบสามมิติ.....                                           | 48   |

## สารบัญรูป(ต่อ)

|                                                                                                                                     | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 4.4 ลักษณะโมเมนต์คดในแผ่นพื้นของแบบจำลองโครงสร้างสะพานเมื่อนำน้ำหนักเพลลา<br>ของรถบรรทุกสปีดทดสอบเคลื่อนที่ผ่านแบบจำลอง..... | 48   |
| รูปที่ 4.5 ลักษณะการแอ่นตัวของแบบจำลองโครงสร้างสะพานเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก.....                                                      | 50   |
| รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบสัญญาณค่าการแอ่นตัวของสะพานจริงกับแบบจำลองโครงสร้าง...                                                     | 50   |
| รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าสัญญาณความเครียดของสะพานจริงกับแบบจำลองโครงสร้าง..                                                      | 51   |
| รูปที่ 4.8 ลักษณะโมเมนต์คดในแผ่นพื้นของแบบจำลองโครงสร้างสะพานเมื่อนำน้ำหนักเพลลา<br>รถบรรทุก HS20-44 เคลื่อนที่ผ่านแบบจำลอง.....    | 52   |
| รูปที่ 4.9 การเสริมเหล็กตามแบบมาตรฐาน มฐ-4-101/1 ของสำนักวิศวกรรมทางหลวงชนบท                                                        | 56   |
| รูปที่ 4.10 เสริมเหล็กตามแบบมาตรฐาน มฐ-4-103 ของสำนักวิศวกรรมทางหลวงชนบท....                                                        | 56   |
| รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าบ่งชี้ความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกเนื่องจากโมเมนต์บวกของพื้น<br>สะพาน.....                               | 65   |
| รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าบ่งชี้ความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกเนื่องจากแรงเฉือนของพื้น<br>สะพาน.....                                 | 66   |
| รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าบ่งชี้ความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกเนื่องจากโมเมนต์บวกของคาน<br>ตามขวาง.....                              | 67   |
| รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าบ่งชี้ความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกเนื่องจากโมเมนต์ลบของคาน<br>ตามขวาง.....                               | 68   |
| รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าบ่งชี้ความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกเนื่องจากแรงเฉือนของคานตาม<br>ขวาง.....                                | 69   |
| รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบค่าบ่งชี้ความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกเนื่องจากแรงในแนวแกนของ<br>เสาตอม่อสะพาน.....                          | 70   |

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

สะพานนับว่าเป็นส่วน โครงสร้างที่มีความสำคัญที่สุดในงานทางหลวง เพื่อใช้ในการข้ามคลอง แม่น้ำ ร่องน้ำ หรือหุบเขา สะพานจึงเป็นส่วน โครงสร้างที่จะต้องมีความแข็งแรงมากที่สุด และจำเป็นที่จะต้องอยู่ในสภาพพร้อมใช้งานอยู่เสมอ แม้แต่ในสภาวะที่เกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติ เพื่อให้ผู้คนในชุมชน สามารถอพยพเคลื่อนย้ายออกไปจากบริเวณที่เสี่ยงภัยได้ ในปัจจุบันหน่วยงานที่ควบคุมดูแลการใช้งาน เส้นทางหลวงในหลาย ๆ ประเทศต่างประสบปัญหาเกี่ยวกับงบประมาณที่จะใช้ในการบำรุงรักษาทางที่ ตรวจพบความเสียหาย สำหรับในประเทศไทย งบประมาณในส่วนของการบำรุงซ่อมแซมเส้นทางนั้น เพิ่มขึ้นทุกปี และแต่ละปีจะใช้งบประมาณของประเทศเป็นจำนวนมาก สำหรับประเทศไทยซึ่งมีการเติบโต ทางเศรษฐกิจและการคมนาคมขนส่งอย่างต่อเนื่อง นอกเหนือไปจากโครงสร้างสะพานที่ทำการก่อสร้าง ใหม่แล้ว ยังมีโครงสร้างสะพานอีกจำนวนมากซึ่งมีอายุไม่ต่ำกว่า 10-20 ปี และต้องการการบำรุงรักษา ซ่อมแซม อีกทั้งประเทศไทยยังขาดมาตรฐานบังคับใช้ในการตรวจสอบและประเมินความแข็งแรงของ โครงสร้างทางหลวง ลักษณะการบำรุงรักษาโครงสร้างสะพานและทางหลวงในประเทศจึงมีการดำเนินการ หลังจากที่โครงสร้างได้เกิดความเสียหายไปแล้ว

สาเหตุทั่วไปของความเสียหายของสะพานพบว่ามาจากการเสื่อมสภาพตามปกติของเส้นทางและ ผลจากภัยธรรมชาติ แต่สาเหตุส่วนใหญ่กลับพบว่าเป็นปัญหาซึ่งเกิดจากแตกร้าวเสียหายก่อนกำหนด ของผิวทางเนื่องจากความล้าและการสัจจของยานพาหนะหนักที่บรรทุกน้ำหนักเกินพิกัดที่กฎหมาย ได้กำหนดไว้ อีกทั้งยังพบว่าจำนวนของยานพาหนะในระบบขนส่งมีจำนวนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการขยายตัว ทางเศรษฐกิจในทุก ๆ ปี จึงเป็นเหตุให้สภาพการใช้งานและความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานมีความ เสื่อมสภาพที่รวดเร็วกว่าอายุการใช้งานที่ได้ทำการออกแบบ ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นที่จะทำการประเมิน สภาพการใช้งานและความแข็งแรงของสะพานอยู่เสมอหลังจากที่ได้เปิดใช้แล้ว ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงอัตรา การเสื่อมสภาพที่แท้จริงของสะพานในสภาพการจราจรจริง ซึ่งเป็นประโยชน์ในการวางแผนทางการทำการ ปรับปรุงบำรุงรักษาที่เหมาะสม และยังเป็นการตรวจสอบถึงความปลอดภัยในการใช้งานของสะพานด้วย

เพื่อให้ได้ข้อมูลสภาพการใช้งานและความแข็งแรงของสะพานที่มีความถูกต้องและเชื่อถือได้มากที่สุด การประเมินสภาพการใช้งานด้วยการทดสอบภาคสนามจึงมีความเหมาะสมมากกว่าการประเมิน



สภาพจากการทำการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างสะพานด้วยในคอมพิวเตอร์เพียงอย่างเดียว อีกทั้งโครงสร้างสะพานจริงมักจะมีพฤติกรรมที่คลาดเคลื่อนจากที่ได้ออกแบบไว้เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่มีความซับซ้อนและมีแปรปรวนสูง ในประเทศไทยยังไม่มีมาตรฐานและระเบียบวิธีสำหรับใช้ทำการประเมินสภาพการใช้งานและความแข็งแรงของโครงสร้างสะพาน เนื่องจากโครงสร้างสะพานและรูปแบบของยานพาหนะหนักส่วนใหญ่มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากต่างประเทศ ดังนั้นงานวิจัยจึงมุ่งเน้นการทำการทดสอบภาคสนามโดยทำการประยุกต์ใช้มาตรฐานการทดสอบในต่างประเทศและทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบ เพื่อนำไปปรับปรุงและประยุกต์ให้สอดคล้องกับรูปแบบสะพาน, ยานพาหนะและลักษณะการจราจรของประเทศไทย โดยผลการทดสอบที่ได้จะนำไปทำการวิเคราะห์สภาพการใช้งานและความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานโดยมีดัชนีบ่งชี้สภาพการใช้งานและความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบและจัดระดับความแข็งแรงของกลุ่มโครงสร้างสะพานที่ทำการประเมินได้ เพื่อเป็นแนวทางและมาตรฐานการทดสอบสำหรับใช้ประเมินสภาพการใช้งานและกำลังของโครงสร้างสะพานทั่วประเทศ

ในโครงการวิจัยนี้ การทดสอบจะใช้น้ำหนักทดสอบจากรถบรรทุกที่ทราบทั้งขนาดน้ำหนักและระยะเพลที่แน่นอน โดยทำการทดสอบทั้งแบบสถิตย์ (Static test) และแบบพลวัต (Dynamic test) โดยแบบสถิตย์จะทดสอบโดยการหยุดรถ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนโครงสร้างสะพาน ที่ได้พิจารณาแล้วว่า จะก่อให้เกิดภาระการรับน้ำหนักของโครงสร้างที่เหมาะสมเพื่อทำการตรวจวัดพฤติกรรมการแอ่นตัว (Deflection) และหาค่าความเครียด (Strain) ของโครงสร้างสะพาน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกกระทำลงบนสะพานแบบสถิตย์ ซึ่งได้ติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัด (Strain gauge) ไว้ตามจุดที่ต้องการทราบค่า ส่วนการทดสอบแบบพลวัตจะทำการทดสอบโดยการให้รถดังกล่าวข้างต้น วิ่งผ่านซ้ำ ๆ บนโครงสร้างสะพานที่ติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดแล้วและบันทึกค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสะพาน

การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างเมื่อถูกแรงกระทำภายนอกตามทฤษฎีของกลศาสตร์นั้น สมการพื้นฐาน ซึ่งบรรยายพฤติกรรมของวัตถุจะอยู่ในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียลแบบพาร์เชียลภายใต้เงื่อนไขบนพื้นผิวของวัตถุ การวิเคราะห์หาค่าตอบแน่นอนของสมการชุดนี้นิยมหาค่าตอบโดยประมาณซึ่งระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ The Finite Element Method (F.E.M.) จะเปลี่ยนรูปสมการดิฟเฟอเรนเชียลไปเป็นชุดของสมการเชิงเส้นซึ่งสะดวกในการหาค่าตอบโดยใช้ การวิเคราะห์พฤติกรรมของสะพานในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการของ F.E.M. เป็นหลัก ส่วนการจำลองโครงสร้างทางคอมพิวเตอร์จะพิจารณาเอลิเมนต์ทั้งหมดเป็นแบบอิลาสติกเชิงเส้น เพื่อนำมาทำการจำลองการรับน้ำหนักของสะพาน และพิจารณาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงสร้างสะพาน จากนั้นต้องทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลจริง

จากสนามที่ได้จากการนำรถบรรทุกมาแล่นบนโครงสร้างสะพานเพื่อดูแนวโน้มและความถูกต้อง และปรับแก้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองให้มีผลสอดคล้องกับผลการทดสอบภาคสนาม เพื่อให้แบบจำลองมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของสะพานมากที่สุด และสามารถนำข้อมูลหน่วยแรงต่าง ๆ ที่ได้จากแบบจำลองไปประเมินความแข็งแรง และอายุของสะพานจริงต่อไปได้

## 1.2 งานวิจัยในอดีต

ถึงแม้ว่าอายุของสะพานโดยส่วนมากได้ถูกออกแบบไว้อย่างพอเพียง (50-100 ปี) แต่การพัฒนาของเครื่องยนต์และการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ ทำให้สะพานต้องแบกรับการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกและปริมาณการจราจร ซึ่งทำให้การเสื่อมสภาพของสะพานเนื่องจากความล้าเกิดได้เร็วขึ้น ยังผลให้อายุการใช้งานของสะพานในหลายๆแห่งสั้นลง ปัจจุบันในประเทศสหรัฐอเมริกาพบว่า มีสะพาน ประมาณ 40 % จากจำนวนสะพานทั้งหมดที่ไม่สามารถให้บริการแก่รถยนต์ได้ตามปกติและอยู่ในความดูแลของรัฐ ซึ่งต้องสูญเสียบประมาณในการเพิ่มความแข็งแรงและการซ่อมบำรุงเป็นเงินจำนวนมหาศาลทุกปี (Sobanjo และ คณะ 1994, และ Zhao และ Halder 1996) ยิ่งไปกว่านั้นยังพบอีกว่าจะมีจำนวนสะพานที่เสื่อมสภาพเพิ่มขึ้นประมาณ 1200 แห่งในทุกๆปี (Yazdani และ Albrecht, 1990)

การป้องกันการเสื่อมสภาพสามารถกระทำได้โดยการหมั่นตรวจสอบสภาพสะพานและทำการซ่อมแซมแต่เนิ่นๆ (Frank, 1992) ปกติการตรวจสอบและประเมินสภาพของสะพานจะกระทำโดยการตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในบริเวณที่คาดว่าจะมีความเสียหายเนื่องจากความล้าในช่วงระยะเวลาหนึ่งเสร็จแล้วผลของค่าความเครียดที่ได้ซึ่งปกติจะมีขนาดแปรเปลี่ยนไปตามน้ำหนักและชนิดของรถที่แล่นผ่านจะถูกนำมาแปลงเป็นสัญญาณความเค้นที่มีขนาดคงที่โดยใช้เทคนิค Rainflow Counting (Downing และ Socie, 1982) แล้วจึงนำไปเปรียบเทียบกับความสามารถในการทนต่อแรงกระทำแบบกลับป้อนมาของวัสดุสะพาน (S-N Curve) ตามวิธีของ Palmgren-Miner (Miner, 1945) สุดท้ายจะทำให้ทราบค่าจำนวนจำนวนครั้งมากที่สุดที่สะพานจะทนต่อการแล่นผ่านของรถได้ ซึ่งหากนำไปรวมกับข้อมูลการจราจรบนสะพานก็จะทำให้สามารถทำนายถึงอัตราการเสื่อมสภาพและอายุการใช้งานที่ปลอดภัยของสะพานได้ (Moses และ คณะ, 1987) การประเมินสภาพด้วยการตรวจวัดดังกล่าวนี้เป็นที่นิยมกระทำกันเพราะว่ามีความน่าเชื่อถือสูง (Frank, 1992 และ Zuraski, 1993)

Gagarine และ Albrecht (1992) พบว่าการประเมินความแข็งแรงด้วยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามมาตรฐานของ ASSHTO (1989) นั้นมีความคลาดเคลื่อนสูงทั้งนี้เนื่องมาจากการประมาณ

สภาพการจราจรห่างจากความเป็นจริง ทั้งในแง่ของน้ำหนักและปริมาณการจราจร โดยการเปรียบเทียบกับผลการประเมินที่ได้จากการตรวจวัดจริงพบว่ามีความคลาดเคลื่อนกว่า 40%

Laman และ Nowak (1996) ได้แสดงให้เห็นว่าในแต่ละสะพานอาจมีความแตกต่างของลักษณะการจราจรได้มาก และนำเสนอแบบจำลองรถบรรทุกขึ้นมาใหม่โดยการใช้ข้อมูลการชั่งน้ำหนักแบบ Weigh-in-Motion มากำหนดรูปแบบ อย่างไรก็ตามการสร้างแบบจำลองของ Laman และ Nowak นั้นไม่ได้มีการแยกแยะประเภทของรถบรรทุกหนัก จึงทำให้แบบจำลองที่ได้มีค่าแปรเปลี่ยนไปตามสถานที่ของสะพานเป็นอย่างมาก

ทศพล และกฤษ (1999) ได้เปรียบเทียบผลของการสร้างหน่วยแรงในโครงสร้างสะพานโดยใช้แบบจำลองรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO กับรถบรรทุกของประเทศไทยตามกฎหมาย พบว่ามีความแตกต่างกันกว่า 15 % ทั้งนี้เพราะรูปแบบรถบรรทุกและน้ำหนักบรรทุกมีความแตกต่างกัน อีกทั้งยังการคิดถึงผลของประเภทของการจราจรยังพบแนวโน้มของความแตกต่างในปริมาณกว่า 50% หากใช้แบบจำลองของมาตรฐานดังกล่าวมาคำนวณหาอายุการใช้งานที่ปลอดภัยของสะพาน

M. Mabsout และคณะ (2004) ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของการกระจายน้ำหนักบรรทุกต่อโครงสร้างสะพาน โดยใช้น้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO เป็นเกณฑ์และแบ่งกรณีที่น้ำหนักกระทำต่อโครงสร้างสะพานออกเป็น 3 กรณีคือหนึ่งให้น้ำหนักบรรทุกกระทำที่ศูนย์กลาง สองให้น้ำหนักบรรทุกกระทำที่บริเวณขอบด้านใดด้านหนึ่งของสะพาน และสามให้น้ำหนักบรรทุกกระทำที่ช่องทางด้านใดด้านหนึ่ง ซึ่งบ่งบอกลักษณะการวิ่งของยานพาหนะในแต่ละช่องทางด้วยและแยกพิจารณาเป็นช่องทางแบบมีไหล่ทางและไม่มีไหล่ทางอีกด้วย จากการศึกษาพบว่าการกระจายน้ำหนักบรรทุกแบบที่สามจะให้น้ำหนักกระทำที่มากที่สุดตรงกึ่งกลางแผ่นพื้น ซึ่งสิ่งต่างๆเหล่านี้ส่งผลให้สะพานเกิดความล้า และส่งผลต่ออายุโครงสร้างของสะพาน

H.S.Ji และคณะ (2005) ทำการศึกษาเกี่ยวกับสะพานแบบวัสดุผสมผสานก้ำวหน้า (Advanced composite materials, ACM) ในประเทศเกาหลีซึ่งสะพานแบบนี้เป็นแบบใหม่ที่เพิ่งจะนำมาใช้ในประเทศเกาหลีในปี 2002 พวกเขาพบว่าที่ผ่านมายังขาดข้อมูลในเรื่องประสิทธิภาพของสะพานในขณะที่ใช้งานอยู่ จึงทำการศึกษาสะพานที่ผ่านการใช้งานมาแล้วประมาณ 2 ปีโดยวิธีทดสอบกำลังบรรทุกภาคสนาม (Field load testing) เพื่อความสามารถที่รับได้ (Capacity rating) ของสะพานและการตรวจสอบโดยสายตา (Visual inspections) โดยวิเคราะห์ผ่าน Korean Standards Specifications for Highway Bridges และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis method) โดยใช้รถบรรทุกแบบ DB-24 ใน Korean standard specifications ซึ่งหนักมากกว่ามาตรฐาน แบบ HS20 ของ AASHTO ถึง 1.3 เท่า รวมไปถึงใช้ EURO Code และ ไฟ

ในต้อลิเมนต์เซอร์ฟแวร์ในการประเมินนี้ด้วย จากการประเมินพบว่าภาระแอนด์ตัวสูงสุดสำหรับสะพานแบบ 2 เลนมีค่าเฉลี่ยที่ 6.68 มิลลิเมตรคิดเป็น 46.56 % ต่ำกว่าข้อจำกัด (L/800) ของ AASHTO ที่กำหนดไว้ที่ 12.5 มิลลิเมตร ความสามารถที่รับได้ (Capacity rating) คือ DB-24.99 ( รถบรรทุกมาตรฐานหนัก 441.10 กิโลนิวตัน) คิดเป็น 4.13% สูงกว่า DB-24 (หนัก 432.645 กิโลนิวตัน) แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของสะพานแบบวัสดุผสมผสานก้วหน้า (ACM) ทำงานได้เป็นอย่างดีเยี่ยม และการประเมินความสามารถที่รับได้ (Capacity rating) ของสะพานแบบวัสดุผสมผสานก้วหน้า (ACM) สามารถใช้ปัจจัยการประเมิน (Rating factor) ของวิธีเดิมที่มีอยู่แล้วในการประเมินวัสดุแบบเดิมเช่น ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable stress) และค่าปัจจัยน้ำหนักบรรทุก (Load factor) มาใช้ได้แม้ว่าข้อมูลของสะพานแบบวัสดุผสมผสานก้วหน้า (ACM) จะยังไม่เพียงพอแต่ผลการประเมินนี้อาจเป็นแนวทางสำหรับการประเมินโครงสร้างแบบวัสดุผสมผสานก้วหน้า (ACM) ต่อไปในอนาคตได้

เกริกเกียรติ และคณะ (2008) ทำการศึกษาเกี่ยวกับความเสียหายของโครงสร้างสะพานแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการจำลองและวิเคราะห์โครงสร้าง เพื่อศึกษาสภาพของโครงสร้างขณะที่รองรับน้ำหนักกระทำ แล้วนำเอาข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ และผลการตรวจสอบจริงจากรายงานมาเปรียบเทียบ ในงานวิจัยนี้ได้จำลองข้อมูลคุณสมบัติต่างๆของโครงสร้างสะพานที่มีอยู่จริงในประเทศทั้งขนาด วัสดุ กำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต การจัดวางตัวของเหล็กเสริม และทำการเปรียบเทียบผลทดสอบการรับน้ำหนักจากรถบรรทุกจริงของสะพาน 3 แห่งซึ่งเป็นสะพานแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอายุการใช้งานประมาณ 30 ปี โดยการทดสอบนี้ได้ใช้น้ำหนักทดสอบจากรถบรรทุกที่ทราบทั้งขนาดน้ำหนักและระยะเพลที่แน่นอน โดยได้มีการกำหนดตำแหน่งหยุดรถ ณ จุดต่างๆที่พิจารณาแล้วว่าก่อให้เกิดภาระการรับน้ำหนักของโครงสร้างที่เหมาะสมเพื่อทำการตรวจวัดพฤติกรรมภาระแอนด์ตัว (Deflection) และหาค่าความเครียด (Strain) ของโครงสร้างสะพาน ณ ตำแหน่งต่างๆ เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำลงบนสะพานแบบสถิติ จากผลการทดสอบการกระจายตัวของน้ำหนักบรรทุกนั้นจะได้ว่ากรณีที่ทำให้แผ่นพื้นสะพานเกิดการโก่งตัวมากที่สุดและก่อให้เกิดค่าความเค้นมากที่สุดที่จุดกึ่งกลางของสะพานคือกรณีที่มีรถบรรทุกสามคันวิ่งมาพร้อมกัน

กิตติ และ ทศพล (2009) พบว่าการประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานโดยใช้หลักการของค่า Bridge load rating factor ที่ให้ไว้ตามมาตรฐานของ Manual for Condition Evaluation ของสมาคมทางหลวงและขนส่งแห่งประเทศไทย (AASHTO) พบว่าสะพานยังสามารถรับน้ำหนักของรถบรรทุกได้ แต่อย่างไรก็ดีการประเมินจากน้ำหนักบรรทุกที่เกิดพิศกฏหมาย

พบว่าแม้สะพานจะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้โดยไม่เกิดการวิบัติในทันที แต่สะพานอาจเกิดความเสียหายหรือมีอายุการใช้งานที่สั้นลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะสะพานที่ความยาวช่วง 6-8 เมตร

### 1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อประเมินสภาพการใช้งานและความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 2) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบปัจจัยในการทดสอบที่มีผลกระทบต่อผลการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 3) เพื่อศึกษาและนำเสนอวิธีการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กให้เป็นแนวทางในการตรวจสอบที่เป็นมาตรฐานของประเทศต่อไป

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) โครงสร้างสะพานที่ทำการประเมินเป็นโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีพฤติกรรมแบบช่วงเดียวและมีแนวตอม่อตั้งฉากกับทิศทางจราจรของสะพาน
- 2) การตรวจวัดจริงจะพิจารณาเฉพาะในส่วนของช่วงสะพานหลัก (Main span) โดยจะทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความเครียดและความเร่งเป็นหลัก
- 3) น้ำหนักบรรทุกมาจากรถบรรทุกแบบ 3 เพลา ที่ทราบขนาด น้ำหนัก และระยะเพลานั่นแน่นอน
- 4) ทำการตรวจวัดผลตอบสนองจริงและทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบจากสะพานต่างๆ ในเขตจังหวัดชลบุรี จำนวน 3 สะพาน โดยแต่ละสะพานจะมีความยาวช่วงระหว่าง 10 - 30 เมตร (โครงการปีที่ 1 ทดสอบจำนวน 1 สะพาน และ โครงการปีที่ 2 ทดสอบจำนวน 2 สะพาน)
- 5) การประเมินความแข็งแรงของสะพานจะวิเคราะห์ด้วยวิธีหน่วยแรงสูงสุด (ultimate strength analysis)
- 6) น้ำหนักบรรทุกในแบบจำลองเลือกใช้น้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กกว่ามีความแข็งแรงเพียงพอใช้งานหรือไม่

- 2) เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอายุการใช้งานผ่านมายาวนาน ว่ายังสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัยมากน้อยเพียงใด
- 3) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการซ่อมแซม บำรุงรักษาและประเมินอายุการใช้งานของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กได้

ซึ่งประโยชน์จากทั้งสามข้อดังกล่าวนี้จะเป็นประโยชน์ในเชิงยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศ โดยผลการศึกษาที่ได้จากโครงการวิจัยนี้ เมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบและประเมินสภาพความเสียหายและกำลังของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในทางหลวง จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อภาครัฐในด้านการวางแผนงบประมาณการบำรุงรักษาซ่อมแซมทางหลวง และนำไปสู่การประหยัดงบประมาณประเทศได้เป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังเป็นการสร้างความมั่นคงต่อเศรษฐกิจของประเทศในด้านการขนส่งคมนาคมและโลจิสติกส์ให้ดำเนินต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งงานวิจัยนี้จะเกิดประโยชน์อย่างยิ่งต่อหน่วยงานราชการและรัฐวิสาหกิจที่เกี่ยวข้องกับงานทางหลวง, สมาคมวิศวกรรมโยธาและวิศวกรโยธาทั่วไป โดยสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับงานตรวจสอบสภาพการใช้งานและความแข็งแรง และเป็นแนวทางในการออกแบบโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก

## 1.6 ขั้นตอนการดำเนินการ

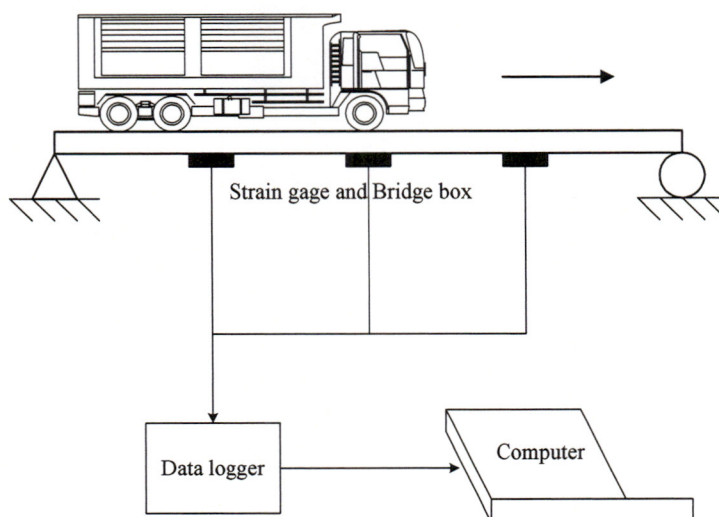
เพื่อให้การศึกษานี้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ โครงการวิจัยจะทำการประเมินสภาพการใช้งานและความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทำการเปรียบเทียบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานเนื่องจากปัจจัยการเสื่อมสภาพที่แตกต่างกัน โดยจะทำการทดสอบสะพานจำนวน 3 สะพาน ที่สภาพการใช้งาน ปริมาณการจราจร และสภาพสิ่งแวดล้อม ที่แตกต่างกัน และทำการเปรียบเทียบผลกระทบที่มีต่อความเสื่อมสภาพของสะพานให้ได้ผลการวิจัยที่มีความเชื่อถือได้และสามารถเป็นแนวทางเพื่อวางมาตรฐานการทดสอบของประเทศได้ต่อไป รายละเอียดของวิธีการประเมินสภาพของแต่ละสะพาน สามารถแบ่งได้ดังนี้

### 1) การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกจริงแบบสถิตย์ของโครงสร้างสะพาน

การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกจริงของโครงสร้างสะพาน เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมจริงของโครงสร้างสะพานภายใต้น้ำหนักที่กระทำโดยรถบรรทุกทดสอบ โดยผ่านผลการตอบสนองของโครงสร้างสะพานซึ่งสามารถนำมาอ้างอิงในการปรับแก้แบบจำลองในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานได้รวมทั้งสามารถนำมาใช้ในการประเมินความแข็งแรงและความสามารถในการรับ

น้ำหนักของโครงสร้างสะพาน โดยรูปแบบการทดสอบในโครงการวิจัยนี้สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกันได้แก่

- การทดสอบแบบสถิตย์ (Static load test) เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการเสถียรของโครงสร้างสะพาน เนื่องจากการรับน้ำหนักของรถบรรทุกทดสอบที่หยุดนิ่งตามตำแหน่งต่างๆบนสะพาน
- การทดสอบแบบพลวัต (Dynamic load test) เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรม การเสถียรของโครงสร้างสะพาน เนื่องจากการรับน้ำหนักของรถบรรทุกทดสอบที่เคลื่อนที่บน สะพานด้วยความเร็วต่างๆตามที่กำหนด



รูปที่ 1.1 ระบบพื้นฐานในการตรวจวัดผลตอบสนองของสะพาน



รูปที่ 1.2 ลักษณะตัวอย่างรถบรรทุกสิบล้อที่ใช้ทดสอบ

## 2) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างสะพาน

ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานเพื่อหาค่าแรงภายในที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ทดสอบนั้น จะต้องทำการจำลองโครงสร้างสะพานจริงให้อยู่ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และใช้สมการพื้นฐานจากสถานะสมดุลของแรง และทำการวิเคราะห์โดยให้น้ำหนักบรรทุกกระทำต่อโครงสร้างสะพาน และคำนวณค่าแรงภายในที่เกิดขึ้นออกมา โดยขั้นตอนการจำลองเพื่อการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานจะแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้

### - การจำลองแบบจำลองโครงสร้างสะพาน

ในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างสะพาน สิ่งสำคัญที่จำเป็นจะต้องทราบคือขนาดทางเรขาคณิตตามโครงสร้างจริงของสะพาน อาจจะอ้างอิงได้จากแบบก่อสร้าง แต่ถ้าไม่มีแบบก่อสร้างสะพานจำเป็นจะต้องทำการตรวจวัดขนาดโครงสร้างตามความเป็นจริง และต้องทราบค่าคุณสมบัติของวัสดุของสะพาน นั่นคือค่ากำลังวัสดุหรือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ในสะพานจริง และส่วนหนึ่งที่สำคัญคือสภาพที่รองรับซึ่งจะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมของโครงสร้าง ซึ่งโดยทั่วไปจะต้องอ้างอิงกับแบบก่อสร้างหรือสภาพโครงสร้างสะพานจริงเพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่สำคัญต่อการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างให้มีความถูกต้องและแม่นยำ

### - การจำลองน้ำหนักบรรทุกทดสอบ

ในการประเมินสภาพการใช้งานของสะพานนั้น เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงในปัจจุบันของประเทศไทย จะใช้รถบรรทุกสิบล้อไทย (Thai truck) และอ้างอิงค่าน้ำหนักจากประกาศกรมทางหลวงปี 2548 ที่ใช้น้ำหนักบรรทุกที่ 25 ตัน เป็นตัวกำหนดตามกฎหมาย โดยทำการสมมติให้น้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกทดสอบเป็นแรงกระทำแบบจุด

### - การเปรียบเทียบแบบจำลองสะพานจากผลการทดสอบ

จากข้อมูลการทดสอบที่ได้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสะพานจะถูกนำไปเปรียบเทียบเพื่อให้มีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับสภาพจริงมากที่สุด โดยทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางโครงสร้างจากค่าผลตอบแทนที่ตรวจวัดได้

## 3) ทำการคำนวณค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างสะพานที่ทำการเปรียบเทียบแล้ว เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าแรงภายในสูงสุดซึ่งประกอบด้วย แรงเฉือนสูงสุดและ โมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นและคาน แรงในแนวแกนหรือแรงอัดสูงสุดของเสา จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าน้อยแรงเค้นสูงสุด จะได้ค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานที่ทดสอบ



#### 4) ประเมินสภาพการใช้งานและความแข็งแรงของสะพาน

เนื่องจากโครงสร้างสะพานแต่ละตัวมีอัตราการเสื่อมสภาพที่แตกต่างกันเนื่องจากปัจจัยหลายอย่างด้วยกัน เช่น ปริมาณการจราจร, น้ำหนักบรรทุกของยานพาหนะ, รูปแบบทางโครงสร้าง, อายุของสะพาน และผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม เป็นต้น โครงการวิจัยนี้จะทำการประเมินสะพานที่มีปัจจัยดังกล่าวที่แตกต่างกันเพื่อทำการเปรียบเทียบผลกระทบที่มีต่อสภาพการใช้งานและความแข็งแรงของโครงสร้างให้ได้ผลการศึกษาที่มีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้

#### 5) วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย และจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

ทำการวิเคราะห์ จัดทำข้อสรุปผลการวิจัย เสนอเป็นแนวทางในการทดสอบสำหรับใช้ในการประเมินสภาพการใช้งานและความแข็งแรงทางโครงสร้างของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กต่อไป และจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกจริงของโครงสร้างสะพาน (Bridge load test) เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมและการตอบสนองของโครงสร้างสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกจากรถบรรทุกทดสอบ โดยนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาทำแบบจำลองโครงสร้าง เพื่อประเมินความแข็งแรงและความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก ตลอดจนอายุของสะพาน เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการดูแลรักษา, การซ่อมบำรุง และความปลอดภัยในการใช้งาน โดยในการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกจริงของโครงสร้างสะพานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของน้ำหนักที่ทำการทดสอบดังนี้

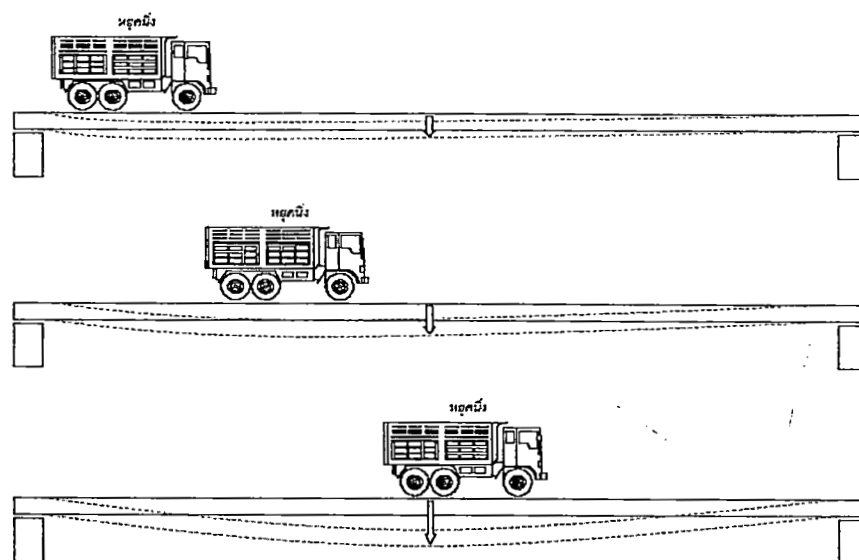
1) การทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสถิตย์ (Static load test) เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาและวิเคราะห์การเสถียรของโครงสร้างสะพานจากการรับน้ำหนักบรรทุกทดสอบที่จะหยุดนิ่งตามตำแหน่งต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้บนสะพาน

2) การทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบพลวัต (Dynamic load test) เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาและวิเคราะห์การเสถียรของโครงสร้างสะพานจากการรับน้ำหนักบรรทุกทดสอบขณะเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งที่กำหนดไว้บนสะพานด้วยความเร็วต่าง ๆ ตามที่กำหนด

#### 2.1 การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกจริงแบบสถิตย์

เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการเสถียรของโครงสร้างสะพาน อันเนื่องมาจากน้ำหนักของรถบรรทุกทดสอบและตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกทดสอบกระทำต่อสะพาน โดยในการทดสอบจะนำรถบรรทุกที่มีขนาดบรรทุกตามที่กำหนด มาหยุดที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนโครงสร้างสะพาน ดังแสดงในรูปที่ 2.1

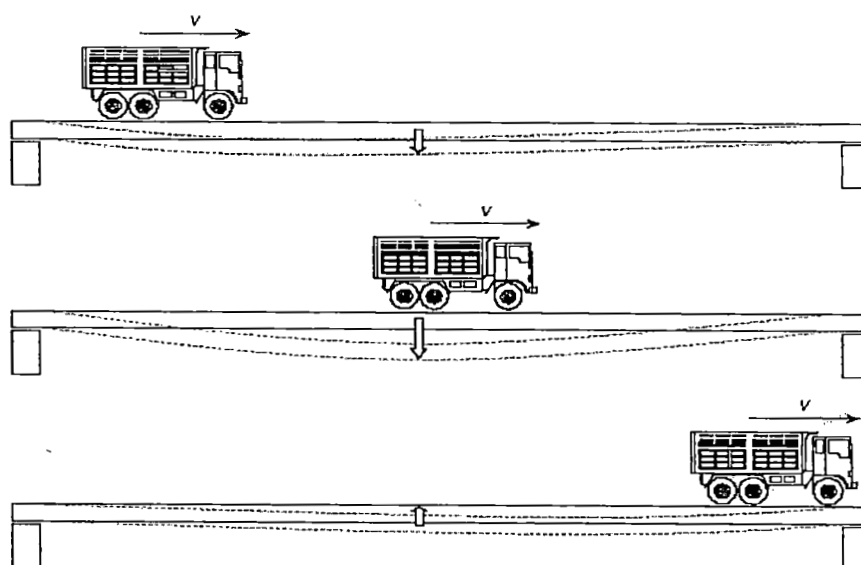
โดยในแต่ละตำแหน่งที่หยุดรถ จะทำการตรวจวัดและบันทึกค่าการเสถียรของโครงสร้างสะพาน ได้แก่ ค่าความเครียด (Strain) และค่าการแอ่นตัวตามแนวดิ่ง (Vertical displacement) จากข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดนี้ จะสามารถนำมาทำการวิเคราะห์และแสดงให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ต่าง ๆ ได้ เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดกับตำแหน่งของรถบรรทุกทดสอบ, ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวตามแนวดิ่งกับตำแหน่งของรถบรรทุกทดสอบ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 การทดสอบโครงสร้างสะพานด้วยน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตย์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนสะพาน

## 2.2 การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกจริงแบบพลวัต

การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกจริงแบบพลวัต เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาการตอบสนองของโครงสร้างสะพานและการเสียรูปเชิงพลวัตของโครงสร้างสะพานอันเนื่องมาจากน้ำหนักและความเร็วของรถบรรทุกทดสอบที่เคลื่อนที่บนสะพาน โดยในการทดสอบจะนำรถบรรทุกทดสอบที่มีขนาดบรรทุกตามที่กำหนด มาเคลื่อนที่บนสะพานผ่านจุดที่ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดด้วยความเร็วต่าง ๆ กัน สะพานจะเกิดการสั่นไหวเนื่องจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การทดสอบโครงสร้างสะพานด้วยน้ำหนักบรรทุกแบบพลวัตที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนสะพาน

โดยในแต่ละความเร็วของรถบรรทุกทดสอบที่เคลื่อนที่บนสะพาน จะทำการตรวจวัดค่าความเร่งของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง (Vertical acceleration) ซึ่งจากข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดนี้ จะสามารถวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพานได้คือ ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของสะพาน

## 2.3 การหาคุณสมบัติพื้นฐานเชิงกลของสะพาน

ในขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อประเมินคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของโครงสร้างสะพาน เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณระดับความแข็งแรงนั้น จะต้องทราบค่าผลตอบสนองหรือแรงภายในของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ต้องการประเมินเสียก่อน ซึ่งผลตอบสนองโครงสร้างในที่นี้ได้แก่ การโก่งตัว, ความเครียด และแรงภายในได้แก่ แรงเฉือน และ โมเมนต์คัต ซึ่งการตรวจวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้สามารถตรวจวัดได้โดยการใช้ อุปกรณ์วัดการเปลี่ยนตำแหน่ง (displacement transducer), อุปกรณ์วัดความเครียด (strain gauge) เป็นต้น และจากผลตอบสนองที่ตรวจวัดได้จะถูกนำไปคำนวณเป็นแรงภายในเพื่อใช้ประเมินค่าโครงสร้างที่ทดสอบนั้นเกิดหน่วยแรงขึ้นมากน้อยเพียงใด และเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานเพื่อได้ค่าบ่งชี้ระดับความแข็งแรงของโครงสร้างต่อไป

อย่างไรก็ตาม โครงสร้างสะพานที่จะวิเคราะห์ระดับความแข็งแรงนั้น จำเป็นจะต้องมีการเปรียบเทียบเพื่อให้ได้คุณสมบัติพื้นฐานเชิงกลที่สำคัญเสียก่อน ซึ่งได้แก่การอิลาสติกโมดูลัส (Elastic modulus,  $E$ ), ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด (Moment of inertia,  $I$ ) ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency,  $f$ ) ของโครงสร้าง ซึ่งค่าอิลาสติกโมดูลัส และค่าโมเมนต์ความเฉื่อย สามารถหาได้จากการทดสอบแบบสถิตย์ ในขณะที่ค่าความถี่ธรรมชาติสามารถหาได้จากการทดสอบแบบพลวัต

### 2.3.1 การหาคุณสมบัติพื้นฐานจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิตย์

การทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิตย์กระทำโดยใช้หลักการความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำภายนอก (External load) และแรงภายใน (Internal force) หรือการเปลี่ยนรูปร่างของโครงสร้าง (Deformation) โดยทำการตรวจวัดการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้น เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ทราบค่า และเปรียบเทียบค่าอิลาสติกโมดูลัส และค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้สอดคล้องกับพฤติกรรมทางทฤษฎี เพื่อนำไปสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ระดับความแข็งแรงต่อไป

ในที่นี้จะทำการตรวจวัดค่าการโก่งตัวของสะพาน (Deflection) โดยใช้อุปกรณ์วัดการเปลี่ยนตำแหน่ง (Displacement transducer) ซึ่งติดตั้งที่ใต้สะพาน ร่วมกับการวัดค่าความเครียด (Strain) โดยใช้

อุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gauge) ซึ่งติดตั้งที่ผิวล่างของพื้นสะพาน โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตามกฎของฮุก (Hooke's law) ดังสมการที่ (2.1) และทฤษฎีอิลาสติกของคาน

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.1)$$

|       |               |                                                                  |
|-------|---------------|------------------------------------------------------------------|
| เมื่อ | $\sigma$      | คือ ความเค้น (Stress)                                            |
|       | $\varepsilon$ | คือ ความเครียด (Strain)                                          |
|       | $E$           | คือ โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity หรือ Young's Modulus) |

และจากสมการความเค้นคด (Bending Stress) จะได้ว่า

$$\sigma = \frac{Mz}{I} \quad (2.2)$$

|       |     |                                                            |
|-------|-----|------------------------------------------------------------|
| เมื่อ | $M$ | คือ โมเมนต์คดที่จุดตัดที่พิจารณา (Moment at cross-section) |
|       | $z$ | คือ ระยะจากแกนสะเทิน (Neutral axis) ถึงผิวล่างสุด          |
|       | $I$ | คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนสะเทิน (Moment of inertia)   |

จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) สามารถจัดรูปใหม่ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและโมเมนต์คด

$$M = \left( \frac{EI}{z} \right) \varepsilon \quad (2.3)$$

จากสมการที่ (2.3) จะพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและโมเมนต์คดสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น สำหรับพฤติกรรมของวัสดุในช่วงอิลาสติกเชิงเส้น และจากทฤษฎีอิลาสติกของคาน

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (2.4)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.3) ลงในสมการที่ (2.4) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการโก่งตัว

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{\varepsilon}{z} \quad (2.5)$$

ซึ่งจากสมการที่ (2.3) และสมการที่ (2.4) หมายความว่าหากต้องการทราบค่าความเครียดและโมเมนต์คัตที่จุดใด ๆ ของหน้าตัดสะพาน สามารถหาได้จากค่าการโก่งตัวและในทำนองเดียวกันหากตรวจวัดค่าความเครียดจะสามารถคำนวณหาค่าการโก่งตัวและโมเมนต์คัตได้

### 2.3.2 การหาคุณสมบัติพื้นฐานจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกแบบพลวัต

ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของโครงสร้างสะพานเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่บ่งบอกถึงพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง และสามารถใช้ในการสังเกตระดับความเสียหายของโครงสร้างได้ เนื่องจากค่าความถี่ธรรมชาติจะขึ้นกับมวล ( $m$ ) และสติฟเนส ( $k$ ) ของโครงสร้างดังสมการที่ (2.6) สำหรับกรณีดีกรีความอิสระเชิงเดียว (Single-degree of freedom)

$$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.6)$$

ซึ่งค่าสติฟเนสเป็นพารามิเตอร์ซึ่งบ่งบอกถึงความแข็งของส่วนโครงสร้าง โดยอยู่ในรูปของปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ ค่าอีลาสติกโมดูลัสของวัสดุ ( $E$ ) ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด ( $I$ ) และความยาวของชิ้นส่วนโครงสร้าง ( $L$ ) ทั้งนี้สมการที่ (2.6) อาจแปลงให้อยู่ในรูปเชิงโหมดสำหรับปัญหาแบบต่อเนื่อง (continuous) ได้ดังสมการที่ (2.7)

$$\omega = 2\pi f = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad (2.7)$$

โดยที่  $n$  คือโหมดของการสั่นไหวของโครงสร้าง

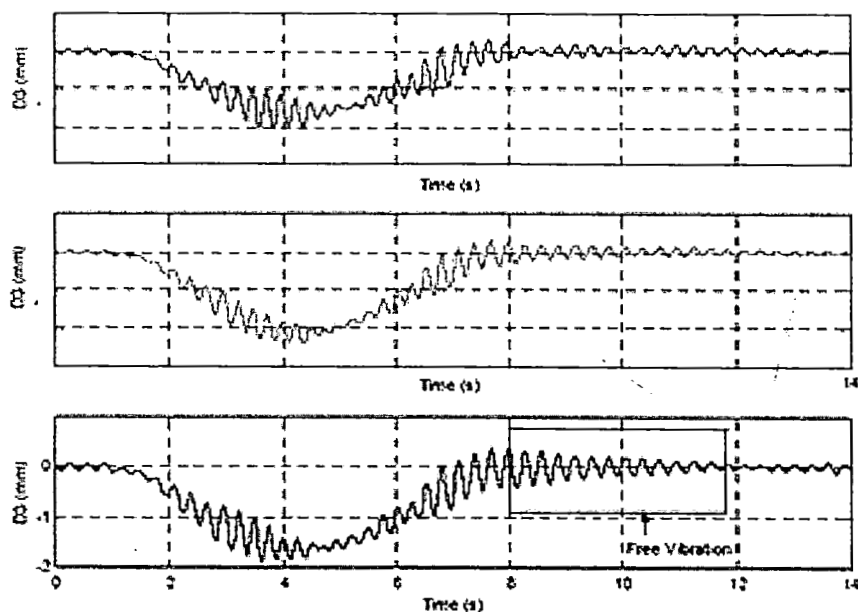
$\rho$  คือมวลต่อหน่วยความยาวของโครงสร้าง

จากสมการที่ (2.7) จะพบว่าหากโครงสร้างมีการเสื่อมสภาพลง ความแข็งแรงหรือสติฟเนสของโครงสร้างจะมีค่าลดลง เป็นเหตุให้ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างลดลงด้วย ดังนั้นจึงอาจสังเกตระดับการเสื่อมสภาพของโครงสร้างได้จากค่าความถี่ธรรมชาติที่เปลี่ยนแปลงไปนั่นเอง

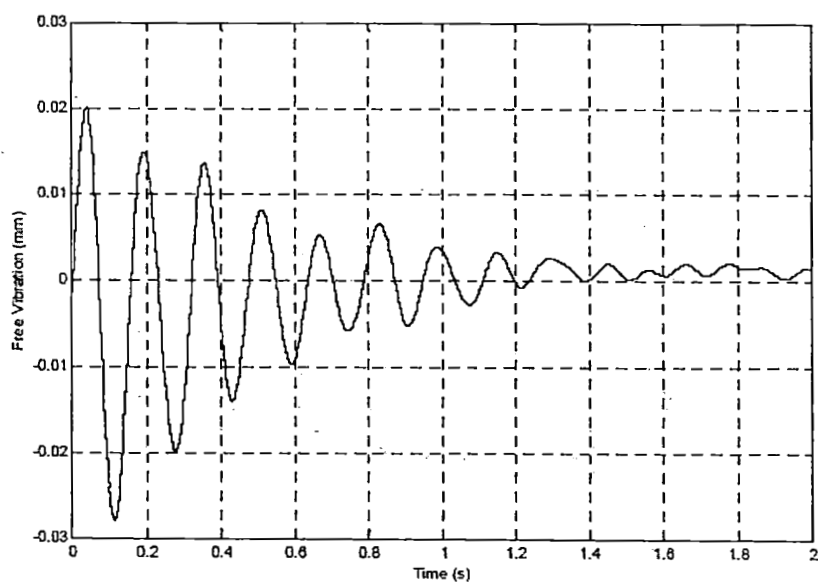
อีกทั้งจากสมการที่ (2.7) ยังบ่งบอกว่าการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลซึ่งได้แก่ ค่าอัตราตึง โมดูลัส ( $E$ ) และค่าโมเมนต์ความเฉื่อย ( $I$ ) นั้นหากเปรียบเทียบจากการทดสอบทางสถิตยเพียงอย่างเดียว ค่าที่ได้อาจไม่สอดคล้องกับค่าความถี่ธรรมชาติจริงของโครงสร้าง ดังนั้นจึงต้องมีการเปรียบเทียบจากการทดสอบแบบพลวัตควบคู่กันไปด้วย เพื่อให้ได้คุณสมบัติพื้นฐานของโครงสร้างที่ถูกต้องที่สุด

การทดสอบหาค่าความถี่ธรรมชาติสามารถกระทำได้โดยทำการทดสอบแบบการสั่นไหวอิสระ (Free vibration) ด้วยการกระตุ้นค่าตอบสนองเริ่มต้น (Initial condition) ให้แก่โครงสร้าง และตรวจวัดคาบการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นแล้วจึงแปลงเป็นค่าความถี่ โดยอาจติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดประเภทตัววัดความเร่ง (Accelerometer) เพื่อให้ได้ค่าความเร่งของการสั่นสะเทือนที่ชัดเจน หรืออาจวิเคราะห์จากสัญญาณตรวจวัดที่ได้จากการอุปกรณ์วัดการเปลี่ยนตำแหน่งหรืออุปกรณ์วัดความเครียดก็ได้ แต่อาจมีความละเอียดที่ต่ำกว่า

การวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานจากข้อมูลการตรวจวัด ทำได้โดยนำข้อมูลที่บันทึกได้จากการตรวจวัดซึ่งอยู่ในรูปของประวัติเวลา (Time history) ของข้อมูลต่าง ๆ โดยพิจารณาการสั่นไหวในช่วงการสั่นแบบอิสระมาแปลงให้อยู่ในรูปของโดเมนของความถี่ (Frequency domain) โดยการแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform) ตัวอย่างประวัติเวลาของการแอ่นตัวเนื่องจากรถบรรทุกทดสอบเคลื่อนที่บนสะพาน และการสั่นไหวแบบอิสระของโครงสร้างสะพานดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4 จากนั้นพิจารณาค่าความถี่ที่มีขนาดของค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์สูงสุดจากกราฟ จะเป็นค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพาน โดยตัวอย่างข้อมูลที่แปลงให้อยู่ในโดเมนของความถี่โดยการแปลงฟูเรียร์ดังแสดงในรูปที่ 2.5

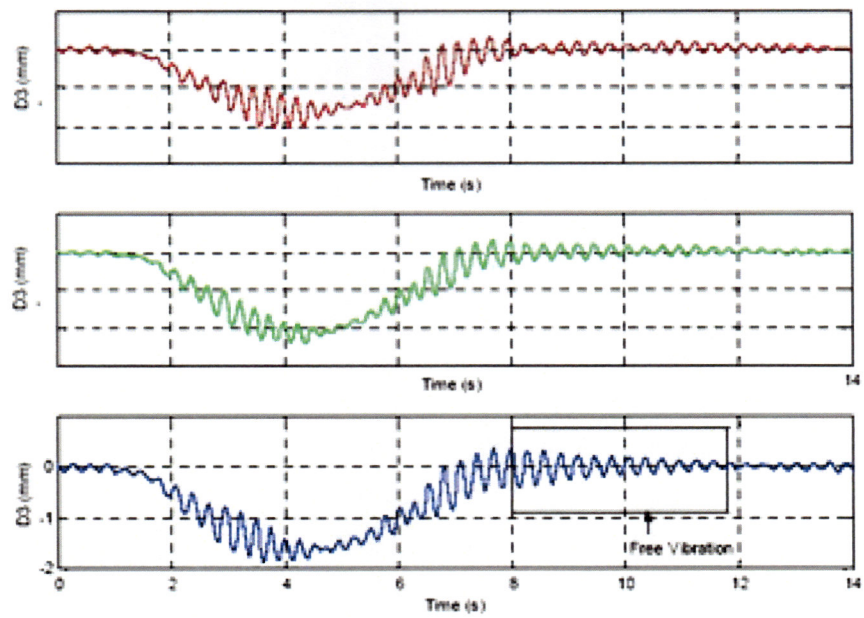


รูปที่ 2.3 ตัวอย่างประวัติเวลาของการแอ่นตัวในแนวดิ่งที่ได้จากการตรวจวัด

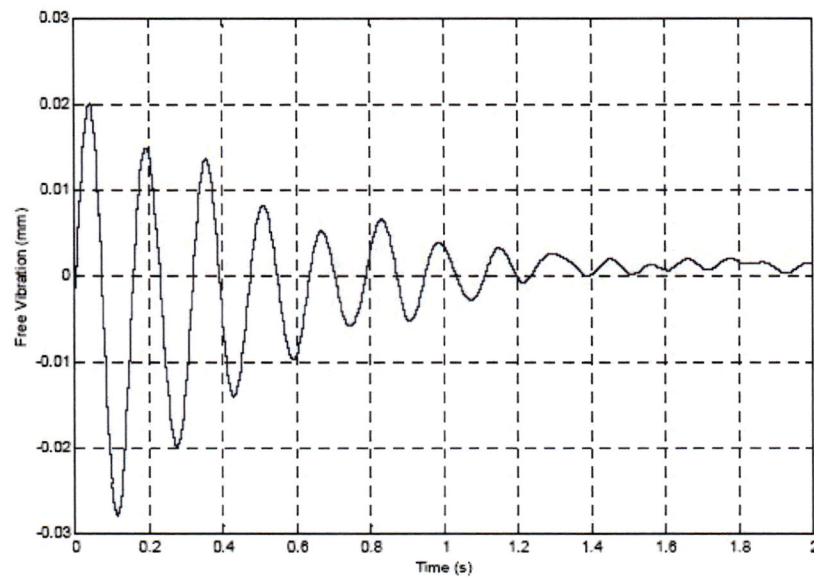


รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการสั่นไหวแบบอิสระของโครงสร้างสะพาน





รูปที่ 2.3 ตัวอย่างประวัติเวลาของการแอ่นตัวในแนวดิ่งที่ได้จากการตรวจวัด



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการสั่นไหวแบบอิสระของโครงสร้างสะพาน

เมื่อ  $A_s$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม

$f_y$  คือ กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

$f'_c$  คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

$\beta_1$  คือ ตัวคูณลดกำลัง (ใช้ 0.85 เมื่อ  $f'_c < 280 \text{ ksc}$ )

$b$  คือ ความกว้างของหน้าตัด

นำค่า  $c$  ที่ได้จากสมการ (2.8) มาใช้เพื่อหาค่า  $a$  จากสมการที่ (2.9)

$$a = c\beta_1 \quad (2.9)$$

นำค่า  $a$  ที่ได้จากสมการ (2.9) มาใช้เพื่อหากำลังต้านทานแรงดัด หรือ โมเมนต์ดัดที่หน้าตัดสามารถรับได้จากสมการที่ (2.10)

$$M_n = A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.10)$$

เมื่อ  $M_n$  คือ กำลังต้านทานแรงดัด

$d$  คือ ระยะจากผิวบนของคอนกรีตถึงตำแหน่งศูนย์กลางของเหล็กเสริม

จากนั้นจึงนำกำลังต้านทานแรงดัดที่ได้จากสมการ (2.10) ไปใช้ประกอบในการหาค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกต่อไป

#### 2.4.2 กำลังต้านทานแรงเฉือน (Shear strength)

กำลังต้านทานแรงเฉือนคือกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุดของหน้าตัดที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้นหรือชิ้นส่วนคานซึ่งกระทำในแนวตั้งฉากกับความยาวชิ้นส่วน สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c}bd \quad (2.11)$$

|       |        |                                                            |
|-------|--------|------------------------------------------------------------|
| เมื่อ | $V_c$  | คือ กำลังต้านทานแรงเฉือน                                   |
|       | $f'_c$ | คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต                               |
|       | $b$    | คือ ความกว้างของหน้าตัด                                    |
|       | $d$    | คือ ระยะจากผิวบนของคอนกรีตถึงตำแหน่งศูนย์กลางของเหล็กเสริม |

จากนั้นจึงนำค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่ได้จากสมการ (2.11) ไปใช้ประกอบในการหาค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกต่อไป

## 2.5 ค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก (Load Rating Factor, RF)

ค่า Load rating factor (RF) เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน โดยจะบอกเป็นค่าอัตราส่วนของความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน หักกลับด้วยผลของน้ำหนักบรรทุกคงที่ต่อน้ำหนักบรรทุกจรที่กำหนดไว้ของสะพานนั้นๆ โดยปกติแล้วแต่ละชิ้นส่วนจะมีค่า RF ต่างกันตามกำลังรับน้ำหนักของแต่ละชิ้นส่วนโครงสร้าง ซึ่งค่าที่ใช้แสดงจะเป็นค่าที่น้อยที่สุดของชิ้นส่วนโครงสร้างในสะพานนั้น ค่า Bridge load rating factor ตามมาตรฐาน American Association States Highway and Transportation Officials (AASHTO) ได้แบ่งวิธีการในการประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานออกเป็น 2 ระดับตามความถี่ในการใช้งานของสะพานที่แตกต่างกันดังนี้

- **Inventory level** เป็นระดับในการใช้งานสะพานโดยปลอดภัย ภายใต้น้ำหนักบรรทุกจรรยาขานพาหนะในสภาวะปกติ ตลอดอายุการใช้งานของสะพาน
- **Operating level** เป็นระดับการใช้งานของสะพานโดยปลอดภัย ภายใต้น้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดที่ยอมให้จากยานพาหนะในสภาวะที่ไม่ปกติ หรือสภาวะที่ยอมให้เกิดเป็นครั้งคราว โดยหากระดับน้ำหนักบรรทุกในสภาวะไม่ปกติดังกล่าว ยังไม่ทำให้เกิดผลการประเมินโครงสร้างสะพานที่ Operating level ได้ค่า Rating factor น้อยกว่า 1.0 แสดงว่าโครงสร้างสะพานยังไม่เกิดการวิบัติ (Collapse) ที่ระดับน้ำหนักบรรทุกนั้นๆ แต่อาจจะเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างสะพาน (Structural damages) ได้

มาตรฐาน AASHTO ได้กำหนดให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานใดๆ ในระดับ inventory level มีค่าเท่ากับค่ากำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบ ในขณะที่ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกในระดับ Operating level จะยอมให้มีค่าสูงขึ้นกว่าค่าเดียวกันในระดับ Inventory level เช่น กำลังรับแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กโครงสร้างในระดับ Inventory level มีค่าเป็น 0.55 เท่าของค่ากำลังดึงคราก ในขณะที่จะมีค่าเป็น 0.75 เท่าของค่ากำลังดึงครากสำหรับระดับ Operating level และมาตรฐาน AASHTO ยังได้ให้ทางเลือกในการประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างไว้ 2 วิธี ดังนี้

### 2.5.1 วิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable Stress Method, AS)

เป็นวิธีที่วิเคราะห์โครงสร้างสะพานภายใต้หน่วยแรงขณะใช้งาน โดยที่พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานยังอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น ค่า Rating factor ในกรณีนี้จะพิจารณาเมื่อค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดที่กระทำต่อโครงสร้างสะพาน (ไม่คูณค่า Load factor) ทั้งน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรมีค่าเท่ากับค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ตามทฤษฎี (ไม่คูณค่า Reduction factor) ดังสมการที่ (2.12)

$$RF = \frac{R - D}{L(1 + I)} \quad (2.12)$$

- โดยที่
- $R$  = หน่วยแรงที่ยอมให้ของชิ้นส่วนโครงสร้าง
  - $D$  = ผลของน้ำหนักบรรทุกตายตัว (Dead load) ต่อชิ้นส่วนโครงสร้าง
  - $L$  = ผลของน้ำหนักบรรทุกจร (Live load) ต่อชิ้นส่วนโครงสร้าง
  - $I$  = ตัวคูณเนื่องจากการกระแทกของน้ำหนักบรรทุกจร =  $\frac{15.2}{L + 38}$
  - $L$  = ความยาวช่วงสะพานในหน่วยเมตร โดยมีค่าไม่เกิน 1.3 ซึ่งเป็นค่าสูงสุด
  - $RF$  = ค่า Rating factor สำหรับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจรที่ใช้คำนวณ Rating factor เช่น น้ำหนัก HS20-44 หรือน้ำหนักรถสิบล้อมาตรฐานที่กำหนดโดยกรมทางหลวงชนบท หรือกรมทางหลวงเป็นต้น

### 2.5.2 วิธีคำนวณน้ำหนักบรรทุก (Load factor rating method, LFR)

เป็นวิธีที่วิเคราะห์โครงสร้างสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มค่า และพิจารณาพฤติกรรมของโครงสร้างสูงขึ้นจนถึงช่วงไม่ยืดหยุ่น (Inelastic behavior) หรือวิธีของ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา ที่นิยมใช้อ้างอิงเป็นมาตรฐานที่แพร่หลายในหลายประเทศรวมทั้งประเทศไทย ค่า Rating Factor ในกรณีนี้จะพิจารณาเมื่อค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลรวมของน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มค่าแล้ว ทั้งหมด มีค่าเท่ากับค่ากำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างที่ได้มีการปรับลดค่าแล้ว ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (2.13)

$$RF = \frac{\phi R_n - \gamma_D D}{\gamma_L L(1 + I)} \quad (2.13)$$

โดยที่ RF = ค่า Rating factor สำหรับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจรที่ใช้คำนวณ Rating factor เช่น น้ำหนัก HS20-44 หรือน้ำหนักรถสิบล้อมาตรฐานที่กำหนดโดยกรมทางหลวงเป็นต้น

$R_n$  = กำลังรับน้ำหนักของชิ้นส่วนโครงสร้าง

$\phi$  = ตัวคูณลดกำลังของชิ้นส่วน

$\gamma_D$  = ตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (ใช้ค่า 1.3 ตามมาตรฐาน AASHTO)

$\gamma_L$  = ตัวคูณสำหรับน้ำหนักบรรทุกจร (ใช้ค่า 2.17 ตามมาตรฐาน AASHTO)

อ้างอิงตามมาตรฐาน Manual for condition evaluation of bridge (AASHTO, 2000) จะสามารถคำนวณค่า Rating factor (RF) สำหรับ Inventory level และ Operating level ได้ดังสมการ (2.14) และ (2.15) ดังนี้

$$RF_{INVENTORY} = \frac{\phi R_n - 1.3D}{2.17L(1 + I)} \quad (2.14)$$

$$RF_{OPERATING} = \frac{\phi R_n - 1.3D}{1.3L(1 + I)} \quad (2.15)$$

### 2.5.3 ค่าปัจจัยตามมาตรฐานข้อกำหนดสะพานทางหลวงของประเทศเกาหลี (Korean Standards Specifications for Highway Bridges)

เป็นมาตรฐานจากกระทรวงคมนาคมของประเทศเกาหลี (Ministry of Construction and Transportation หรือ MOCT) (2000) ซึ่งมีการนำไปใช้อ้างอิงในการหาค่าดัชนีความปลอดภัยของสะพานโครงสร้างวัสดุประกอบ (Advance Composite Materials หรือ ACM) ในปี 2000 โดย H.S. Ji และคณะ มีสมการพื้นฐานดังนี้

$$RF = \frac{f_a - f_d}{f_l(1+i)} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $RF$  คือ ค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก หากค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก มีค่ามากกว่า 1 หมายความว่าโครงสร้างสะพานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย

$f_a$  คือ ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable stress)

$f_d$  คือ ค่าหน่วยแรงจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load stress)

$f_l$  คือ ค่าหน่วยแรงจากน้ำหนักจรสูงสุด (Maximum live load stress)

$i$  คือ ค่าดัชนีการกระแทกจากผลของน้ำหนักกระทำแบบพลวัต (Impact factor for dynamic loading effects,  $i = \frac{15}{40 + L}$  เมื่อ  $L$  คือ ความยาวของช่วงสะพาน โดยจะมีค่า  $\leq 0.3$  หรือใช้ค่า 1.3 ซึ่งเป็นค่าสูงสุด)

จากหลักการหาค่า  $RF$  ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับสะพานที่มีแบบก่อสร้างสะพานทุกประเภท โดยสามารถนำข้อมูลจากแบบโครงสร้างมาคำนวณหาค่าต่าง ๆ ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่คำนวณด้วยวิธีตัวคานน้ำหนักบรรทุก

อย่างไรก็ดี เนื่องจากสะพานของกรมทางหลวงและทางหลวงชนบทส่วนใหญ่จะเป็นสะพานแบบระบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก ทั้งแบบหล่อในที่ (Reinforced concrete, RC deck slab) และแบบหล่อสำเร็จ (Pre-cast concrete, PC deck slab) ซึ่งจะเป็นประเภทของโครงสร้างสะพานที่เลือกทดสอบในโครงการวิจัยนี้ ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จะทำการดำเนินการทดสอบโดยอ้างอิงตามมาตรฐานของ

AASHTO โดยทำการปรับใช้กับยานพาหนะของประเทศไทยหลากหลายรูปแบบ โดยคำนึงถึงปัจจัยการเสื่อมสภาพเนื่องจากลักษณะทางโครงสร้าง, ลักษณะทางสิ่งแวดล้อม, ลักษณะการใช้งาน, และอายุของโครงสร้าง ซึ่งข้อมูลทดสอบที่ได้จะนำมาทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อประเมินสภาพการใช้งานและความแข็งแรงของโครงสร้างสะพาน ให้เป็นแนวทางในการทดสอบสะพานทางหลวงที่มีความเชื่อถือได้และนำไปสู่การร่างมาตรฐานการทดสอบสะพานของประเทศไทยต่อไป

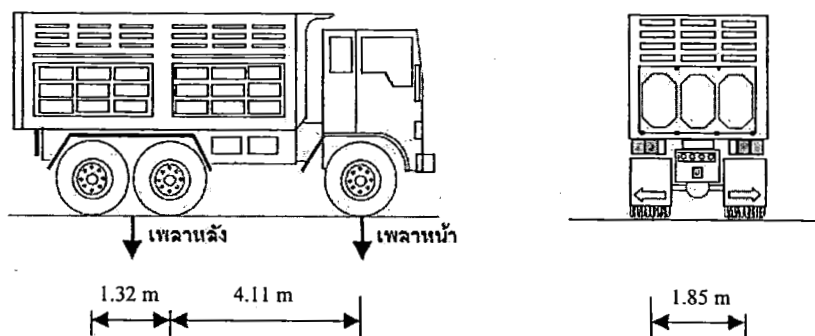
### บทที่ 3

#### การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน

##### 3.1 ลักษณะของน้ำหนักทดสอบ

ในการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกจริงของโครงสร้างสะพาน จะนิยามทดสอบโดยการใช้น้ำหนักบรรทุกทดสอบที่มีน้ำหนักกรรวมกับน้ำหนักบรรทุกที่เหมาะสม กล่าวคือรถบรรทุกทดสอบจะต้องมีน้ำหนักมากเพียงพอที่จะทำให้อุปกรณ์ตรวจวัดสามารถวัดค่าได้มากเมื่อเทียบกับค่าการรับกวนทางไฟฟ้าและสภาพแวดล้อม (Noise) แต่จะต้องไม่มากเกินไปจนทำให้เกิดการเสียหายแก่โครงสร้างของสะพาน ตลอดจนถนน และส่วนเชิงลาด (Approach) ที่อยู่ข้างเคียงขณะที่ทำการทดสอบ โดยจะต้องทำการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานและพิจารณาผลของความเสื่อมสภาพที่ตรวจพบได้จากการตรวจสอบด้วยสายตาประกอบด้วย โดยในการศึกษานี้ได้กำหนดน้ำหนักของรถบรรทุกทดสอบจำนวน 2 คันคือน้ำหนักรวม 25.05 ตันและ 24 ตันในการทดสอบครั้งที่ 1 และเก็บข้อมูลเพิ่มเติมในการทดสอบครั้งที่ 2 ด้วยรถบรรทุกน้ำหนักรวม 22.7 ตัน จำนวน 1 คัน

โดยลักษณะมาตรฐานของรถบรรทุกไทยดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยมีความกว้างระหว่างล้อประมาณ 1.85 เมตร ระยะห่างจากเพลาน้ำถึงกึ่งกลางเพลาลังประมาณ 4.11 เมตร มีการกระจายของน้ำหนักบรรทุกที่เพลาน้ำและสองเพลาลังประมาณ 20%, 40% และ 40% ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 ขนาดของรถบรรทุกสปีดไทยที่ใช้ในการทดสอบ





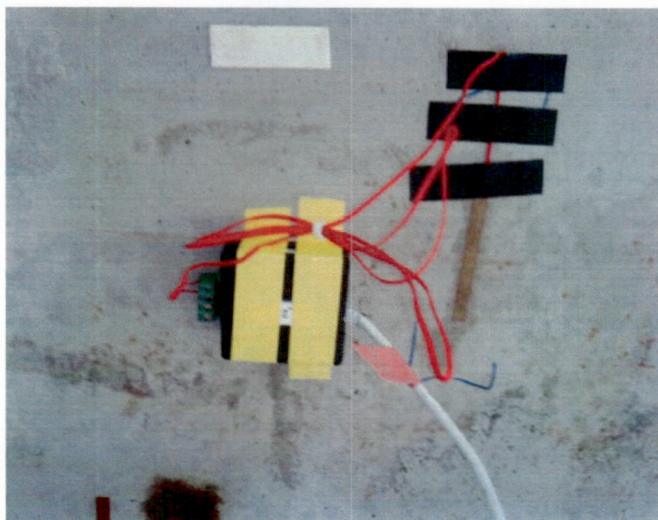
รูปที่ 3.2 การชั่งน้ำหนักของรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบโดยตาชั่งลอย

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด

ในการตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานนั้น จะต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งสามารถจำแนกได้ 3 ประเภทตามลักษณะการใช้งาน คือ

#### 3.2.1 อุปกรณ์สำหรับการตรวจวัด (Sensor unit)

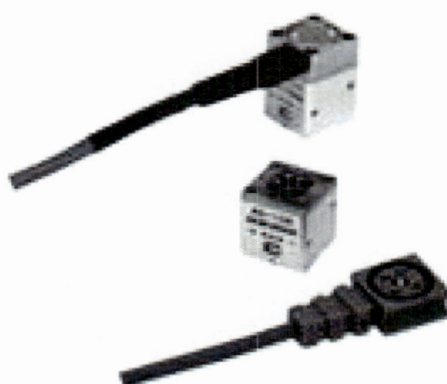
เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ติดตั้งไว้กับชิ้นส่วนของโครงสร้างที่ต้องการตรวจวัด เพื่อตรวจวัดพฤติกรรมต่าง ๆ ของชิ้นส่วนนั้น โดยอาศัยการแปลงค่าพฤติกรรมใด ๆ เช่น การยืดหดตัว (Elongation), การแอ่นตัว (Deflection) และความเร่งจากการสั่นไหว (Acceleration) ให้เป็นค่าในรูปของสัญญาณไฟฟ้า และส่งต่อไปยังอุปกรณ์แปลงผลสัญญาณเพื่อบันทึกค่าต่อไป ตัวอย่างของอุปกรณ์สำหรับการตรวจวัด เช่น อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain gauge), อุปกรณ์ตรวจวัดการค่าแอ่นตัว (Displacement transducer) และอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งจากการสั่นไหว (Accelerometer) เป็นต้น



รูปที่ 3.3 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด



รูปที่ 3.4 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าการแอ่นตัว

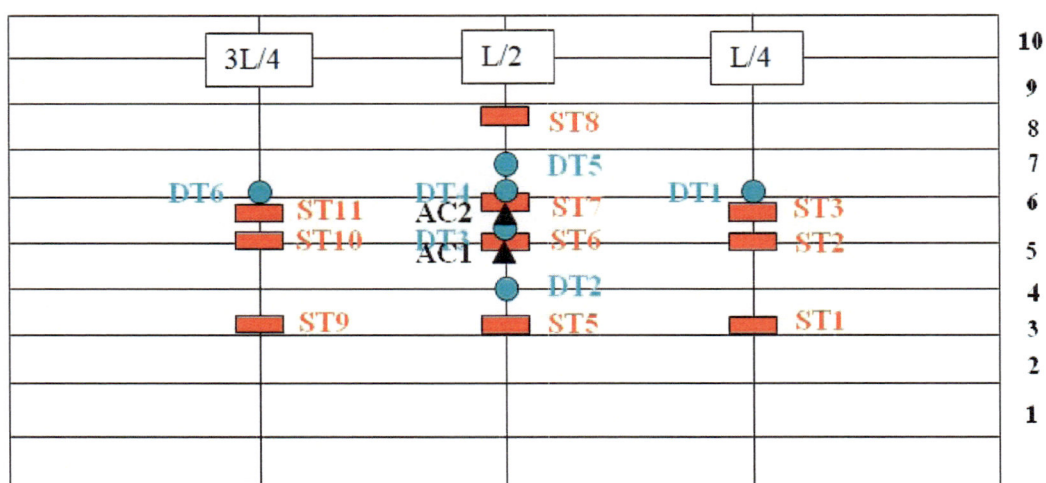


รูปที่ 3.5 ลักษณะของอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งจากการสั่นไหว





รูปที่ 3.6 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ ใต้พื้นสะพาน



■ = Strain gauge

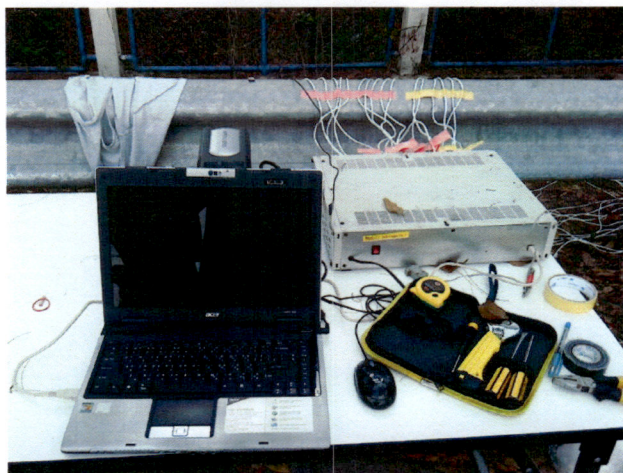
● = Displacement Transducer

▲ = Accelerometer

รูปที่ 3.7 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

### 3.2.2 อุปกรณ์สำหรับแปลงสัญญาณและบันทึกผล (Data acquisition unit)

ทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่ได้รับจากอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor Unit) และบันทึกผล โดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) แบบ 48 ช่องสัญญาณ ที่ความถี่ในการบันทึกผล 1,024 Hz (1,024 ชุดข้อมูลต่อวินาทีต่อช่องสัญญาณ)



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์แปลงสัญญาณบันทึกผลและอุปกรณ์แสดงผล

### 3.2.3 อุปกรณ์สำหรับแสดงผล (Data display unit)

คือเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กที่ทำหน้าที่แสดงผลของข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์แปลงสัญญาณและบันทึกผลจากเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger)

## 3.3 สะพานที่ทำการทดสอบ

สะพานที่จะทำการทดสอบตั้งอยู่บนทางหลวงชนบท ขบ. 3026 อยู่ในความรับผิดชอบของกรมทางหลวงชนบท โดยอยู่บริเวณหน้าสำนักทางหลวงที่ 3 (ชลบุรี) ตำบลหนองซาก อำเภอบ้านบึง จังหวัดชลบุรี ลักษณะโครงสร้างเป็นสะพานต่อเนื่อง 3 ช่วง โดยมีความยาวรวม 28 เมตรและความยาวช่วงสะพานช่วงละไม่เกิน 10 เมตร ลักษณะชิ้นส่วนโครงสร้างเสาและคานเป็นโครงสร้างแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก ในขณะที่พื้นสะพานประกอบด้วยชิ้นส่วนแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง (Precast concrete slab) ความกว้างแผ่นละ 1 เมตรวางเรียงกันจำนวน 10 แผ่นรวมความกว้าง 10 เมตร สำหรับการสัญจร 2 ช่องทาง และเทพื้นหน้าด้วยคอนกรีตอีกชั้น และที่จุดรองรับของสะพานช่วงในพบว่าแผ่นพื้นมีลักษณะที่ไม่ต่อเนื่องกัน ทำให้พฤติกรรมของสะพานแต่ละช่วงสามารถจำลองเป็นจุดรองรับอย่างง่าย (Simple support) ได้ ลักษณะทางกายภาพและแนวช่องจราจรของสะพานทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.9 ถึงรูปที่ 3.12

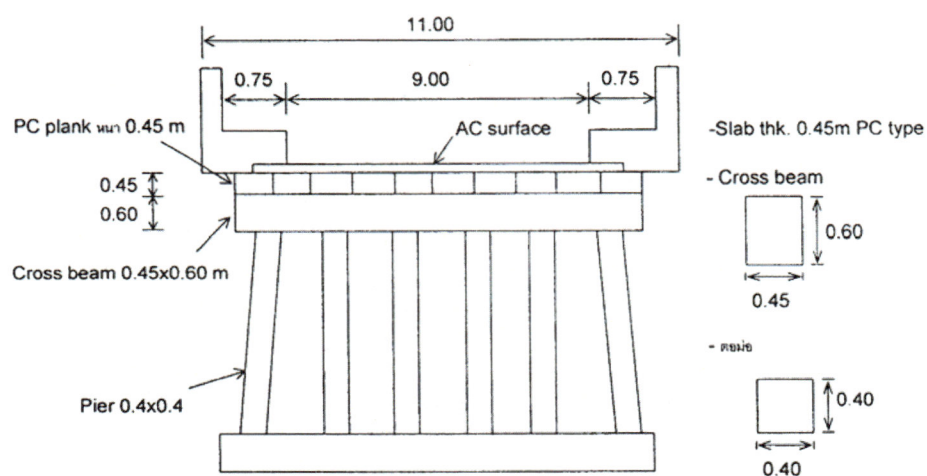




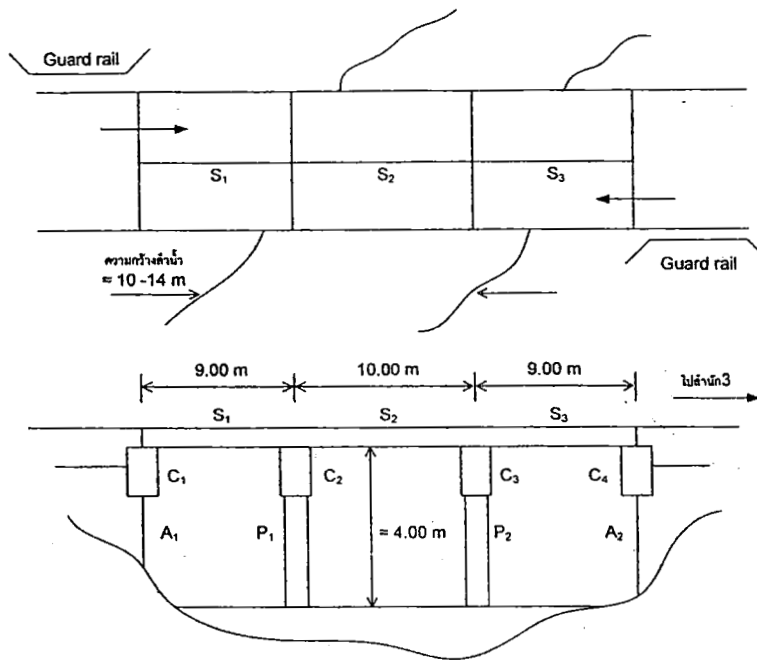
รูปที่ 3.9 ลักษณะโครงสร้างของสะพานที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 3.10 ลักษณะช่องทางของสะพานที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 3.11 รูปตัดสะพานที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 3.12 ลักษณะทางกายภาพของสะพานที่ทำการทดสอบ

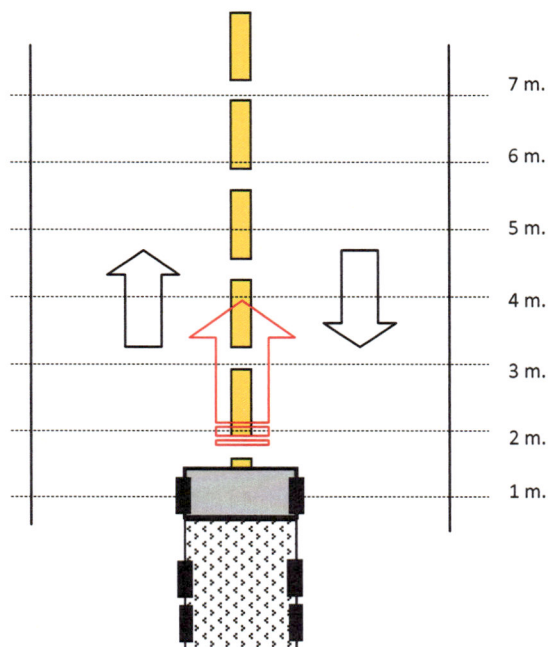
### 3.4 ลักษณะการวางน้ำหนักทดสอบ

จากลักษณะทางกายภาพของสะพานจะพบว่าสะพานมีลักษณะเป็นสะพานต่อเนื่อง มีความยาวช่วงสะพานทั้งหมด 28 เมตรมีระยะระหว่างจตุรรองรับ 9 เมตร 10 เมตรและ 9 เมตรดังรูปที่ 3.6 ในการทดสอบภาคสนามได้การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดทั้งหมดในช่วงระยะ 9 เมตรเท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดของพื้นที่ในการเข้าถึงตำแหน่งที่จะติดตั้งอุปกรณ์แทนช่วงกลางที่จะทำงานได้ยากเนื่องจากมีลำน้ำธรรมชาติไหลผ่าน ตารางที่ 3.1 แสดงการจัดวางรถบรรทุกแต่ละกรณีในการทดสอบภาคสนาม โดยมีกรณีทดสอบทั้งหมด 19 กรณี ประกอบด้วยการทดสอบทางสถิตย์ 6 กรณี โดยจะจ่อครรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวสะพานที่ระยะทุก ๆ 1 เมตร และการทดสอบแบบพลวัต 13 กรณีซึ่งเป็นการทดสอบโดยเคลื่อนรถบรรทุกด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน โดยแต่ละกรณีแสดงรูปภาพอธิบายลักษณะการจัดวางน้ำหนักบรรทุกทั้งแบบสถิตย์และแบบพลวัต ดังรูปที่ 3.13 ถึงรูปที่ 3.31

ตารางที่ 3.1 การจัดวางรถบรรทุกแต่ละกรณีในการทดสอบภาคสนาม

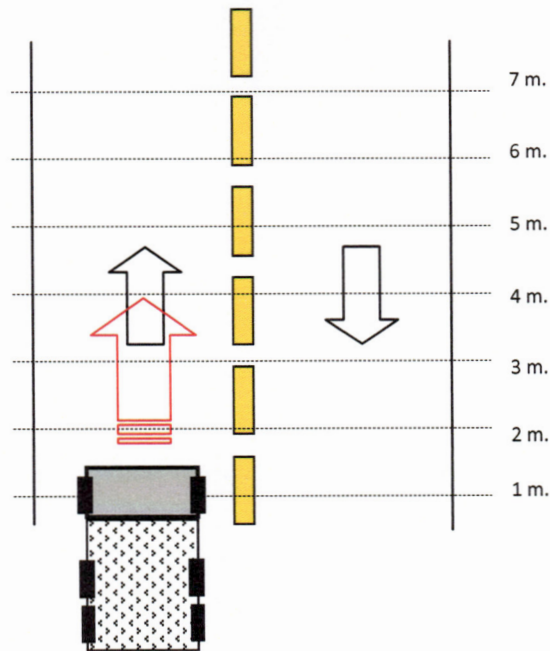
| กรณีที่ | การทดสอบแบบสถิตย์                        | กรณีที่ | การทดสอบแบบพลวัต                               |
|---------|------------------------------------------|---------|------------------------------------------------|
| 1       | รถ 1 คันวิ่งกลางระหว่างช่องทาง           | 1       | รถ 2 คันวิ่งเต็มหน้ากระดานทั้ง 2 ช่องทาง (ช้า) |
| 2       | รถ 1 คันวิ่งไปตามช่องทางด้านซ้าย         | 2       | รถ 1 คันวิ่งกลางระหว่างช่องทาง (ช้า)           |
| 3       | รถ 1 คันวิ่งกลับตามช่องทางด้านขวา        | 3       | รถ 1 คันวิ่งกลางระหว่างช่องทาง (ปานกลาง)       |
| 4       | รถ 2 คันวิ่งไปตามช่องทางด้านซ้าย         | 4       | รถ 1 คันวิ่งกลางระหว่างช่องทาง (เร็ว)          |
| 5       | รถ 2 คันวิ่งกลับตามช่องทางด้านขวา        | 5       | รถ 1 คันวิ่งไปตามช่องทางด้านซ้าย (ช้า)         |
| 6       | รถ 2 คันวิ่งเต็มหน้ากระดานทั้ง 2 ช่องทาง | 6       | รถ 1 คันวิ่งกลับตามช่องทางด้านขวา (ช้า)        |
|         |                                          | 7       | รถ 1 คันวิ่งไปตามช่องทางด้านซ้าย (ปานกลาง)     |
|         |                                          | 8       | รถ 1 คันวิ่งกลับตามช่องทางด้านขวา (ปานกลาง)    |
|         |                                          | 9       | รถ 1 คันวิ่งไปตามช่องทางด้านซ้าย (เร็ว)        |
|         |                                          | 10      | รถ 1 คันวิ่งกลับตามช่องทางด้านขวา (เร็ว)       |
|         |                                          | 11      | รถ 1 คันวิ่งไปตามช่องทางด้านซ้าย (ช้ามาก)      |
|         |                                          | 12      | รถ 1 คันวิ่งกลางระหว่างช่องทาง (ช้ามาก)        |
|         |                                          | 13      | รถ 1 คันวิ่งกลับตามช่องทางด้านขวา (ช้ามาก)     |

การทดสอบแบบสถิตย์ กรณีที่ 1: รถ 1 คันวิ่งกลางระหว่างช่องทาง จอดทุก 1 เมตร



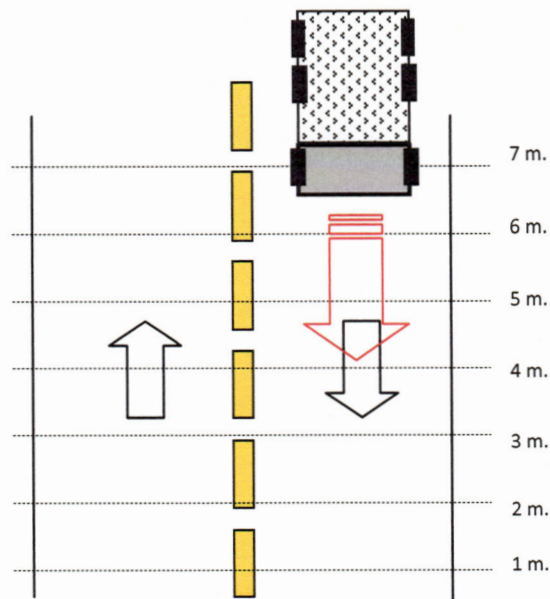
รูปที่ 3.13 การจัดวางน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตย์ กรณีที่ 1 ในการทดสอบภาคสนาม

การทดสอบแบบสถิติ กรณีที่ 2: รถ 1 คันวิ่งไปตามช่องทางด้านซ้าย จอดทุก 1 เมตร



รูปที่ 3.14 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบสถิติ กรณีที่ 2 ในการทดสอบภาคสนาม

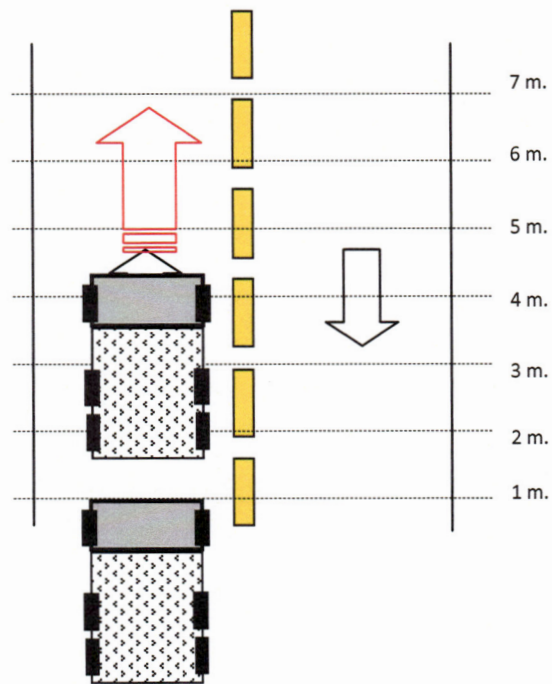
การทดสอบแบบสถิติ กรณีที่ 3: รถ 1 คันวิ่งกลับตามช่องทางด้านขวา จอดทุก 1 เมตร



รูปที่ 3.15 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบสถิติ กรณีที่ 3 ในการทดสอบภาคสนาม

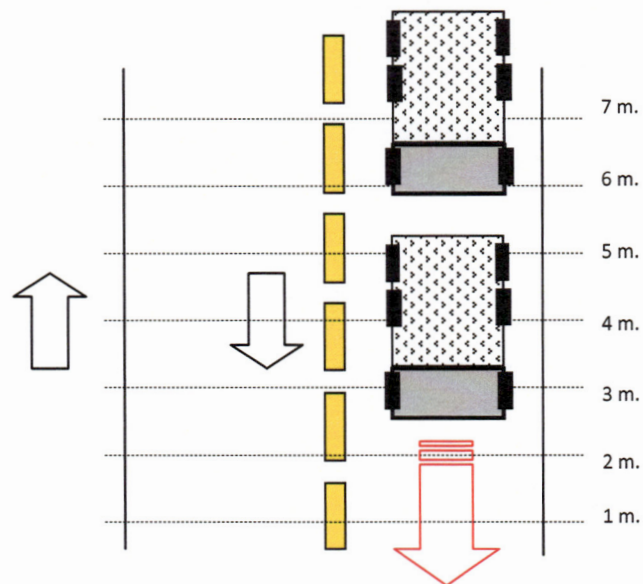


การทดสอบแบบสถิติ กรณีที่ 4: รถ 2 คันวิ่งไปตามช่องทางด้านซ้าย จอดทุก 1 เมตร



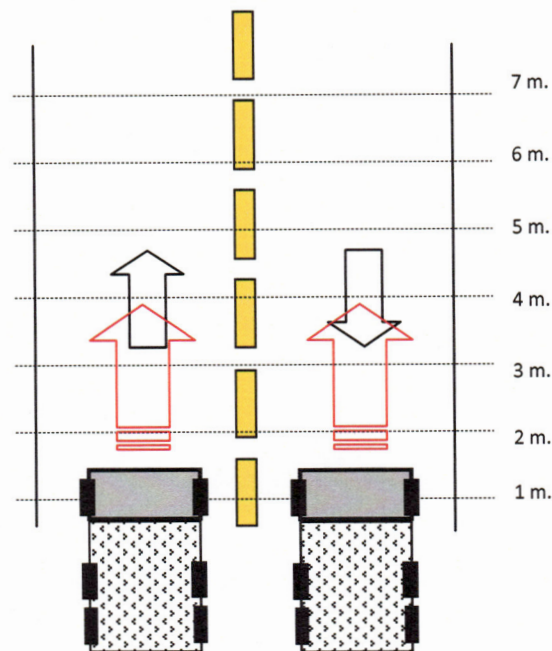
รูปที่ 3.16 การจัดวางน้ำหนักบรรทุกแบบสถิติ กรณีที่ 4 ในการทดสอบภาคสนาม

การทดสอบแบบสถิติ กรณีที่ 5: รถ 2 คันวิ่งกลับตามช่องทางด้านขวา จอดทุก 1 เมตร



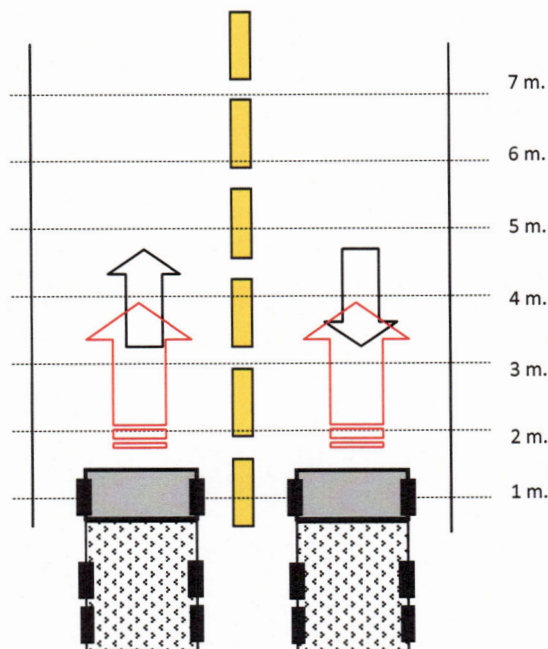
รูปที่ 3.17 การจัดวางน้ำหนักบรรทุกแบบสถิติ กรณีที่ 5 ในการทดสอบภาคสนาม

การทดสอบแบบสถิตย์ กรณีที่ 6: รถ 2 คันวิ่งเต็มหน้ากระดานทั้ง 2 ช่องทาง จอดทุก 1 เมตร



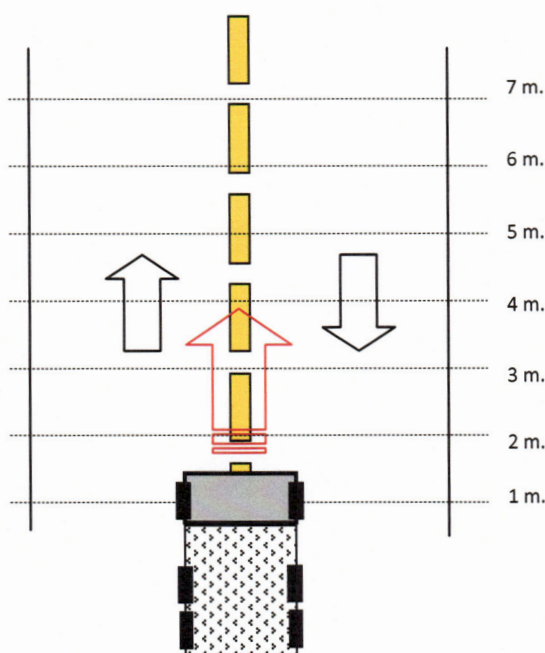
รูปที่ 3.18 การจัดวางน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตย์ กรณีที่ 6 ในการทดสอบภาคสนาม

การทดสอบแบบพลวัต กรณีที่ 1: รถ 2 คันวิ่งเต็มหน้ากระดานพร้อมกันทั้ง 2 ช่องทาง ความเร็วระดับช้า



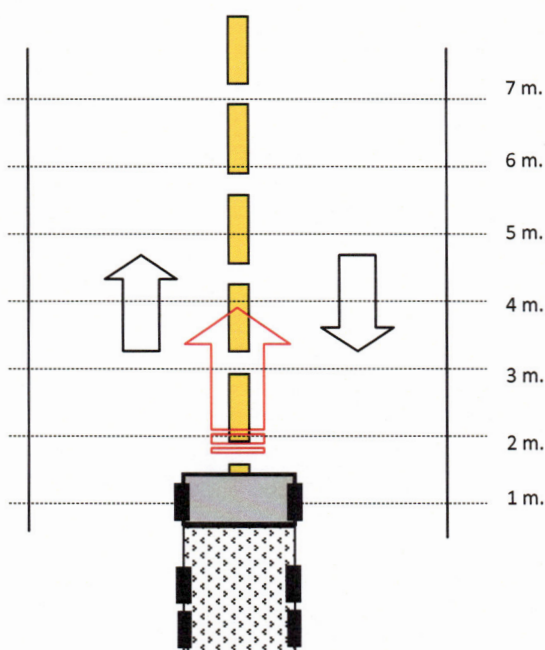
รูปที่ 3.19 การจัดวางน้ำหนักบรรทุกแบบพลวัต กรณีที่ 1 ในการทดสอบภาคสนาม

การทดสอบแบบพลวัติ กรณีที่ 2: รถ 1 คันวิ่งกลางระหว่างช่องทาง ความเร็วระดับช้า



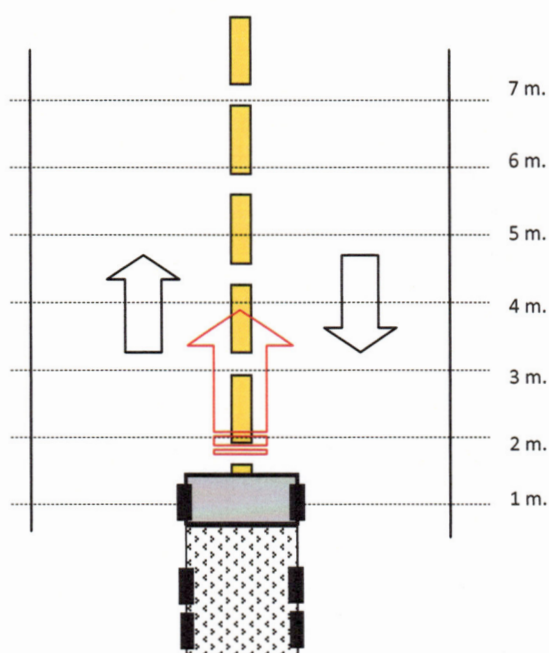
รูปที่ 3.20 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัติ กรณีที่ 2 ในการทดสอบภาคสนาม

การทดสอบแบบพลวัติ กรณีที่ 3: รถ 1 คันวิ่งกลางระหว่างช่องทาง ความเร็วระดับปานกลาง



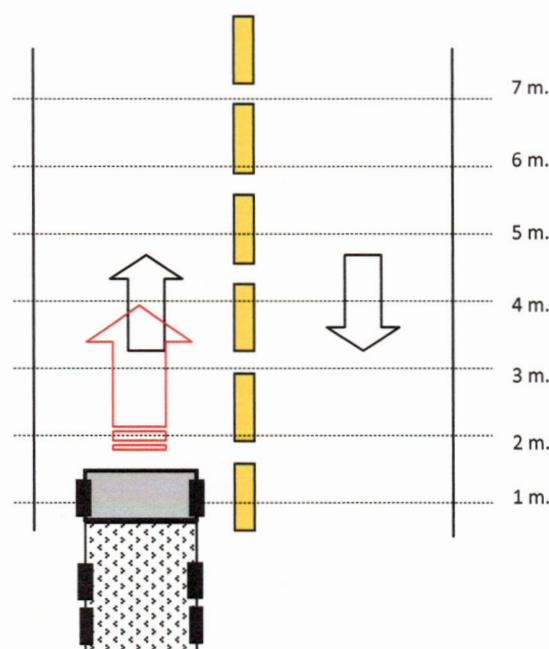
รูปที่ 3.21 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัติ กรณีที่ 3 ในการทดสอบภาคสนาม

การทดสอบแบบพลวัต กรณีที่ 4: รถ 1 คันวิ่งกลางระหว่างช่องทาง ความเร็วระดับเร็ว



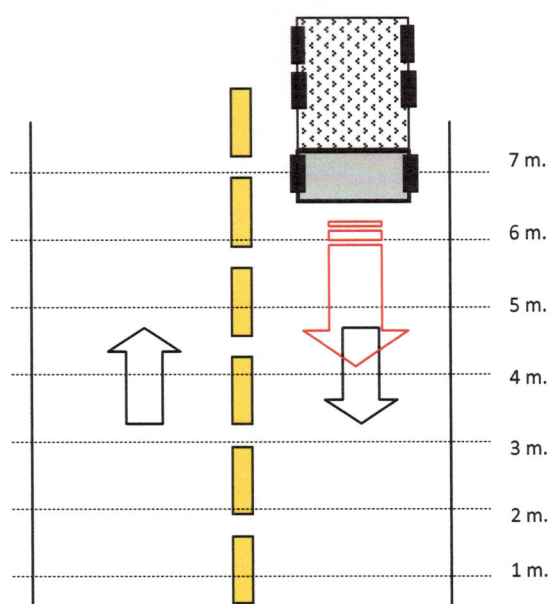
รูปที่ 3.22 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกทุกแบบพลวัต กรณีที่ 4 ในการทดสอบภาคสนาม

การทดสอบแบบพลวัต กรณีที่ 5: รถ 1 คันวิ่งไปตามช่องทางด้านซ้าย ความเร็วระดับช้า



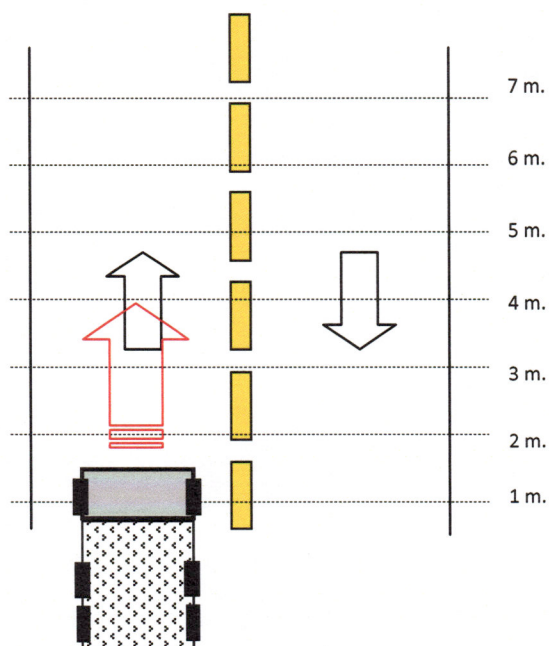
รูปที่ 3.23 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกทุกแบบพลวัต กรณีที่ 5 ในการทดสอบภาคสนาม

การทดสอบแบบพลวัต กรณีที่ 6: รถ 1 คันวิ่งกลับตามช่องทางด้านขวา ความเร็วระดับช้า



รูปที่ 3.24 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัต กรณีที่ 6 ในการทดสอบภาคสนาม

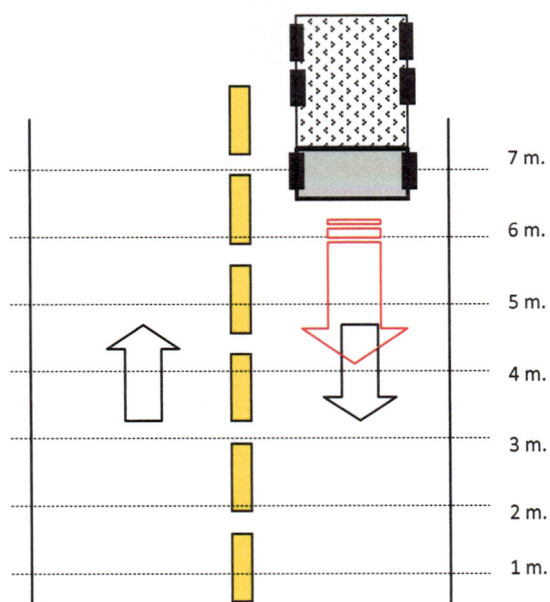
การทดสอบแบบพลวัต กรณีที่ 7: รถ 1 คันวิ่งไปตามช่องทางด้านซ้าย ความเร็วระดับปานกลาง



รูปที่ 3.25 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัต กรณีที่ 7 ในการทดสอบภาคสนาม

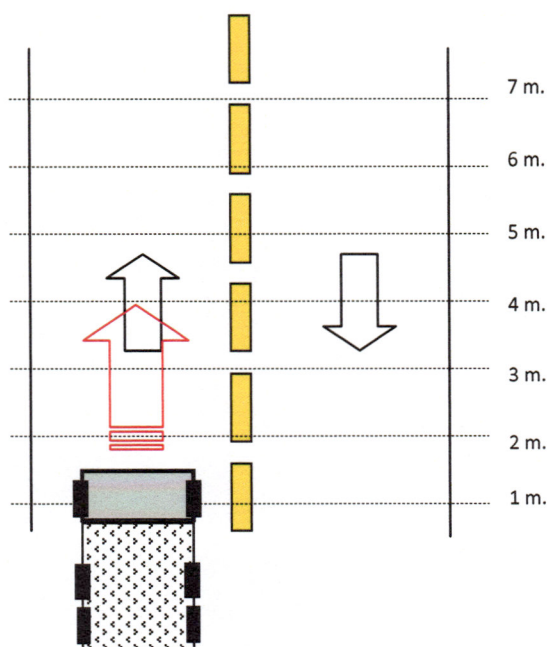


การทดสอบแบบพลวัติ กรณีที่ 8: รถ 1 คันวิ่งกลับตามช่องทางด้านขวา ความเร็วระดับปานกลาง



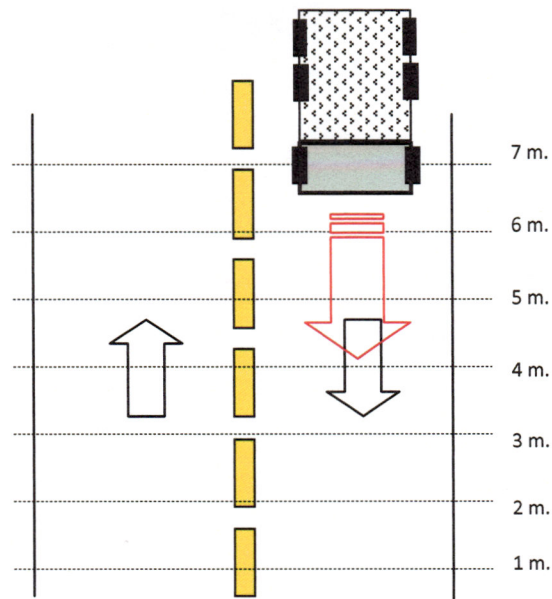
รูปที่ 3.26 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัติ กรณีที่ 8 ในการทดสอบภาคสนาม

การทดสอบแบบพลวัติ กรณีที่ 9: รถ 1 คันวิ่งไปตามช่องทางด้านซ้าย ความเร็วระดับเร็ว



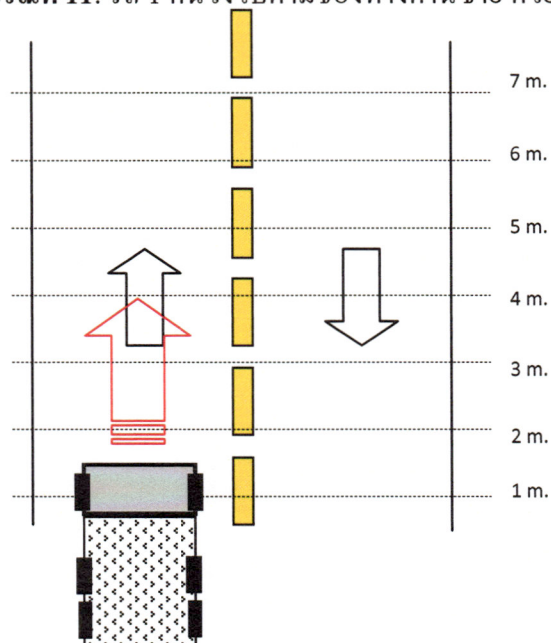
รูปที่ 3.27 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัติ กรณีที่ 9 ในการทดสอบภาคสนาม

การทดสอบแบบพลวัติ กรณีที่ 10: รถ 1 คันวิ่งกลับตามช่องทางด้านขวา ความเร็วระดับเร็ว



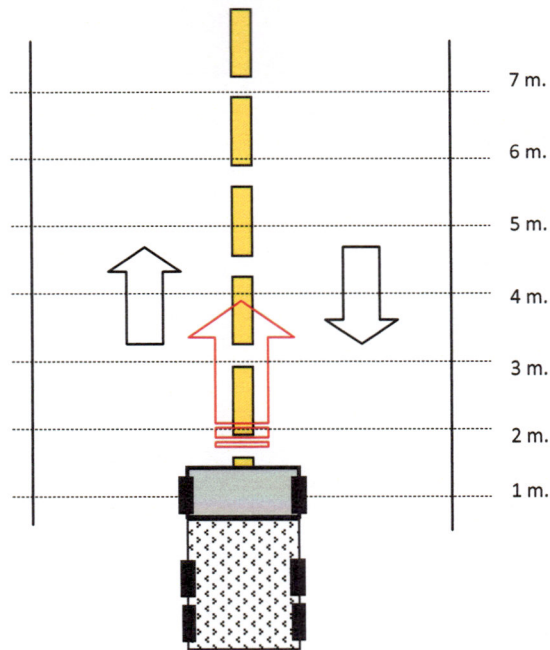
รูปที่ 3.28 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัติ กรณีที่ 10 ในการทดสอบภาคสนาม

การทดสอบแบบพลวัติ กรณีที่ 11: รถ 1 คันวิ่งไปตามช่องทางด้านซ้าย ด้วยความเร็วระดับช้ามาก



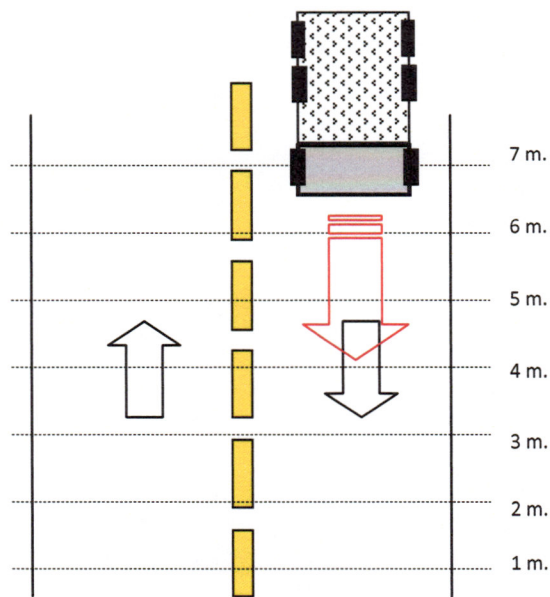
รูปที่ 3.29 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัติ กรณีที่ 11 ในการทดสอบภาคสนาม

การทดสอบแบบพลวัติ กรณีที่ 12: รถ 1 คันวิ่งกลางระหว่างช่องทาง ด้วยความเร็วระดับช้ามาก



รูปที่ 3.30 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัติ กรณีที่ 12 ในการทดสอบภาคสนาม

การทดสอบแบบพลวัติ กรณีที่ 13: รถ 1 คันวิ่งกลับตามช่องทางด้านขวา ความเร็วระดับช้ามาก



รูปที่ 3.31 การจัดวางน้ำหนักรถบรรทุกแบบพลวัติ กรณีที่ 13 ในการทดสอบภาคสนาม



### 3.5 การตรวจวัดภายใต้น้ำหนักบรรทุก

#### 3.5.1 การตรวจวัดภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบสถิตย์

- 1) กำหนดตำแหน่งหุ้ดรบรรทุกทดสอบ ณ ตำแหน่งต้องการและทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด
- 2) ทำการตั้งค่าเริ่มต้นของอุปกรณ์ พร้อมเริ่มทำการตรวจวัด
- 3) เริ่มทำการตรวจวัดโดยให้รถบรรทุกทดสอบทั้งสองคันขับในช่องทางที่กำหนด โดยแบ่งเป็นขาไปและขากลับ ในการหุ้ดรให้ตำแหน่งของกึ่งกลางเพลงหน้าอยู่ตรงตำแหน่งที่จะทำการทดสอบ ใช้การหุ้ดรประมาณ 15 - 20 วินาที จากนั้นเคลื่อนรถไปยังตำแหน่งต่อไปจนครบทุกตำแหน่ง ในระหว่างการทดสอบจะบันทึกสัญญาณต่าง ๆ ด้วยความถี่ 1,024 Hz (1 วินาทีเก็บข้อมูลได้ 1,024 ค่า)

#### 3.5.2 การตรวจวัดภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบพลวัต

- 1) กำหนดแนวการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกทดสอบตามช่องจราจร
- 2) กำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่แต่ละรอบ
- 3) ทำการตั้งค่าเริ่มต้นของอุปกรณ์ พร้อมเริ่มทำการตรวจวัด
- 4) เริ่มทำการตรวจวัดโดยให้รถบรรทุกทดสอบเคลื่อนที่ ทำการบันทึกค่าการสั่นไหวของโครงสร้าง การเก็บข้อมูลใช้ความถี่ 1,024 Hz และเริ่มบันทึกข้อมูลเมื่อรถทดสอบเริ่มเข้าสู่สะพานช่วงที่ทำการตรวจวัด และหยุดบันทึกข้อมูลเมื่อรถบรรทุกทดสอบเคลื่อนที่ออกจากสะพานช่วงที่ทำการตรวจวัด
- 5) ทำการตรวจวัดจนครบทุกความเร็วที่กำหนด

### 3.6 การปรับแก้สัญญาณข้อมูลที่ได้จากการทดสอบภาคสนาม

#### 3.6.1 การกรองสัญญาณ (Noise filtering)

เนื่องจากข้อมูลที่บันทึกได้จากการทดสอบภาคสนามนั้น เป็นสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีสัญญาณรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกปนอยู่ด้วย (Noise) ดังนั้นก่อนที่จะนำสัญญาณข้อมูลที่ได้มาพิจารณาในการวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องกรองสัญญาณรบกวน (Noise filtering) ออกเสียก่อน เพื่อให้ได้สัญญาณผลตอบสนองที่ต้องการนำไปใช้ในการวิเคราะห์ที่ชัดเจนมากขึ้น โดยมีขั้นตอนดังนี้

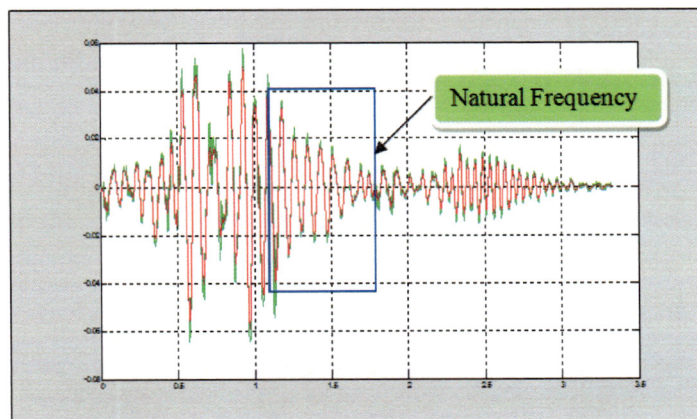
- 1) คัดสัญญาณส่วนที่ไม่ต้องการออกไปเหลือแค่สัญญาณช่วงที่รถเคลื่อนที่เข้า ออกเท่านั้น
- 2) สัญญาณในช่วงรถเข้าและออกจากสะพานอาจจะไม่เท่ากัน ซึ่งอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น ความไวต่ออุณหภูมิและความชื้นของอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด หรือพื้นผิวที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดอาจมีรอยแตกที่เล็กมาก ๆ ในเนื้อวัสดุหรือไม่เรียบพอ จึงต้องทำการปรับเทียบสัญญาณให้เริ่มต้น และจบที่จุดเดียวกัน โดยกำหนดให้ค่าเริ่มต้นและค่าสุดท้ายเป็นศูนย์โดยใช้หลักการปรับแก้แบบการประมาณข้อมูลในช่วงแบบเชิงเส้น (Linear interpolation)
- 3) นำสัญญาณที่ปรับแก้จากข้อที่ 2 มาปรับกรองสัญญาณรบกวนออก โดยใช้ตัวกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ธ (Butterworth digital filter) และวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average) โดยการกรองจะต้องสมมติช่วงข้อมูล (Span) ที่จะใช้ในการเฉลี่ยเพื่อกรองสัญญาณรบกวน ซึ่งค่าช่วงข้อมูลที่เลือกใช้จะต้องไม่ทำให้ลักษณะสัญญาณที่เป็นผลจากน้ำหนักบรรทุกและการสั่นสะเทือนของโครงสร้างสะพานเสียความละเอียดไป

### 3.6.2 การปรับลดขนาดข้อมูล (Data re-sampling)

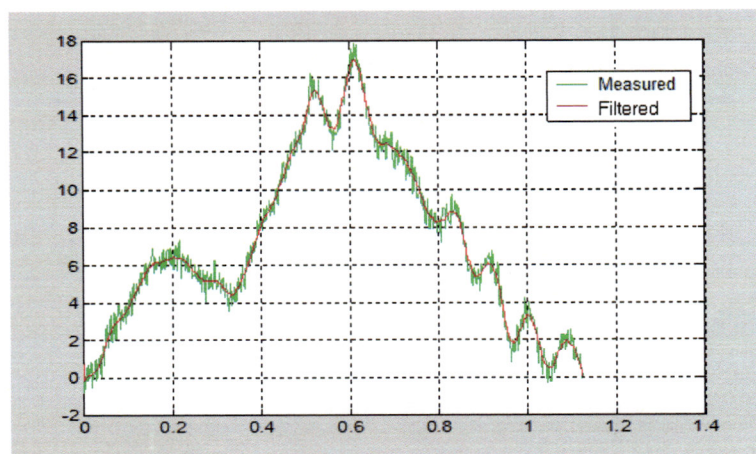
เนื่องจากใน 1 วินาทีอุปกรณ์สามารถเก็บข้อมูลสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ถึง 1,024 ค่า ทำให้ข้อมูลที่ได้มีขนาดใหญ่มากเกินความจำเป็น จึงจะต้องทำการลดขนาดข้อมูลที่เก็บได้จากภาคสนามให้มีขนาดเล็กลง (Re-sampling) โดยทำการสุ่มค่าให้ขนาดของข้อมูลเล็กลงทีละครั้งหนึ่ง เช่น จากข้อมูลที่เก็บได้ 1,024 ค่าจะสามารถลดขนาดลงเป็น 512, 256, 128 ข้อมูล เป็นต้น เพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีขนาดที่เหมาะสม ทำให้ไม่เปลืองเนื้อที่ในการจัดเก็บ และสามารถนำข้อมูลไปใช้งานในกรณีต่าง ๆ ได้สะดวกง่ายดายมากขึ้น

แต่ในการลดขนาดข้อมูล (Re-sampling) มีหลักเกณฑ์สำคัญคือ ขนาดของข้อมูลที่ปรับลดลงทีละครั้งหนึ่งนั้น จะต้องมีความไม่น้อยกว่า 10 เท่าของค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ทำการทดสอบ และจากการทดสอบหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานพบว่ามีความเท่ากับ 12.7 Hz ซึ่งจะได้ว่าค่าความถี่ 10 เท่าของค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 127 Hz ดังนั้นการลดขนาดข้อมูลของงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ความถี่ของข้อมูลที่ 256 Hz เพื่อไม่ให้มีจำนวนข้อมูลที่ละเอียดน้อยเกินไปและมากกว่า 127 Hz ซึ่งหมายความว่า การบันทึกข้อมูลที่ความถี่ 256 Hz จะสามารถลดขนาดข้อมูลที่จัดเก็บเพื่อประมวลผลได้ถึง 4 เท่าจากสัญญาณที่ตรวจวัด รูปที่ 3.32 ถึงรูปที่ 3.34 แสดงตัวอย่างสัญญาณที่ทำการกรองสัญญาณรบกวนและลดขนาดข้อมูลด้วยการ (Resampling) และรูปที่ 3.35 ถึง 3.36 เปรียบเทียบสัญญาณตรวจวัดที่ได้จากการ

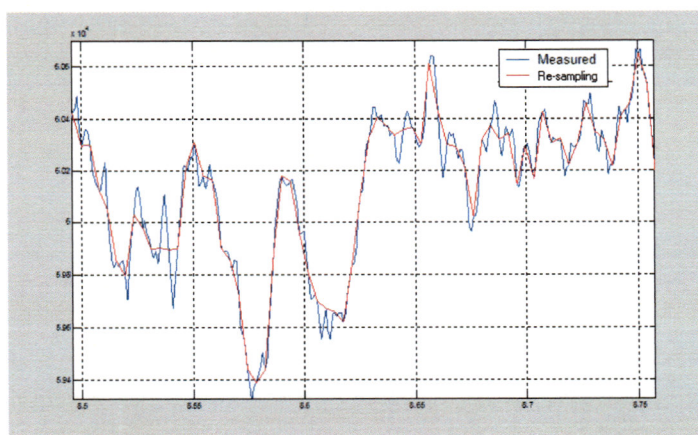
ทดสอบที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกที่แตกต่างกัน และผลของการเคลื่อนที่ที่รถบรรทุกในช่องจราจรที่แตกต่างกัน



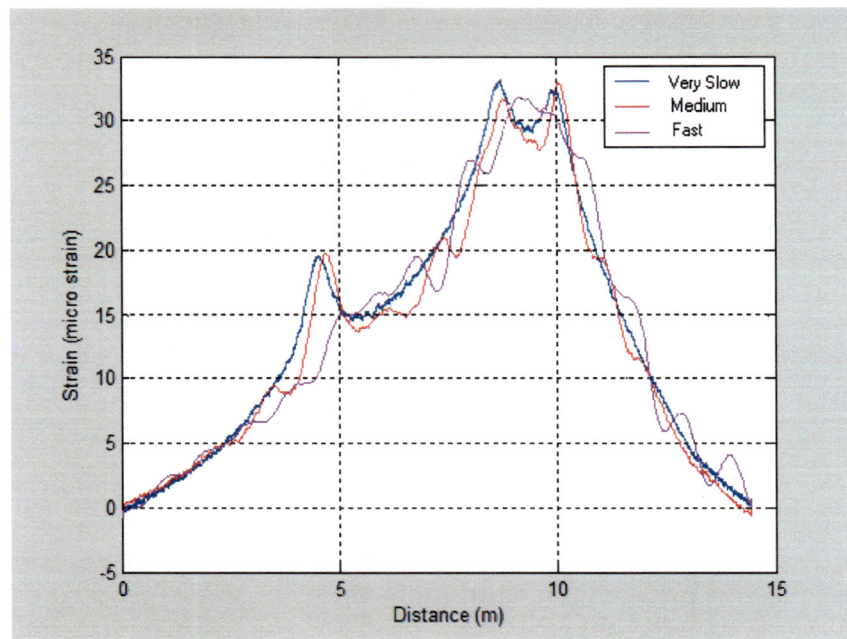
รูปที่ 3.32 ตัวอย่างของการสั่นไหวอิสระและช่วงที่พิจารณาความถี่ธรรมชาติของสะพาน



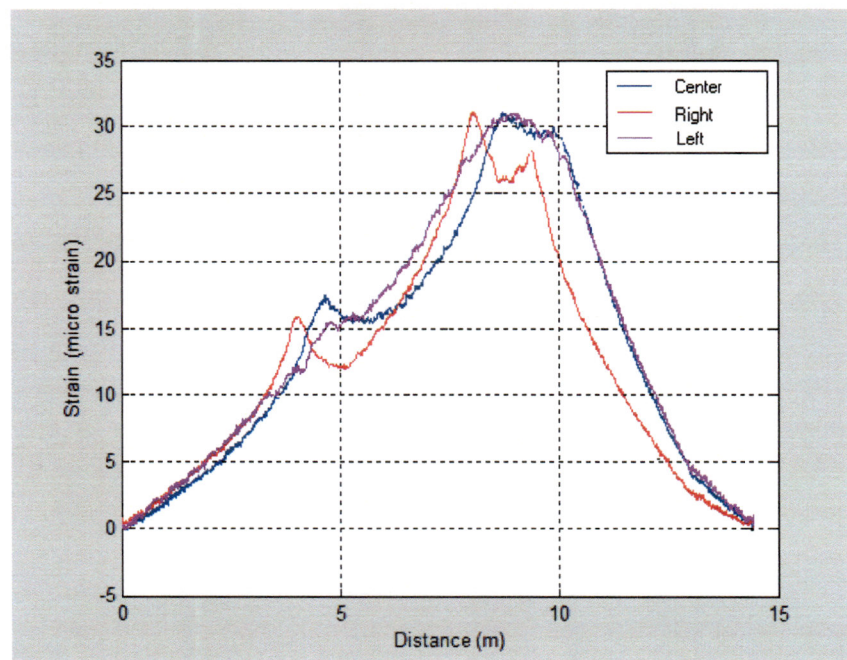
รูปที่ 3.33 ตัวอย่างของสัญญาณที่ได้หลังจากทำการกรองสัญญาณ



รูปที่ 3.34 ตัวอย่างของข้อมูลที่ได้หลังจากทำการปรับลดขนาดข้อมูล (Re-sampling)



รูปที่ 3.35 การเปรียบเทียบข้อมูลค่าความเครียดที่ตำแหน่งเดียวกันด้วยความเร็วต่าง ๆ



รูปที่ 3.36 การเปรียบเทียบข้อมูลค่าความเครียดที่ตำแหน่งเดียวกันของการขับรถต่างช่องทาง

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง

ในการวิเคราะห์หาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กจะทำการวิเคราะห์โดยค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก (Load Rating Factor) ตามมาตรฐาน AASHTO นั้น ต้องทำการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกโดยใช้น้ำหนักของรถบรรทุกแบบ HS20-44 ซึ่งไม่ได้มีการนำมาใช้ในประเทศไทย ดังนั้นเพื่อให้การวิเคราะห์ผลสามารถเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด จึงต้องทำการสร้างและเปรียบเทียบแบบจำลองโครงสร้างสะพานโดยโปรแกรมจำลองโครงสร้างทางคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้สะพานที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากสะพานจริงให้มากที่สุด แล้วจึงนำข้อมูลและน้ำหนักของรถ HS20-44 ตามมาตรฐาน มาวิ่งบนแบบจำลองสะพานทางคอมพิวเตอร์ที่เปรียบเทียบจากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หาค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก (Load Rating Factor) ต่อไป

#### 4.1 การสร้างแบบจำลองโครงสร้างสะพานทางคอมพิวเตอร์

หลังจากที่ได้ทำการเก็บข้อมูลและปรับปรุงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบภาคสนามแล้ว จะต้องทำการสร้างแบบจำลองโครงสร้างสะพานทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างในคอมพิวเตอร์ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ผลซึ่งในเบื้องต้นต้องทำการจำลองโครงสร้างสะพานตามโครงสร้างจริงก่อน แล้วจึงทำการเปรียบเทียบในภายหลัง

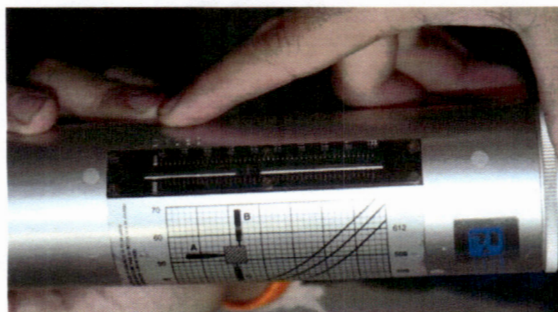
การจำลองค่าอิลาสติคโมดูลัส ( $E$ ) ของโครงสร้างสะพานคอนกรีต สามารถหาได้จากความสัมพันธ์กับค่ากำลังประลัยของคอนกรีต ( $f'_c$ ) ดังสมการที่ (4.1)

$$E_c = 15,100\sqrt{f'_c} \quad (ksc) \quad (4.1)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.1) จึงสามารถประมาณค่าอิลาสติคโมดูลัสของสะพานคอนกรีตได้โดยทำการตรวจวัดค่ากำลังประลัยของคอนกรีต ซึ่งได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive test) โดยใช้หลักการสะท้อนกลับของอุปกรณ์ชมิคแฮมเมอร์ (Schmidt hammer) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำค่ากำลังประลัยของแต่ละชิ้นส่วนของโครงสร้างสะพานที่ได้จากอุปกรณ์ชนิดนี้มาใช้

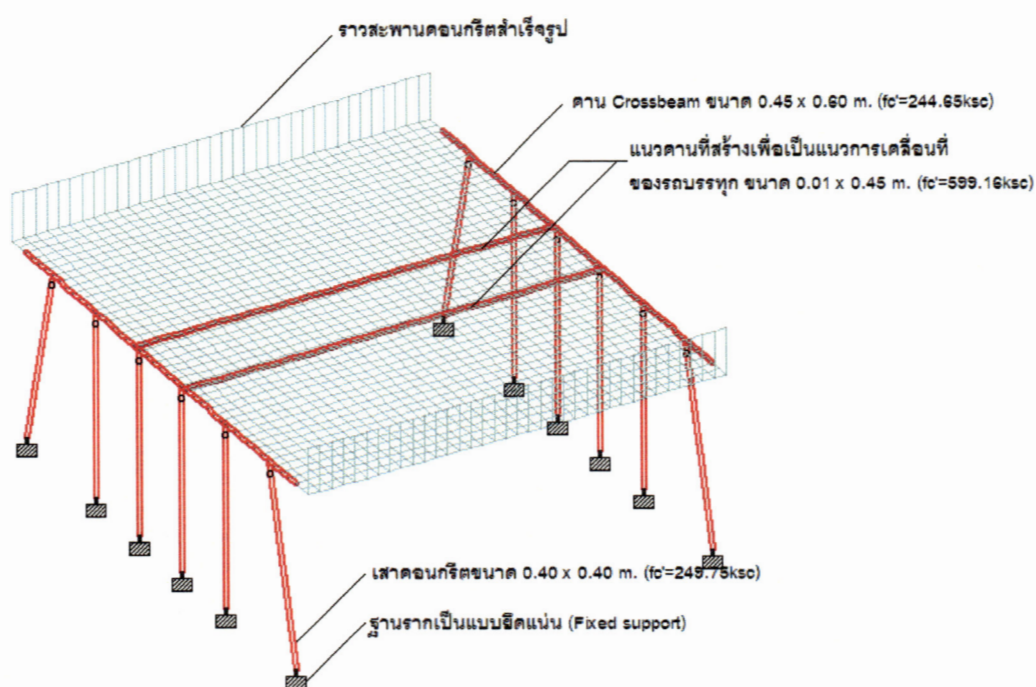


เป็นหลักในการอ้างอิงในการจำลองโครงสร้างสะพาน เนื่องจากไม่สามารถทำการทดสอบหาค่าลึง  
ประลัยแบบทำลายที่แท้จริงได้

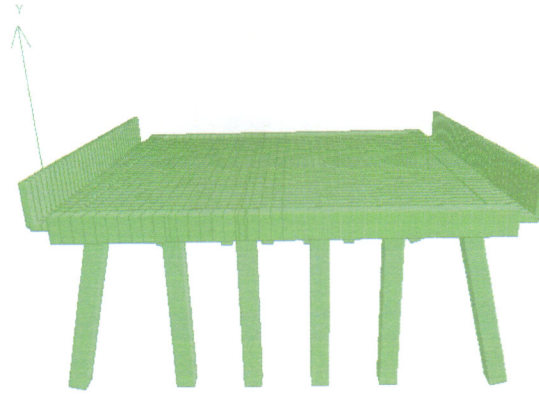


รูปที่ 4.1 อุปกรณ์ชนิดแฮมเมอร์และการอ่านค่าการสะท้อนกลับ (Rebound)

ในส่วนของการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกในแบบจำลอง จำเป็นต้องทำการสร้างคันขึ้นเล็ก  
ๆ มารองรับ โดยสร้างให้มีความกว้างน้อยมาก ๆ ในแบบจำลองนี้ใช้ขนาด  $0.01 \times 0.45$  เมตร และใช้ค่า  
กำลังประลัย  $599.16$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เช่นเดียวกับคุณสมบัติของแผ่นพื้นสะพาน และ  
ลักษณะจุดรองรับของสะพานเป็นแบบยึดแน่นดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 รอยต่อระหว่างเสาและคานทำการ  
ใส่จุดหมุนเข้าไปเพื่อลดโมเมนต์ลบที่จะเกิดขึ้นในแผ่นพื้นให้มีความน้อยที่สุด

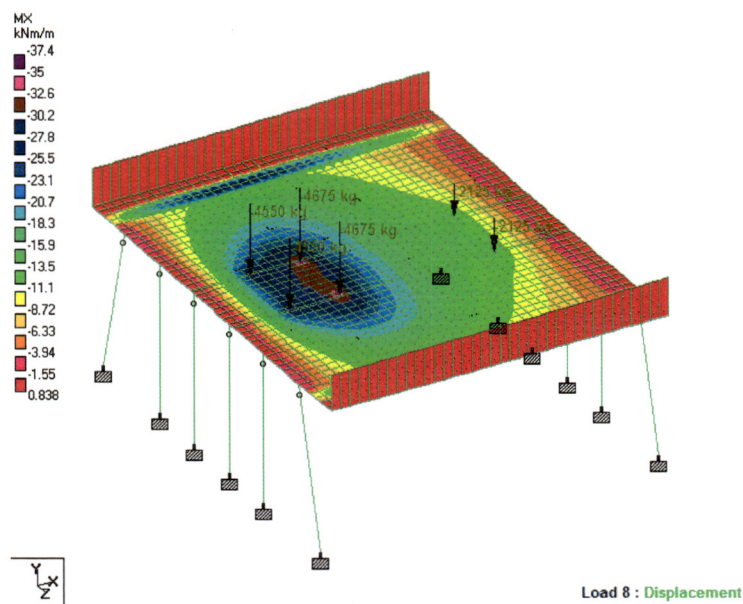


รูปที่ 4.2 แบบจำลองโครงสร้างสะพานและกำลังประลัยของชิ้นส่วนต่าง ๆ



รูปที่ 4.3 แบบจำลองโครงสร้างสะพานแบบสามมิติ

หลังจากนั้นจึงนำรถบรรทุกสิบล้อไทยที่ได้นำมาทดสอบภาคสนามมาใช้ในการเปรียบเทียบแบบจำลอง โดยนำค่าน้ำหนักเพลารถบรรทุกได้มาเคลื่อนบนแบบจำลองโครงสร้างสะพานตามลักษณะการทดสอบต่าง ๆ ทั้งแบบสถิตย์และพลวัต และอ่านค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้นและค่าการแอ่นตัวของแผ่นพื้น ณ ตำแหน่งเดียวกันกับที่ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดและอุปกรณ์ตรวจวัดค่าการแอ่นตัวทุกครั้งที่รถเคลื่อนที่ จนรถเคลื่อนที่ผ่านแบบจำลองโครงสร้างสะพานออกไป ดังรูปที่ 4.4 จากนั้นจึงนำค่าโมเมนต์ที่ได้ไปคำนวณเปรียบเทียบกับค่าโมเมนต์ที่ได้จากโครงสร้างสะพานจริง และทำการเปรียบเทียบเพื่อให้แบบจำลองโครงสร้างสะพานมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับโครงสร้างสะพานจริงให้มากที่สุด



รูปที่ 4.4 ลักษณะ โมเมนต์ดัดในแผ่นพื้นของแบบจำลองโครงสร้างสะพานเมื่อนำน้ำหนักเพลารถบรรทุกสิบล้อทดสอบเคลื่อนที่ผ่านแบบจำลอง

## 4.2 การเปรียบเทียบแบบจำลองโครงสร้างทางคอมพิวเตอร์

เมื่อได้ทำการอ่านค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้นและค่าการแอ่นตัวของแผ่นพื้นที่ตำแหน่งเดียวกันกับที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดบนโครงสร้างสะพานจริงแล้ว จึงนำค่าที่ได้ไปวาดกราฟเทียบกับข้อมูลที่เก็บได้จากสะพานจริง และทำการเปรียบเทียบเพื่อให้แบบจำลองมีความถูกต้องมากที่สุด โดยในการเปรียบเทียบจะแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ การปรับค่าฮิสตริกโมดูลัสของวัสดุ และการปรับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด

ค่าฮิสตริกโมดูลัสแปรผันตรงกับค่ากำลังประลัยของโครงสร้าง ซึ่งจะค่าฮิสตริกโมดูลัสที่มากจะทำให้โครงสร้างมีความแข็ง (Stiffness) มากขึ้น ทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของแบบจำลองโครงสร้างสะพานเปลี่ยนแปลงไปด้วย งานวิจัยนี้ได้ใช้การทดสอบแบบไม่ทำลายโดยชนิดแซมเมอร์เพื่อคำนวณค่ากำลังประลัยของแต่ละชิ้นส่วนของโครงสร้างไว้แล้ว จึงจะไม่ทำการปรับเทียบค่าฮิสตริกโมดูลัสในแบบจำลองโครงสร้างสะพาน แต่จะใช้การปรับเทียบโดยการปรับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยแทนเนื่องจากหน้าตัดอาจเกิดรอยร้าวขนาดเล็กและผลของเหล็กเสริมภายในหน้าตัดจึงทำให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของสะพานจริงมีค่าไม่เท่ากับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามทฤษฎี ซึ่งการปรับค่าโมเมนต์ความเฉื่อย จะทำการปรับโดยเพิ่มหรือลดความหนาของแผ่นพื้นในแบบจำลองโครงสร้างสะพาน เพื่อให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนสะเทินเพิ่มขึ้นหรือลดลง และเมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเพิ่มขึ้นหรือลดลงแล้ว ความแข็ง (Stiffness) ของแบบจำลองโครงสร้างสะพานก็จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงด้วย อันจะส่งผลให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสะพาน เช่น การแอ่นตัว, ค่าโมเมนต์ดัด และความถี่ธรรมชาติเปลี่ยนแปลงไป โดยปรับเทียบให้ค่าของคุณสมบัติพื้นฐานเชิงกลเหล่านี้ของแบบจำลองโครงสร้างสะพานในคอมพิวเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทดสอบได้มากที่สุด

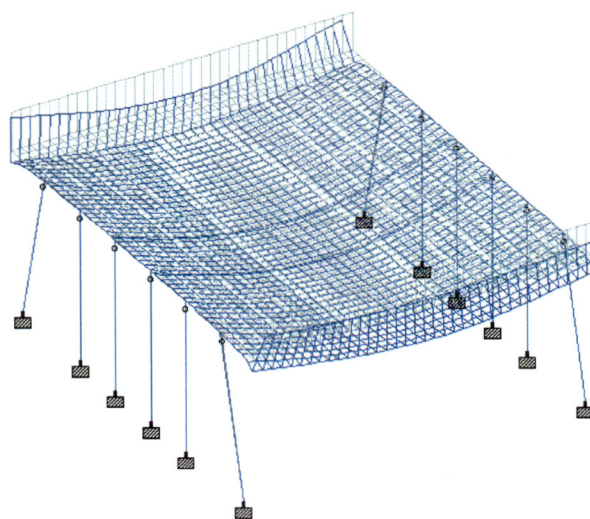
การปรับเทียบแบบจำลองโครงสร้างสะพานทางคอมพิวเตอร์เพื่อให้ผลสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบจริงยังสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 กรณีหลัก ๆ คือการปรับเทียบแบบจำลองโครงสร้างสะพานโดยอ้างอิงจากค่าที่ได้จากการตรวจวัดค่าการแอ่นตัว (Displacement transducer) และการปรับเทียบแบบจำลองโครงสร้างโดยอ้างอิงจากค่าที่ได้จากการตรวจวัดความเครียด (Strain gauge)

### 4.2.1 การปรับเทียบแบบจำลองโครงสร้างโดยอ้างอิงจากค่าที่ได้จากการตรวจวัดค่าการแอ่นตัว

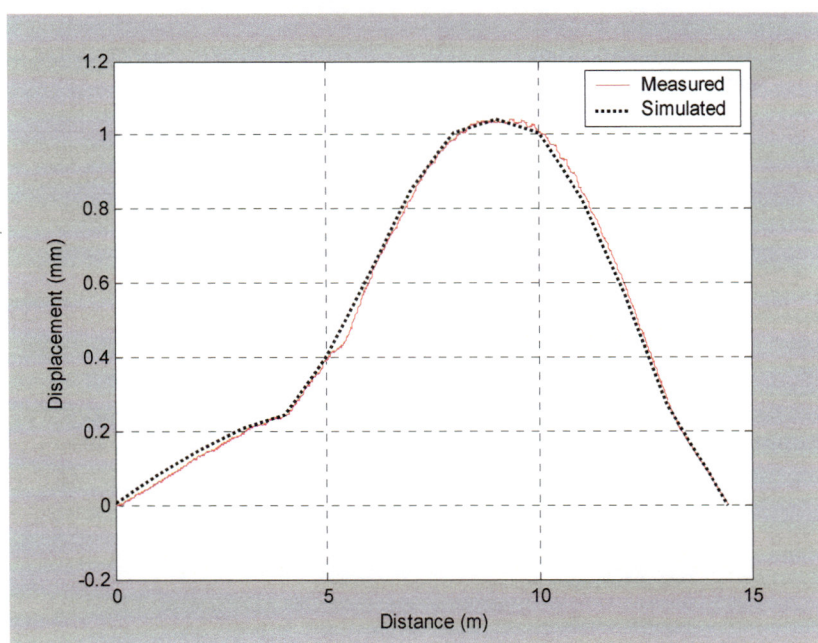
จากสมมติฐานเบื้องต้นที่กำหนดให้สะพานมีความเป็นเนื้อเดียวและต่อเนื่องกัน จึงสามารถที่จะกล่าวได้ว่าแบบจำลองทางโครงสร้างก็จะเป็นเนื้อเดียวกันและต่อเนื่องด้วย จึงสามารถที่จะสรุปได้ว่า การปรับเทียบแบบจำลองโครงสร้างโดยอ้างอิงค่าจากการตรวจวัดการแอ่นตัวจะสามารถ



เปรียบเทียบแบบจำลองได้ดีกว่า เนื่องจากค่าที่ได้เป็นค่าการแอ่นตัวซึ่งเป็นการแอ่นตัวของสะพานจริงทั้งระบบดังรูปที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.5 ลักษณะการแอ่นตัวของแบบจำลองโครงสร้างสะพานเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก

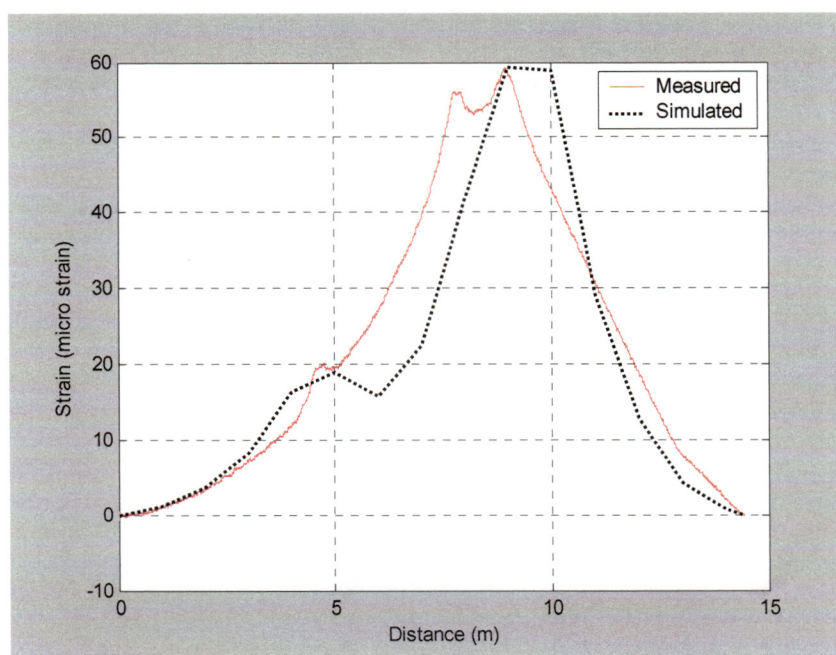


รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบสัญญาณค่าการแอ่นตัวของสะพานจริงกับแบบจำลองโครงสร้าง

#### 4.2.2 การเปรียบเทียบแบบจำลองโครงสร้างโดยอ้างอิงจากค่าที่ได้จากการตรวจวัดความเครียด

การเปรียบเทียบแบบจำลองโครงสร้างจากค่าที่ได้จากการตรวจวัดความเครียด จะมีโอกาสเกิดความผิดพลาดได้มากกว่า เนื่องจากค่าความเครียดในจุดที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดจะบ่งบอกถึงค่าการยืดหดตัว ณ จุดนั้นซึ่งเป็นพฤติกรรมเฉพาะที่นั้น ๆ (Local behavior) ซึ่งหากจุดที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

ความเครียดเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro-crack) หรือมีผิวที่ไม่ราบเรียบ ก็จะได้ค่าความเครียดที่ไม่ถูกต้องกับพฤติกรรมโดยรวม (Global behavior) ของโครงสร้างที่สัมพันธ์กับการโก่งตัวดั่งทฤษฎีคลาสสิก อีกทั้งอุปกรณ์ตรวจวัดก็ยังมีความอ่อนไหวกับอุณหภูมิและความชื้นอย่างมาก จึงอาจจะส่งผลให้ค่าการทดสอบผิดพลาดได้มากกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้จากการตรวจวัดความเครียดก็ยังมีค่าสำคัญในการเป็นแนวทางอ้างอิง เพื่อดูแนวโน้มและลักษณะของกราฟที่ได้หลังการเปรียบเทียบว่ามีความสอดคล้องกันหรือไม่ ดังรูปที่ 4.7

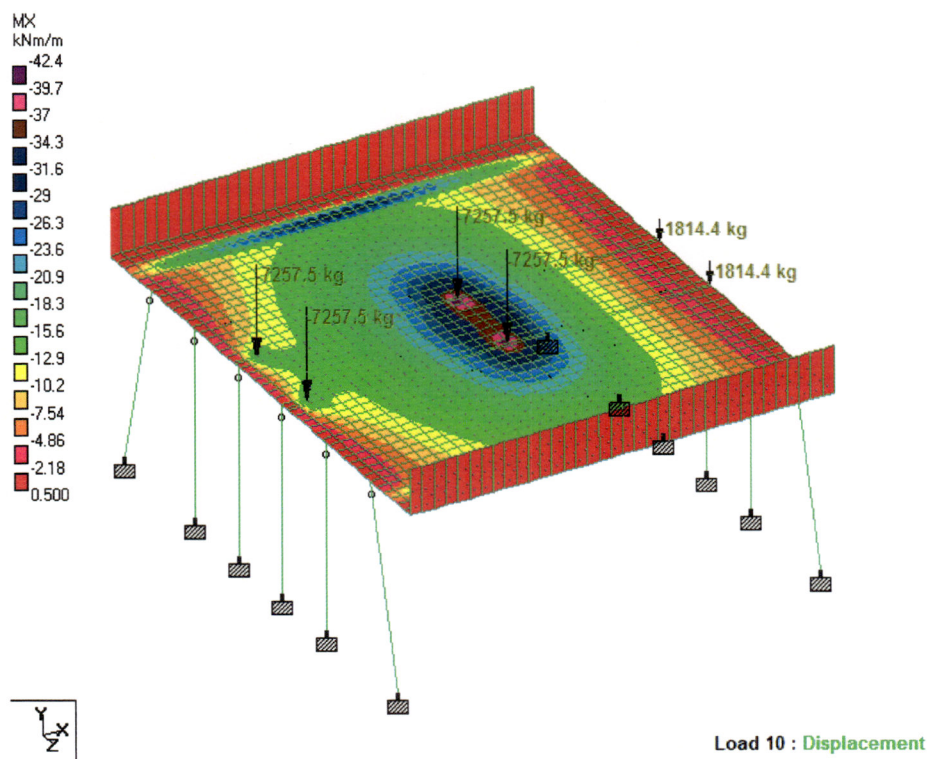


รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าสัญญาณความเครียดของสะพานจริงกับแบบจำลองโครงสร้าง

ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบแบบจำลองโครงสร้างสะพานและโครงสร้างสะพานจริงพบว่า การเปรียบเทียบแบบจำลองจากค่าความเครียดจะส่งผลให้ค่าโมเมนต์ความเค้นรอบแกนสะเทินมีค่าลดน้อยลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบโดยอ้างอิงจากค่าความเครียดสูงสุด ในขณะที่การเปรียบเทียบแบบจำลองโดยอ้างอิงจากค่าการแอ่นตัวจะมีค่าโมเมนต์ความเค้นรอบแกนสะเทินและค่าความถี่ธรรมชาติใกล้เคียงกับที่ตรวจวัดได้จากสะพานจริงมากกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้

#### 4.3 แรงภายในที่เกิดขึ้นภายใต้น้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุกมาตรฐาน (HS20-44)

หลังจากทำการเปรียบเทียบแบบจำลองทางโครงสร้างให้มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับโครงสร้างสะพานจริงแล้ว จึงนำน้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน ซึ่งก็คือรถบรรทุกแบบ HS20-44 ตามมาตรฐาน AASHTO มาเคลื่อนผ่านบนแบบจำลองโครงสร้างสะพานที่ได้ทำการเปรียบเทียบเป็นที่เรียบร้อยแล้วดังรูปที่ 4.8 และพิจารณาแรงภายในต่าง ๆ เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณวิเคราะห์หาค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก (Load Rating Factor)



รูปที่ 4.8 ลักษณะโมเมนต์คดในแผ่นพื้นของแบบจำลองโครงสร้างสะพานเมื่อนำน้ำหนักเพลา  
รถบรรทุก HS20-44 เคลื่อนที่ผ่านแบบจำลอง

จากตารางที่ 4.1 จะพบว่ามีผลการทดสอบภาคสนาม 2 ครั้ง เนื่องจากการทดสอบภาคสนามครั้งแรกได้ทำการวางแผนว่าจะตรวจวัดค่าการแอ่นตัวจากไดอัลเกจ (Dial Gauge) แต่ในการทดสอบไม่สามารถอ่านค่าได้อย่างรวดเร็วเพียงพอ จนเป็นสาเหตุให้เกิดการจราจรติดขัด จึงต้องวางแผนใหม่เพื่อทำการทดสอบภาคสนามครั้งที่ 2 โดยทำการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวจาก LVDT ที่สามารถตรวจวัดค่าการแอ่นตัวได้อย่างสะดวกและรวดเร็วมาใช้แทน ซึ่งได้ค่าเปรียบเทียบที่น่าเชื่อถือไว้ว่า โดยสังเกตว่าค่าสถิติเฟโนสในเทอมของค่าโมเมนต์ความเฉื่อย และค่าความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่เปรียบเทียบมีความใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจริง



ตารางที่ 4.1 ข้อมูลสรุปจากการเปรียบเทียบแบบจำลองโครงสร้างสะพานเทียบกับ โครงสร้างสะพานจริง

| Load Case            | ภาคสนามครั้งที่ 1               | ภาคสนามครั้งที่ 2               | Fit By | E                   | I                   | EI                     | EI (%) | f (Hz) | f (%) |
|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------|---------------------|---------------------|------------------------|--------|--------|-------|
| S1-Center            | รถ 1 คันขับกลางช่องทาง(จอด)     | -                               | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.014 \times 10^6$ | $5.329 \times 10^9$    | 1.90   | 5.935  | 46.74 |
| S2-Left              | รถ 1 คันขับซ้ายไป(จอด)          | -                               | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.007 \times 10^6$ | $2.644 \times 10^9$    | 0.94   | 5.343  | 42.08 |
| S3-Right             | รถ 1 คันขับขวา(จอด)             | -                               | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.011 \times 10^6$ | $4.218 \times 10^9$    | 1.50   | 5.734  | 45.16 |
| S4-2Left             | รถ 2 คันขับซ้ายไป(จอด)          | -                               | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.009 \times 10^6$ | $3.570 \times 10^9$    | 1.27   | 5.594  | 44.05 |
| S5-2Right            | รถ 2 คันขับขวา(จอด)             | -                               | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.019 \times 10^6$ | $7.094 \times 10^9$    | 2.52   | 6.177  | 48.65 |
| S6-2Center           | รถ 2 คันขับเต็ม 2 ช่องทาง(จอด)  | -                               | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.010 \times 10^6$ | $3.778 \times 10^9$    | 1.34   | 5.641  | 44.42 |
| D1-2Center(slow)     | รถ 1 คันขับเต็ม 2 ช่องทาง(ช้า)  | -                               | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.010 \times 10^6$ | $3.778 \times 10^9$    | 1.34   | 5.641  | 44.42 |
| D2-Center(slow)      | รถ 1 คันขับกลางช่องทาง(ช้า)     | -                               | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.014 \times 10^6$ | $5.329 \times 10^9$    | 1.90   | 5.935  | 46.74 |
| D3-Center(medium)    | รถ 1 คันขับกลางช่องทาง(ปานกลาง) | -                               | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.014 \times 10^6$ | $5.329 \times 10^9$    | 1.90   | 5.935  | 46.74 |
| D4-Center(fast)      | รถ 1 คันขับกลางช่องทาง(เร็ว)    | -                               | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.014 \times 10^6$ | $5.329 \times 10^9$    | 1.90   | 5.935  | 46.74 |
| D5-Left(slow)        | รถ 1 คันขับซ้ายไป(ช้า)          | -                               | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.011 \times 10^6$ | $4.105 \times 10^9$    | 1.46   | 5.711  | 44.98 |
| D6-Right(slow)       | รถ 1 คันขับขวา(ช้า)             | -                               | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.011 \times 10^6$ | $4.218 \times 10^9$    | 1.50   | 5.734  | 45.16 |
| D7-Left(medium)      | รถ 1 คันขับซ้ายไป(ปานกลาง)      | -                               | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.005 \times 10^6$ | $1.828 \times 10^9$    | 0.65   | 5.030  | 39.61 |
| D8-Right(medium)     | รถ 1 คันขับขวา(ปานกลาง)         | -                               | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.011 \times 10^6$ | $4.218 \times 10^9$    | 1.50   | 5.734  | 45.16 |
| D9-Left(fast)        | รถ 1 คันขับซ้ายไป(เร็ว)         | -                               | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.005 \times 10^6$ | $1.962 \times 10^9$    | 0.70   | 5.090  | 40.09 |
| D10-Right(fast)      | รถ 1 คันขับขวา(เร็ว)            | -                               | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.007 \times 10^6$ | $2.644 \times 10^9$    | 0.94   | 5.343  | 42.08 |
| S1-2nd-Left          | -                               | รถ 1 คันขับซ้ายไป(จอด)          | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.007 \times 10^6$ | $2.644 \times 10^9$    | 0.94   | 5.343  | 42.08 |
| S2-2nd-Center        | -                               | รถ 1 คันขับกลางช่องทาง(จอด)     | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.009 \times 10^6$ | $3.084 \times 10^9$    | 1.10   | 5.476  | 43.12 |
| D1-2nd-Left(slow)    | -                               | รถ 1 คันขับซ้ายไป(ช้า)          | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.008 \times 10^6$ | $3.084 \times 10^9$    | 1.10   | 5.472  | 43.09 |
| D2-2nd-Center(slow)  | -                               | รถ 1 คันขับกลางช่องทาง(ปานกลาง) | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.010 \times 10^6$ | $3.778 \times 10^9$    | 1.34   | 5.646  | 44.46 |
| D3-2nd-Left-(medium) | -                               | รถ 1 คันขับซ้ายไป(ปานกลาง)      | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.005 \times 10^6$ | $3.084 \times 10^9$    | 1.10   | 5.472  | 43.09 |
| D4-2nd-Left(fast)    | -                               | รถ 1 คันขับซ้ายไป(เร็ว)         | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.013 \times 10^6$ | $4.940 \times 10^9$    | 1.76   | 5.866  | 46.20 |
| D5-2nd-Right(slow)   | -                               | รถ 1 คันขับขวา(ช้า)             | Strain | $0.370 \times 10^6$ | $0.013 \times 10^6$ | $4.940 \times 10^9$    | 1.76   | 5.866  | 46.20 |
| S1-2nd-Left          | -                               | รถ 1 คันขับซ้ายไป(จอด)          | LVDT   | $0.370 \times 10^6$ | $0.554 \times 10^6$ | $0.205 \times 10^{12}$ | 72.90  | 10.448 | 82.28 |
| S2-2nd-Center        | -                               | รถ 1 คันขับกลางช่องทาง(จอด)     | LVDT   | $0.370 \times 10^6$ | $0.549 \times 10^6$ | $0.203 \times 10^{12}$ | 72.36  | 10.436 | 82.19 |
| D1-2nd-Left(slow)    | -                               | รถ 1 คันขับซ้ายไป(ช้า)          | LVDT   | $0.370 \times 10^6$ | $0.591 \times 10^6$ | $0.219 \times 10^{12}$ | 77.87  | 10.578 | 83.30 |
| D2-2nd-Center(slow)  | -                               | รถ 1 คันขับกลางช่องทาง(ปานกลาง) | LVDT   | $0.370 \times 10^6$ | $0.582 \times 10^6$ | $0.216 \times 10^{12}$ | 76.75  | 10.552 | 83.10 |
| D3-2nd-Left-(medium) | -                               | รถ 1 คันขับซ้ายไป(ปานกลาง)      | LVDT   | $0.370 \times 10^6$ | $0.561 \times 10^6$ | $0.203 \times 10^{12}$ | 73.99  | 10.477 | 82.51 |
| D4-2nd-Left(fast)    | -                               | รถ 1 คันขับซ้ายไป(เร็ว)         | LVDT   | $0.370 \times 10^6$ | $0.558 \times 10^6$ | $0.206 \times 10^{12}$ | 73.44  | 10.462 | 82.39 |
| D5-2nd-Right(slow)   | -                               | รถ 1 คันขับขวา(ช้า)             | LVDT   | $0.370 \times 10^6$ | $0.644 \times 10^6$ | $0.238 \times 10^{12}$ | 84.84  | 10.752 | 84.67 |

สำหรับค่าแรงภายในที่นำมาใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณวิเคราะห์หาค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก (Load Rating Factor) ของโครงสร้างสะพาน คือ โมเมนต์ในแผ่นพื้นและคาน, แรงเฉือนในแผ่นพื้นและคาน และหน่วยแรงตามแนวแกนในเสาตอม่อสะพาน ซึ่งแรงภายในต่าง ๆ ที่ได้จากแบบจำลองโครงสร้างสะพาน มีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณวิเคราะห์หาค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกโดยวิธี LFR (Load Factor Rating) และ LRFR (Load and Resistance Factor Rating) ตามมาตรฐาน AASHTOต่อไป

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลสรุปของแรงภายในหลังจากที่รถ HS20-44 เคลื่อนที่บนแบบจำลองโครงสร้างสะพานที่ทำการปรับเทียบแล้ว

| Load Case            | Fit By | Moment Max.<br>On Slab(Kg.m/m) | Shear Max.<br>On Slab(Kg/m) | Moment Max.<br>On Beam(Kg.m) | Shear Max.<br>On Beam(Kg) | Axial Force Max.<br>On Column(Kg) |
|----------------------|--------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| S1-Center            | Strain | 3211.52                        | 1594.50                     | 1486.95                      | 4193.54                   | 7693.09                           |
| S2-Left              | Strain | 3060.35                        | 1775.80                     | 2132.72                      | 4310.37                   | 7721.08                           |
| S3-Right             | Strain | 3157.08                        | 1653.97                     | 1692.46                      | 4235.38                   | 7707.39                           |
| S4-2Left             | Strain | 3120.69                        | 1697.82                     | 1845.77                      | 4263.45                   | 7714.37                           |
| S5-2Right            | Strain | 3282.98                        | 1522.84                     | 1253.72                      | 4138.38                   | 7667.68                           |
| S6-2Center           | Strain | 3132.82                        | 1682.71                     | 1793.07                      | 4254.08                   | 7712.28                           |
| D1-2Center(slow)     | Strain | 3132.82                        | 1682.71                     | 1793.07                      | 4254.08                   | 7712.28                           |
| D2-Center(slow)      | Strain | 3211.52                        | 1594.50                     | 1486.95                      | 4193.54                   | 7693.09                           |
| D3-Center(medium)    | Strain | 3211.52                        | 1594.50                     | 1486.95                      | 4193.54                   | 7693.09                           |
| D4-Center(fast)      | Strain | 3211.52                        | 1594.50                     | 1486.95                      | 4193.54                   | 7693.09                           |
| D5-Left(slow)        | Strain | 3018.55                        | 1834.68                     | 2358.00                      | 4343.18                   | 7721.08                           |
| D6-Right(slow)       | Strain | 3157.08                        | 1653.97                     | 1692.46                      | 4235.38                   | 7707.39                           |
| D7-Left(medium)      | Strain | 2995.01                        | 1869.45                     | 2495.82                      | 4361.83                   | 7721.04                           |
| D8-Right(medium)     | Strain | 3157.08                        | 1653.97                     | 1692.46                      | 4235.38                   | 7707.39                           |
| D9-Left(fast)        | Strain | 3006.73                        | 1852.16                     | 2426.10                      | 4352.52                   | 7721.63                           |
| D10-Right(fast)      | Strain | 3060.35                        | 1775.80                     | 2132.72                      | 4310.37                   | 7721.08                           |
| S1-2nd-Left          | Strain | 3060.35                        | 1775.80                     | 2132.72                      | 4310.37                   | 7721.08                           |
| S2-2nd-Center        | Strain | 3090.42                        | 1735.47                     | 1984.20                      | 4286.90                   | 7718.51                           |
| D1-2nd-Left(slow)    | Strain | 3090.42                        | 1735.47                     | 1984.20                      | 4286.90                   | 7718.51                           |
| D2-2nd-Center(slow)  | Strain | 3132.82                        | 1682.71                     | 1793.07                      | 4254.08                   | 7712.28                           |
| D3-2nd-Left-(medium) | Strain | 3090.42                        | 1735.47                     | 1984.20                      | 4286.90                   | 7718.51                           |
| D4-2nd-Left(fast)    | Strain | 3193.48                        | 1613.67                     | 1552.29                      | 4207.45                   | 7698.34                           |
| D5-2nd-Right(slow)   | Strain | 3193.48                        | 1613.67                     | 1552.29                      | 4207.45                   | 7698.34                           |
| S1-2nd-Left          | LVDT   | 4522.53                        | 982.20                      | 581.24                       | 3726.51                   | 6828.41                           |
| S2-2nd-Center        | LVDT   | 4525.28                        | 981.54                      | 580.33                       | 3726.80                   | 6825.66                           |
| D1-2nd-Left(slow)    | LVDT   | 4528.03                        | 980.86                      | 579.31                       | 3727.10                   | 6822.90                           |
| D2-2nd-Center(slow)  | LVDT   | 4530.68                        | 980.16                      | 578.39                       | 3727.39                   | 6820.15                           |
| D3-2nd-Left-(medium) | LVDT   | 4544.14                        | 976.45                      | 573.60                       | 3728.75                   | 6806.37                           |
| D4-2nd-Left(fast)    | LVDT   | 4549.44                        | 974.86                      | 571.76                       | 3729.26                   | 6800.86                           |
| D5-2nd-Right(slow)   | LVDT   | 4580.43                        | 970.55                      | 560.45                       | 3731.90                   | 6767.72                           |

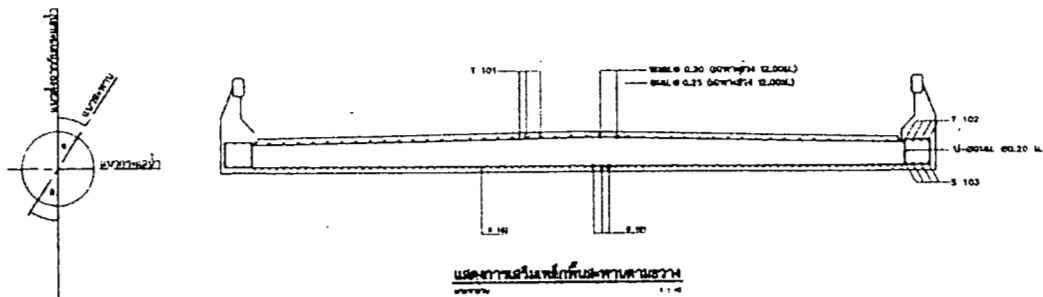
#### 4.4 การคำนวณวิเคราะห์หาค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพาน (Load Rating Factor)

เมื่อทำการเปรียบเทียบแบบจำลองโครงสร้างสะพาน และทราบข้อมูลของแรงภายในต่าง ๆ ที่ได้ภายหลังจากที่ใช้รถมาตรฐาน HS20-44 มาเคลื่อนที่ผ่านบนแบบจำลองโครงสร้างสะพานเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการคำนวณวิเคราะห์หาค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง โดยค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน สามารถแบ่งออกได้ 2 ระดับได้แก่

- **Inventory level** คือ ระดับที่โครงสร้างสะพานจะไม่เกิดความเสียหายจากน้ำหนักบรรทุก
- **Operating level** คือ ระดับที่โครงสร้างสะพานอาจเกิดความเสียหายได้บ้างจากน้ำหนักบรรทุก

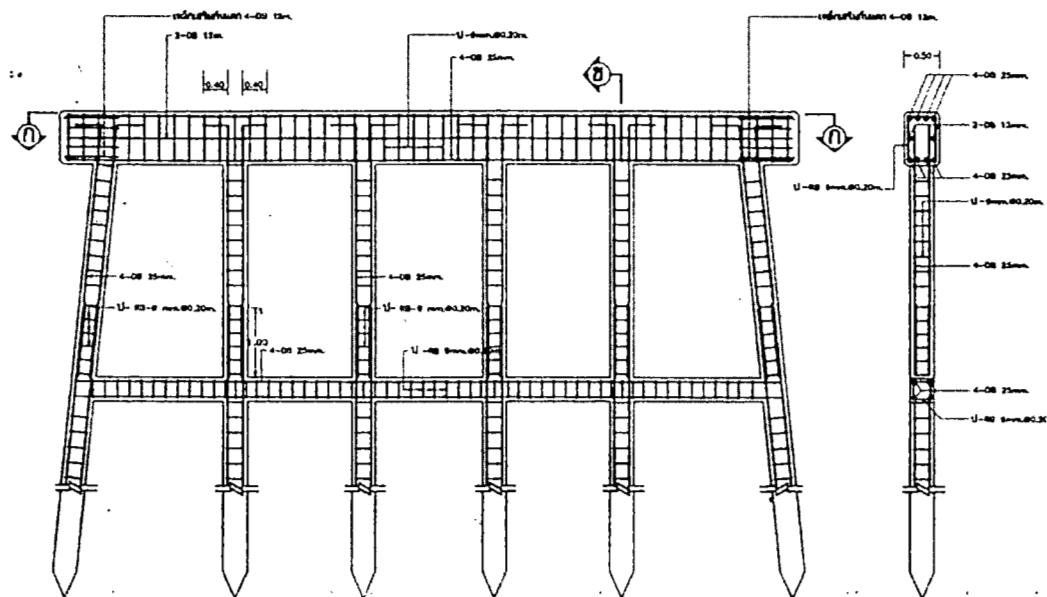
โดยการคำนวณวิเคราะห์หาค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจะทำการวิเคราะห์สะพานออกเป็นชิ้นส่วนหลัก คือ แผ่นพื้นคอนกรีตของโครงสร้างสะพาน (Deck slab), โครงสร้างคานคอนกรีต (Cross beam) และโครงสร้างเสาตอม่อคอนกรีตของสะพาน (Pier) โดยจะทำการวิเคราะห์โดยโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้นสะพานและโครงสร้างคาน ส่วนโครงสร้างเสาตอม่อสะพานจะวิเคราะห์โดยค่าน้ำหนักแรงอัดตามแนวแกน โดยมีสมการพื้นฐานโดยวิธี (Load Factor method, LF) ดังสมการที่ (2.13) และกำลังต้านทานแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสามารถหาได้จากคุณสมบัติทางกายภาพของโครงสร้าง

รูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 แสดงรายละเอียดการเสริมเหล็กในชิ้นส่วนพื้น คาน และเสาตอม่อ ของสะพานคอนกรีตประเภทที่โครงสร้างส่วนพื้นเป็นชิ้นส่วนแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง ตามแบบก่อสร้างมาตรฐาน มฐ-4-101/1 ของสำนักวิศวกรรมทางหลวงชนบท



| ตารางแสดงขนาดและระยะของเหล็กเสริมสะพาน |                      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ชนิด                                   | ความยาวสะพาน (เมตร)  | 5.00  | 6.00  | 7.00  | 8.00  | 9.00  | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 |
| S 101                                  | ความยาวของเหล็กเสริม | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน |
|                                        | ระยะห่าง             | 0.18  | 0.15  | 0.15  | 0.14  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  |
| S 102                                  | ความยาวของเหล็กเสริม | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน |
|                                        | ระยะห่าง             | 0.18  | 0.15  | 0.15  | 0.14  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  |
| T 101                                  | ความยาวของเหล็กเสริม | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน |
|                                        | ระยะห่าง             | 0.18  | 0.15  | 0.15  | 0.14  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  |
| T 102                                  | ความยาวของเหล็กเสริม | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน |
|                                        | ระยะห่าง             | 0.18  | 0.15  | 0.15  | 0.14  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  |
| S 103                                  | ความยาวของเหล็กเสริม | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน | จำนวน |
|                                        | ระยะห่าง             | 0.18  | 0.15  | 0.15  | 0.14  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  |
| ความหนาพื้นสะพาน (มม.)                 |                      | 0.35  | 0.30  | 0.40  | 0.45  | 0.50  | 0.50  | 0.50  | 0.50  | 0.50  | 0.50  | 0.50  | 0.50  |
| ระยะห่างของเหล็กเสริม                  |                      | 0.18  | 0.15  | 0.15  | 0.14  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  |
| รวมทางของสะพาน                         |                      | 1.250 | 1.50  | 1.750 | 2.00  | 2.250 | 2.50  | 2.750 | 3.00  | 3.250 | 3.50  | 3.750 | 4.00  |

รูปที่ 4.9 การเสริมเหล็กตามแบบมาตรฐาน มฐ-4-101/1 ของสำนักวิศวกรรมทางหลวงชนบท



รูปที่ 4.10 การเสริมเหล็กตามแบบมาตรฐาน มฐ-4-103 ของสำนักวิศวกรรมทางหลวงชนบท

ผลการวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสะพานและผลการคำนวณค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานจะแสดงโดยจำแนกตามการเปรียบเทียบแบบจำลองโดยค่าความเครียด และจำแนกโดยการเปรียบเทียบโดยค่าการแอ่นตัวอีกด้วย



ตัวอย่างการคำนวณวิเคราะห์ค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้างสะพานสามารถคำนวณได้จากตารางสรุปผลค่าแรงภายในของแต่ละประเภทของโครงสร้างสะพาน เช่น

ตารางที่ 4.3 ค่าหน่วยแรงและค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของแผ่นพื้นสะพานของกรณีการทดสอบแบบสถิตย์โดยวางน้ำหนักบรรทุกในแนวกึ่งกลางสะพาน

| Load Case | DECK SLAB |            |      |         |            |          |           |                         |                         |
|-----------|-----------|------------|------|---------|------------|----------|-----------|-------------------------|-------------------------|
|           | Fit by    |            | DL   | HS20-44 | I (Impact) | Ultimate | Capacity* | RF <sub>INVENTORY</sub> | RF <sub>OPERATION</sub> |
| S1-Center | Strain    | M* (T.m/m) | 6.57 | 3.21    | 0.3        | 19.05    | 51.32     | 7.89                    | 4.72                    |
|           |           | V (T/m)    | 0.55 | 1.59    | 0.3        | 4.52     | 33.44     | 18.83                   | 11.28                   |

\*คำนวณจากแบบมาตรฐาน มฐ-4-101/1 ของสำนักวิศวกรรมทางหลวงชนบท

\*\*การวิเคราะห์ค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกพิจารณาค่าโมเมนต์บวกเท่านั้น

$$\begin{aligned}
 \text{โมเมนต์คัต} \quad RF_{\text{OPERATION}} &= \frac{51.32 - 1.3(6.57)}{1.3(3.21)(1.3)} = 7.89 & \text{แรงเฉือน} \quad RF_{\text{OPERATION}} &= \frac{33.44 - 1.3(0.55)}{1.3(1.59)(1.3)} = 12.18 \\
 RF_{\text{INVENTORY}} &= \frac{51.32 - 1.3(6.57)}{2.17(3.21)(1.3)} = 4.72 & RF_{\text{INVENTORY}} &= \frac{33.44 - 1.3(0.55)}{2.17(1.59)(1.3)} = 7.30
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.4 ค่าหน่วยแรงและค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานตามแนวขวางของสะพานของกรณีการทดสอบแบบสถิตย์โดยวางน้ำหนักบรรทุกในแนวกึ่งกลางสะพาน

| Load Case | CROSS BEAM |          |      |         |            |          |           |                         |                         |
|-----------|------------|----------|------|---------|------------|----------|-----------|-------------------------|-------------------------|
|           | Fit by     |          | DL   | HS20-44 | I (Impact) | Ultimate | Capacity* | RF <sub>INVENTORY</sub> | RF <sub>OPERATION</sub> |
| S1-Center | Strain     | M* (T.m) | 3.56 | 1.49    | 0.3        | 9.77     | 59.47     | 21.78                   | 13.05                   |
|           |            | M (T.m)  | 3.53 | 0.71    | 0.3        | 7.99     | -59.47    | 45.74                   | 27.40                   |
|           |            | V (T)    | 8.49 | 4.19    | 0.3        | 24.71    | 28.06     | 6.84                    | 4.10                    |

\*คำนวณจากแบบมาตรฐาน มฐ-4-103 ของสำนักวิศวกรรมทางหลวงชนบท

$$\begin{array}{ll}
 \text{โมเมนต์คัต} & \text{แรงเฉือน} \\
 RF_{OPERATION} = \frac{59.47 - 1.3(3.56)}{1.3(1.49)(1.3)} = 21.78 & RF_{OPERATION} = \frac{28.06 - 1.3(8.49)}{1.3(4.19)(1.3)} = 2.40 \\
 RF_{INVENTORY} = \frac{59.47 - 1.3(3.56)}{2.17(1.49)(1.3)} = 13.05 & RF_{INVENTORY} = \frac{28.06 - 1.3(8.49)}{2.17(4.19)(1.3)} = 1.44
 \end{array}$$

ตารางที่ 4.5 ค่าหน่วยแรงและค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาต่อม่อของสะพาน  
กรณีการทดสอบแบบสถิตย์โดยวางน้ำหนักบรรทุกในแนวกึ่งกลางสะพาน

| Load Case | PIER   |           |       |         |            |          |           |                         |                         |
|-----------|--------|-----------|-------|---------|------------|----------|-----------|-------------------------|-------------------------|
|           | Fit by |           | DL    | HS20-44 | I (Impact) | Ultimate | Capacity* | RF <sub>INVENTORY</sub> | RF <sub>OPERATION</sub> |
| S1-Center | Strain | Axial (T) | 13.81 | 7.69    | 0.3        | 42.13    | 387.20    | 28.41                   | 17.02                   |

\*คำนวณจากแบบมาตรฐาน มฐ-4-103 ของสำนักวิศวกรรมทางหลวงชนบท

#### แรงอัดตามแนวแกน

$$RF_{OPERATION} = \frac{387.20 - 1.3(13.81)}{1.3(7.69)(1.3)} = 28.41 \quad RF_{INVENTORY} = \frac{387.20 - 1.3(13.81)}{2.17(7.69)(1.3)} = 17.02$$

ในส่วนของการคำนวณวิเคราะห์ค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักของสะพาน  
ทั้งหมด สามารถรายงานได้ตามลักษณะการให้น้ำหนักบรรทุก และประเภทของโครงสร้างสะพาน ดัง  
แสดงในตารางที่ 4.6 ถึงตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.6 ค่าหน่วยแรงและค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของแผ่นพื้นสะพาน

| Load Case         | DECK SLAB |            |      |         |            |          |           | LFR Method              |                         | LRFR Method             |                         | Korean Standard |
|-------------------|-----------|------------|------|---------|------------|----------|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
|                   | Fit by    |            | DL   | HS20-44 | I (Impact) | Ultimate | Capacity* | RF <sub>INVENTORY</sub> | RF <sub>OPERATION</sub> | RF <sub>INVENTORY</sub> | RF <sub>OPERATING</sub> | RF              |
| S1-Center         | Strain    | M* (T.m/m) | 6.57 | 3.21    | 0.3        | 19.05    | 51.32     | 4.72                    | 7.89                    | 4.77                    | 6.19                    | 9.14            |
|                   |           | V (T/m)    | 0.55 | 1.59    | 0.3        | 4.52     | 33.44     | 11.28                   | 18.83                   | 7.11                    | 9.22                    | 14.38           |
| S2-Left           | Strain    | M* (T.m/m) | 5.61 | 3.06    | 0.3        | 16.97    | 51.32     | 5.10                    | 8.51                    | 5.18                    | 6.71                    | 9.91            |
|                   |           | V (T/m)    | 0.63 | 1.78    | 0.3        | 5.08     | 33.44     | 10.06                   | 16.79                   | 6.33                    | 8.20                    | 12.80           |
| S3-Right          | Strain    | M* (T.m/m) | 6.25 | 3.16    | 0.3        | 18.36    | 51.32     | 4.85                    | 8.09                    | 4.90                    | 6.36                    | 9.39            |
|                   |           | V (T/m)    | 0.58 | 1.67    | 0.3        | 4.75     | 33.44     | 10.73                   | 17.92                   | 6.76                    | 8.76                    | 13.67           |
| S4-2Left          | Strain    | M* (T.m/m) | 6.03 | 3.12    | 0.3        | 17.87    | 51.32     | 4.94                    | 8.25                    | 5.00                    | 6.49                    | 9.39            |
|                   |           | V (T/m)    | 0.60 | 1.70    | 0.3        | 4.85     | 33.44     | 10.54                   | 17.59                   | 6.63                    | 8.60                    | 13.42           |
| S5-2Right         | Strain    | M* (T.m/m) | 6.94 | 3.28    | 0.3        | 19.88    | 51.32     | 4.57                    | 7.63                    | 4.61                    | 5.98                    | 8.84            |
|                   |           | V (T/m)    | 0.51 | 1.52    | 0.3        | 4.29     | 33.44     | 11.81                   | 19.72                   | 7.45                    | 9.66                    | 15.06           |
| S6-2Center        | Strain    | M* (T.m/m) | 6.10 | 3.13    | 0.3        | 18.02    | 51.32     | 4.91                    | 8.20                    | 4.98                    | 6.45                    | 9.53            |
|                   |           | V (T/m)    | 0.60 | 1.68    | 0.3        | 4.80     | 33.44     | 10.66                   | 17.80                   | 6.71                    | 8.70                    | 13.58           |
| D1-2Center(Slow)  | Strain    | M* (T.m/m) | 6.10 | 3.13    | 0.3        | 18.02    | 51.32     | 4.91                    | 8.25                    | 4.98                    | 6.45                    | 9.39            |
|                   |           | V (T/m)    | 0.60 | 1.68    | 0.3        | 4.80     | 33.44     | 10.66                   | 17.80                   | 6.71                    | 8.70                    | 13.58           |
| D2-Center(Slow)   | Strain    | M* (T.m/m) | 6.57 | 3.21    | 0.3        | 19.05    | 51.32     | 4.72                    | 7.89                    | 4.77                    | 6.19                    | 9.14            |
|                   |           | V (T/m)    | 0.55 | 1.59    | 0.3        | 4.51     | 33.44     | 11.28                   | 18.83                   | 7.11                    | 9.22                    | 14.38           |
| D3-Center(Medium) | Strain    | M* (T.m/m) | 6.57 | 3.21    | 0.3        | 19.05    | 51.32     | 4.72                    | 7.89                    | 4.77                    | 6.19                    | 9.14            |
|                   |           | V (T/m)    | 0.55 | 1.59    | 0.3        | 4.51     | 33.44     | 11.28                   | 18.83                   | 7.11                    | 9.22                    | 14.38           |
| D4-Center(Fast)   | Strain    | M* (T.m/m) | 6.57 | 3.21    | 0.3        | 19.05    | 51.32     | 4.72                    | 7.89                    | 4.77                    | 6.19                    | 9.14            |
|                   |           | V (T/m)    | 0.55 | 1.59    | 0.3        | 4.51     | 33.44     | 11.28                   | 18.83                   | 7.11                    | 9.22                    | 14.38           |
| D5-Left(Slow)     | Strain    | M* (T.m/m) | 5.29 | 3.02    | 0.3        | 16.30    | 51.32     | 5.22                    | 8.71                    | 5.30                    | 6.87                    | 10.14           |
|                   |           | V (T/m)    | 0.65 | 1.87    | 0.3        | 5.32     | 33.44     | 9.57                    | 15.97                   | 6.02                    | 7.80                    | 12.17           |

ตารางที่ 4.6 ค่าหน่วยแรงและค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของแผ่นพื้นสะพาน (ต่อ)

| Load Case           | Fit by | DECK SLAB  |      |         |            |          |           | LFR Method              |                         | LRFR Method             |                         | Korean Standard |
|---------------------|--------|------------|------|---------|------------|----------|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
|                     |        |            | DL   | HS20-44 | I (Impact) | Ultimate | Capacity* | RF <sub>INVENTORY</sub> | RF <sub>OPERATION</sub> | RF <sub>INVENTORY</sub> | RF <sub>OPERATING</sub> | RF              |
| D6-Right(Slow)      | Strain | M* (T.m/m) | 6.25 | 3.16    | 0.3        | 18.36    | 51.32     | 4.85                    | 8.09                    | 4.90                    | 6.36                    | 9.39            |
|                     |        | V (T/m)    | 0.58 | 1.65    | 0.3        | 4.70     | 33.44     | 10.86                   | 18.13                   | 6.84                    | 8.87                    | 13.84           |
| D7-Left(Medium)     | Strain | M* (T.m/m) | 5.09 | 3.00    | 0.3        | 15.89    | 51.32     | 5.28                    | 8.82                    | 5.37                    | 6.96                    | 10.28           |
|                     |        | V (T/m)    | 0.66 | 1.87    | 0.3        | 5.33     | 33.44     | 9.57                    | 15.97                   | 6.01                    | 7.80                    | 12.16           |
| D8-Right(Medium)    | Strain | M* (T.m/m) | 6.25 | 3.16    | 0.3        | 18.36    | 51.32     | 4.85                    | 8.09                    | 4.90                    | 6.36                    | 9.39            |
|                     |        | V (T/m)    | 0.58 | 1.65    | 0.3        | 4.70     | 33.44     | 10.86                   | 18.13                   | 6.84                    | 8.87                    | 13.84           |
| D9-Left(Fast)       | Strain | M* (T.m/m) | 5.19 | 3.01    | 0.3        | 16.10    | 51.32     | 5.25                    | 8.76                    | 5.34                    | 6.92                    | 10.21           |
|                     |        | V (T/m)    | 0.66 | 1.85    | 0.3        | 5.29     | 33.44     | 9.67                    | 16.14                   | 6.08                    | 7.88                    | 12.30           |
| D10-Right(Fast)     | Strain | M* (T.m/m) | 5.61 | 3.06    | 0.3        | 16.97    | 51.32     | 5.10                    | 8.51                    | 5.18                    | 6.71                    | 9.91            |
|                     |        | V (T/m)    | 0.63 | 1.78    | 0.3        | 5.08     | 33.44     | 10.06                   | 16.79                   | 6.33                    | 8.20                    | 12.80           |
| S1-2nd-Left         | Strain | M* (T.m/m) | 5.61 | 3.06    | 0.3        | 16.97    | 51.32     | 5.10                    | 8.51                    | 5.18                    | 6.71                    | 9.91            |
|                     |        | V (T/m)    | 0.63 | 1.78    | 0.3        | 5.08     | 33.44     | 10.06                   | 16.79                   | 6.33                    | 8.20                    | 12.80           |
| S2-2nd-Center       | Strain | M* (T.m/m) | 5.82 | 3.09    | 0.3        | 17.42    | 51.32     | 5.02                    | 8.38                    | 5.09                    | 6.60                    | 9.74            |
|                     |        | V (T/m)    | 0.62 | 1.74    | 0.3        | 4.97     | 33.44     | 10.29                   | 17.18                   | 6.48                    | 8.40                    | 13.10           |
| D1-2nd-Left(Slow)   | Strain | M* (T.m/m) | 5.82 | 3.09    | 0.3        | 17.42    | 51.32     | 5.02                    | 8.38                    | 5.09                    | 6.60                    | 9.74            |
|                     |        | V (T/m)    | 0.62 | 1.74    | 0.3        | 4.97     | 33.44     | 10.29                   | 17.18                   | 6.48                    | 8.40                    | 13.10           |
| D2-2nd-Center(Slow) | Strain | M* (T.m/m) | 6.10 | 3.13    | 0.3        | 18.02    | 51.32     | 4.91                    | 8.00                    | 4.98                    | 6.45                    | 9.39            |
|                     |        | V (T/m)    | 0.60 | 1.68    | 0.3        | 4.80     | 33.44     | 10.66                   | 17.80                   | 6.71                    | 8.20                    | 13.58           |
| D3-2nd-Left(Medium) | Strain | M* (T.m/m) | 5.82 | 3.09    | 0.3        | 17.42    | 51.32     | 5.02                    | 8.38                    | 5.09                    | 6.60                    | 9.74            |
|                     |        | V (T/m)    | 0.62 | 1.74    | 0.3        | 4.97     | 33.44     | 10.29                   | 17.18                   | 6.48                    | 8.40                    | 13.10           |
| D4-2nd-Left(Fast)   | Strain | M* (T.m/m) | 6.47 | 3.19    | 0.3        | 18.83    | 51.32     | 4.77                    | 7.96                    | 4.82                    | 6.25                    | 9.23            |
|                     |        | V (T/m)    | 0.56 | 1.61    | 0.3        | 4.58     | 33.44     | 11.14                   | 18.59                   | 7.02                    | 9.10                    | 14.19           |
| D5-2nd-Right(Slow)  | Strain | M* (T.m/m) | 6.47 | 3.19    | 0.3        | 18.83    | 51.32     | 4.77                    | 7.96                    | 4.82                    | 6.25                    | 9.39            |
|                     |        | V (T/m)    | 0.56 | 1.61    | 0.3        | 4.58     | 33.44     | 11.14                   | 18.59                   | 7.02                    | 9.10                    | 13.10           |
| S1-2nd-Left         | LVDT   | M* (T.m/m) | 9.67 | 4.52    | 0.3        | 27.59    | 51.32     | 3.04                    | 5.07                    | 3.02                    | 3.92                    | 5.81            |
|                     |        | V (T/m)    | 0.67 | 0.98    | 0.3        | 3.39     | 33.44     | 18.25                   | 30.46                   | 11.47                   | 14.87                   | 23.20           |
| S2-2nd-Center       | LVDT   | M* (T.m/m) | 9.68 | 4.53    | 0.3        | 27.63    | 51.32     | 3.03                    | 5.06                    | 3.01                    | 3.91                    | 5.79            |
|                     |        | V (T/m)    | 0.67 | 0.98    | 0.3        | 3.39     | 33.44     | 18.25                   | 30.46                   | 11.47                   | 14.87                   | 23.20           |
| D1-2nd-Left(Slow)   | LVDT   | M* (T.m/m) | 9.68 | 4.53    | 0.3        | 27.63    | 51.32     | 3.03                    | 5.06                    | 3.01                    | 3.91                    | 5.79            |
|                     |        | V (T/m)    | 0.62 | 0.98    | 0.3        | 3.39     | 33.44     | 18.25                   | 30.46                   | 11.47                   | 14.87                   | 23.20           |
| D2-2nd-Center(Slow) | LVDT   | M* (T.m/m) | 9.69 | 4.53    | 0.3        | 27.65    | 51.32     | 3.03                    | 5.06                    | 3.01                    | 3.91                    | 5.79            |
|                     |        | V (T/m)    | 0.68 | 0.98    | 0.3        | 3.40     | 33.44     | 18.24                   | 30.45                   | 11.47                   | 14.86                   | 23.19           |
| D3-2nd-Left(Medium) | LVDT   | M* (T.m/m) | 9.70 | 4.54    | 0.3        | 27.69    | 51.32     | 3.02                    | 5.05                    | 3.01                    | 3.90                    | 5.78            |
|                     |        | V (T/m)    | 0.68 | 0.98    | 0.3        | 3.40     | 33.44     | 18.24                   | 30.45                   | 11.47                   | 14.86                   | 23.19           |
| D4-2nd-Left(Fast)   | LVDT   | M* (T.m/m) | 9.71 | 4.55    | 0.3        | 27.73    | 51.32     | 3.01                    | 5.03                    | 3.00                    | 3.89                    | 5.76            |
|                     |        | V (T/m)    | 0.68 | 0.97    | 0.3        | 3.38     | 33.44     | 18.43                   | 30.77                   | 11.58                   | 15.02                   | 23.43           |
| D5-2nd-Right(Slow)  | LVDT   | M* (T.m/m) | 9.74 | 4.58    | 0.3        | 27.85    | 51.32     | 2.99                    | 4.99                    | 2.97                    | 3.86                    | 5.78            |
|                     |        | V (T/m)    | 0.62 | 0.97    | 0.3        | 3.40     | 33.44     | 18.43                   | 30.76                   | 11.58                   | 15.01                   | 23.42           |

ตารางที่ 4.7 ค่าหน่วยแรงและค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างคานตาม  
ขวาง

| Load Case         | CROSS BEAM |          |      |         |            |          |           | LFR Method              |                         | LRFR Method             |                         | Korean Standard |
|-------------------|------------|----------|------|---------|------------|----------|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
|                   | Fit by     |          | DL   | HS20-44 | I (Impact) | Ultimate | Capacity* | RF <sub>INVENTORY</sub> | RF <sub>OPERATION</sub> | RF <sub>INVENTORY</sub> | RF <sub>OPERATING</sub> |                 |
| S1-Center         | Strain     | M* (T.m) | 3.56 | 1.49    | 0.3        | 9.77     | 59.47     | 13.05                   | 21.78                   | 13.38                   | 17.34                   | 25.55           |
|                   |            | M (T.m)  | 3.53 | 0.71    | 0.3        | 7.99     | -59.47    | 27.40                   | 45.74                   | 28.10                   | 36.42                   | 53.66           |
|                   |            | V (T)    | 8.49 | 4.19    | 0.3        | 24.71    | 28.06     | 4.10                    | 6.84                    | 1.24                    | 1.60                    | 2.66            |
| S2-Left           | Strain     | M* (T.m) | 2.64 | 2.13    | 0.3        | 9.51     | 59.47     | 9.33                    | 15.57                   | 9.59                    | 12.43                   | 18.30           |
|                   |            | M (T.m)  | 2.62 | 0.72    | 0.3        | 6.36     | -59.47    | 27.60                   | 46.07                   | 28.39                   | 36.80                   | 54.18           |
|                   |            | V (T)    | 9.15 | 4.31    | 0.3        | 26.18    | 28.06     | 3.91                    | 6.53                    | 1.12                    | 1.45                    | 2.43            |
| S3-Right          | Strain     | M* (T.m) | 3.30 | 1.69    | 0.3        | 9.74     | 59.47     | 11.57                   | 19.32                   | 11.88                   | 15.40                   | 22.68           |
|                   |            | M (T.m)  | 3.27 | 0.71    | 0.3        | 7.52     | -59.47    | 27.57                   | 46.02                   | 28.30                   | 36.68                   | 54.03           |
|                   |            | V (T)    | 8.70 | 4.24    | 0.3        | 25.20    | 28.06     | 4.03                    | 6.72                    | 1.19                    | 1.55                    | 2.58            |
| S4-2Left          | Strain     | M* (T.m) | 3.08 | 1.85    | 0.3        | 9.69     | 59.47     | 10.63                   | 17.74                   | 10.91                   | 14.15                   | 20.84           |
|                   |            | M (T.m)  | 3.06 | 0.72    | 0.3        | 7.16     | -59.47    | 27.32                   | 45.60                   | 28.06                   | 36.37                   | 53.57           |
|                   |            | V (T)    | 8.85 | 4.26    | 0.3        | 25.52    | 28.06     | 3.99                    | 6.66                    | 1.17                    | 1.52                    | 2.53            |
| S5-2Right         | Strain     | M* (T.m) | 3.81 | 1.25    | 0.3        | 9.70     | 59.47     | 15.46                   | 25.81                   | 15.84                   | 20.53                   | 30.26           |
|                   |            | M (T.m)  | 3.78 | 0.70    | 0.3        | 8.43     | -59.47    | 27.63                   | 46.12                   | 28.31                   | 36.70                   | 54.07           |
|                   |            | V (T)    | 8.25 | 4.14    | 0.3        | 24.16    | 28.06     | 4.17                    | 6.97                    | 1.28                    | 1.66                    | 2.75            |
| S6-2Center        | Strain     | M* (T.m) | 3.16 | 1.79    | 0.3        | 9.74     | 59.47     | 10.96                   | 18.30                   | 11.26                   | 14.59                   | 21.49           |
|                   |            | M (T.m)  | 3.13 | 0.71    | 0.3        | 7.27     | -59.47    | 27.66                   | 46.17                   | 28.40                   | 36.82                   | 54.22           |
|                   |            | V (T)    | 8.80 | 4.25    | 0.3        | 25.41    | 28.06     | 4.01                    | 6.69                    | 1.18                    | 1.53                    | 2.55            |
| D1-2Center(Slow)  | Strain     | M* (T.m) | 3.16 | 1.79    | 0.3        | 9.71     | 59.47     | 10.96                   | 18.30                   | 11.26                   | 14.59                   | 21.49           |
|                   |            | M (T.m)  | 3.13 | 0.71    | 0.3        | 7.27     | -59.47    | 27.66                   | 46.17                   | 28.40                   | 36.82                   | 54.22           |
|                   |            | V (T)    | 8.80 | 4.25    | 0.3        | 25.41    | 28.06     | 4.01                    | 6.69                    | 1.18                    | 1.53                    | 2.55            |
| D2-Center(Slow)   | Strain     | M* (T.m) | 3.56 | 1.49    | 0.3        | 9.77     | 59.47     | 13.05                   | 21.78                   | 13.38                   | 17.34                   | 25.55           |
|                   |            | M (T.m)  | 3.53 | 0.71    | 0.3        | 7.99     | -59.47    | 27.40                   | 45.74                   | 28.10                   | 36.42                   | 53.66           |
|                   |            | V (T)    | 8.49 | 4.19    | 0.3        | 24.71    | 28.06     | 4.10                    | 6.84                    | 1.24                    | 1.60                    | 2.66            |
| D3-Center(Medium) | Strain     | M* (T.m) | 3.56 | 1.49    | 0.3        | 9.77     | 59.47     | 13.05                   | 21.78                   | 13.38                   | 17.34                   | 25.55           |
|                   |            | M (T.m)  | 3.53 | 0.71    | 0.3        | 7.99     | -59.47    | 27.40                   | 45.74                   | 28.10                   | 36.42                   | 53.66           |
|                   |            | V (T)    | 8.49 | 4.19    | 0.3        | 24.71    | 28.06     | 4.10                    | 6.84                    | 1.24                    | 1.60                    | 2.66            |
| D4-Center(Fast)   | Strain     | M* (T.m) | 3.56 | 1.49    | 0.3        | 9.74     | 59.47     | 13.05                   | 21.78                   | 13.38                   | 17.34                   | 25.55           |
|                   |            | M (T.m)  | 3.53 | 0.71    | 0.3        | 7.99     | -59.47    | 27.40                   | 45.74                   | 28.10                   | 36.42                   | 53.66           |
|                   |            | V (T)    | 8.49 | 4.19    | 0.3        | 24.71    | 28.06     | 4.10                    | 6.84                    | 1.24                    | 1.60                    | 2.58            |
| D5-Left(Slow)     | Strain     | M* (T.m) | 2.26 | 2.36    | 0.3        | 9.33     | 59.47     | 8.49                    | 14.17                   | 8.74                    | 11.33                   | 16.68           |
|                   |            | M (T.m)  | 2.25 | 0.72    | 0.3        | 6.69     | -59.47    | 27.84                   | 46.17                   | 28.66                   | 37.16                   | 54.69           |
|                   |            | V (T)    | 9.39 | 4.34    | 0.3        | 26.68    | 28.06     | 3.86                    | 6.44                    | 1.08                    | 1.40                    | 2.36            |
| D6-Right(Slow)    | Strain     | M* (T.m) | 3.30 | 1.69    | 0.3        | 9.74     | 59.47     | 11.57                   | 19.32                   | 11.88                   | 15.40                   | 22.68           |
|                   |            | M (T.m)  | 3.27 | 0.71    | 0.3        | 7.52     | -59.47    | 27.57                   | 46.02                   | 28.30                   | 36.68                   | 54.03           |
|                   |            | V (T)    | 8.70 | 4.24    | 0.3        | 25.20    | 28.06     | 4.03                    | 6.72                    | 1.19                    | 1.55                    | 2.58            |
| D7-Left(Medium)   | Strain     | M* (T.m) | 2.30 | 2.50    | 0.3        | 9.71     | 59.47     | 8.01                    | 13.37                   | 8.24                    | 10.69                   | 15.73           |
|                   |            | M (T.m)  | 2.01 | 0.73    | 0.3        | 5.27     | -59.47    | 27.61                   | 46.09                   | 28.45                   | 36.88                   | 54.27           |
|                   |            | V (T)    | 9.55 | 4.36    | 0.3        | 27.02    | 28.06     | 3.83                    | 6.39                    | 1.06                    | 1.37                    | 2.31            |
| D8-Right(Medium)  | Strain     | M* (T.m) | 3.30 | 1.69    | 0.3        | 9.74     | 59.47     | 11.57                   | 19.32                   | 11.88                   | 15.40                   | 22.68           |
|                   |            | M (T.m)  | 3.27 | 0.71    | 0.3        | 7.52     | -59.47    | 27.57                   | 46.02                   | 28.30                   | 36.68                   | 54.03           |
|                   |            | V (T)    | 8.70 | 4.24    | 0.3        | 25.20    | 28.06     | 4.03                    | 6.72                    | 1.19                    | 1.55                    | 2.58            |
| D9-Left(Fast)     | Strain     | M* (T.m) | 2.14 | 2.43    | 0.3        | 9.27     | 59.47     | 8.27                    | 13.80                   | 8.52                    | 11.04                   | 16.25           |
|                   |            | M (T.m)  | 2.13 | 0.72    | 0.3        | 5.47     | -59.47    | 27.92                   | 46.60                   | 28.75                   | 37.27                   | 54.86           |
|                   |            | V (T)    | 9.47 | 4.35    | 0.3        | 26.85    | 28.06     | 3.84                    | 6.41                    | 1.07                    | 1.39                    | 2.34            |

ตารางที่ 4.7 ค่าหน่วยแรงและค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของโครงสร้างคานตามขวาง (ต่อ)

| Load Case           | CROSS BEAM |          |      |         |            |          |           | LFR Method              |                         | LRFR Method             |                         | Korean Standard |
|---------------------|------------|----------|------|---------|------------|----------|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
|                     | Fit by     |          | DL   | HS20-44 | I (Impact) | Ultimate | Capacity* | RF <sub>INVENTORY</sub> | RF <sub>OPERATION</sub> | RF <sub>INVENTORY</sub> | RF <sub>OPERATION</sub> | RF              |
| D10-Right(Fast)     | Strain     | M' (T.m) | 2.64 | 2.13    | 0.3        | 9.51     | 59.47     | 9.33                    | 15.57                   | 9.59                    | 12.43                   | 18.30           |
|                     |            | M (T.m)  | 2.62 | 0.72    | 0.3        | 6.36     | -59.47    | 27.60                   | 46.07                   | 28.39                   | 36.80                   | 54.18           |
|                     |            | V (T)    | 9.15 | 4.31    | 0.3        | 26.18    | 28.06     | 3.91                    | 6.53                    | 1.12                    | 1.45                    | 2.43            |
| S1-2nd-Left         | Strain     | M' (T.m) | 2.64 | 2.13    | 0.3        | 9.51     | 59.47     | 9.33                    | 15.57                   | 9.59                    | 12.43                   | 18.30           |
|                     |            | M (T.m)  | 2.62 | 0.72    | 0.3        | 6.36     | -59.47    | 27.60                   | 46.07                   | 28.39                   | 36.80                   | 54.18           |
|                     |            | V (T)    | 9.15 | 4.31    | 0.3        | 26.18    | 28.06     | 3.91                    | 6.53                    | 1.12                    | 1.45                    | 2.43            |
| S2-2nd-Center       | Strain     | M' (T.m) | 2.87 | 1.98    | 0.3        | 9.60     | 59.47     | 9.98                    | 16.66                   | 10.25                   | 13.29                   | 19.58           |
|                     |            | M (T.m)  | 2.85 | 0.72    | 0.3        | 6.78     | -59.47    | 27.46                   | 45.83                   | 28.22                   | 36.58                   | 53.86           |
|                     |            | V (T)    | 8.99 | 4.29    | 0.3        | 25.84    | 28.06     | 3.95                    | 6.59                    | 1.14                    | 1.48                    | 2.48            |
| D1-2nd-Left(slow)   | Strain     | M' (T.m) | 2.87 | 1.98    | 0.3        | 9.60     | 59.47     | 9.98                    | 16.66                   | 10.25                   | 13.29                   | 19.58           |
|                     |            | M (T.m)  | 2.85 | 0.72    | 0.3        | 6.78     | -59.47    | 27.46                   | 45.83                   | 28.22                   | 36.58                   | 53.86           |
|                     |            | V (T)    | 8.99 | 4.29    | 0.3        | 25.84    | 28.06     | 3.95                    | 6.59                    | 1.14                    | 1.48                    | 2.48            |
| D2-2nd-Center(Slow) | Strain     | M' (T.m) | 3.16 | 1.79    | 0.3        | 9.71     | 59.47     | 10.96                   | 18.30                   | 11.26                   | 14.59                   | 21.49           |
|                     |            | M (T.m)  | 3.13 | 0.71    | 0.3        | 7.27     | -59.47    | 27.66                   | 46.17                   | 28.40                   | 36.82                   | 54.22           |
|                     |            | V (T)    | 8.80 | 4.25    | 0.3        | 25.41    | 28.06     | 4.01                    | 6.69                    | 1.18                    | 1.53                    | 2.55            |
| D3-2nd-Left(Medium) | Strain     | M' (T.m) | 2.87 | 1.98    | 0.3        | 9.60     | 59.47     | 9.98                    | 16.66                   | 10.25                   | 13.29                   | 19.58           |
|                     |            | M (T.m)  | 2.85 | 0.72    | 0.3        | 6.78     | -59.47    | 27.46                   | 45.83                   | 28.22                   | 36.58                   | 53.86           |
|                     |            | V (T)    | 8.99 | 4.29    | 0.3        | 25.84    | 28.06     | 3.95                    | 6.59                    | 1.14                    | 1.48                    | 2.43            |
| D4-2nd-Left(Fast)   | Strain     | M' (T.m) | 3.48 | 1.55    | 0.3        | 9.76     | 59.47     | 12.57                   | 20.98                   | 12.89                   | 16.71                   | 24.61           |
|                     |            | M (T.m)  | 3.45 | 0.71    | 0.3        | 7.85     | -59.47    | 27.45                   | 45.83                   | 28.16                   | 36.50                   | 53.77           |
|                     |            | V (T)    | 8.56 | 4.21    | 0.3        | 24.88    | 28.06     | 4.07                    | 6.79                    | 1.22                    | 1.58                    | 2.63            |
| D5-2nd-Right(Slow)  | Strain     | M' (T.m) | 3.48 | 1.55    | 0.3        | 9.76     | 59.47     | 12.57                   | 20.98                   | 12.89                   | 16.71                   | 24.61           |
|                     |            | M (T.m)  | 3.45 | 0.71    | 0.3        | 7.85     | -59.47    | 27.45                   | 45.82                   | 28.16                   | 36.50                   | 53.77           |
|                     |            | V (T)    | 8.56 | 4.21    | 0.3        | 24.88    | 28.06     | 4.07                    | 6.79                    | 1.22                    | 1.58                    | 2.63            |
| S1-2nd-Left         | LVDT       | M' (T.m) | 2.31 | 0.58    | 0.3        | 5.49     | 59.47     | 34.51                   | 57.61                   | 35.53                   | 46.05                   | 67.79           |
|                     |            | M (T.m)  | 2.29 | 0.48    | 0.3        | 5.23     | -59.47    | 41.72                   | 69.64                   | 42.95                   | 55.68                   | 81.96           |
|                     |            | V (T)    | 4.66 | 3.73    | 0.3        | 16.72    | 28.06     | 5.08                    | 8.47                    | 1.94                    | 2.51                    | 4.02            |
| S2-2nd-Center       | LVDT       | M' (T.m) | 2.31 | 0.58    | 0.3        | 5.49     | 59.47     | 34.51                   | 57.61                   | 35.53                   | 46.05                   | 67.79           |
|                     |            | M (T.m)  | 2.28 | 0.47    | 0.3        | 5.19     | -59.47    | 42.62                   | 71.14                   | 43.88                   | 56.88                   | 83.72           |
|                     |            | V (T)    | 4.65 | 3.73    | 0.3        | 16.71    | 28.06     | 5.08                    | 8.48                    | 1.94                    | 2.52                    | 4.02            |
| D1-2nd-Left(slow)   | LVDT       | M' (T.m) | 2.30 | 0.58    | 0.3        | 5.47     | 59.47     | 34.52                   | 57.62                   | 35.54                   | 46.07                   | 67.81           |
|                     |            | M (T.m)  | 2.27 | 0.47    | 0.3        | 5.17     | -59.47    | 42.63                   | 71.16                   | 43.89                   | 56.89                   | 83.74           |
|                     |            | V (T)    | 4.64 | 3.73    | 0.3        | 16.69    | 28.06     | 5.08                    | 8.48                    | 1.94                    | 2.52                    | 4.02            |
| D2-2nd-Center(Slow) | LVDT       | M' (T.m) | 2.29 | 0.58    | 0.3        | 5.45     | 59.47     | 34.53                   | 57.63                   | 35.55                   | 46.08                   | 67.83           |
|                     |            | M (T.m)  | 2.27 | 0.47    | 0.3        | 5.17     | -59.47    | 42.63                   | 71.16                   | 43.89                   | 56.89                   | 83.74           |
|                     |            | V (T)    | 4.64 | 3.73    | 0.3        | 16.69    | 28.06     | 5.08                    | 8.48                    | 1.94                    | 2.52                    | 4.02            |
| D3-2nd-Left(Medium) | LVDT       | M' (T.m) | 2.25 | 0.57    | 0.3        | 5.35     | 59.47     | 35.17                   | 58.70                   | 36.21                   | 46.93                   | 69.09           |
|                     |            | M (T.m)  | 2.23 | 0.47    | 0.3        | 5.10     | -59.47    | 42.67                   | 71.22                   | 43.93                   | 56.95                   | 83.83           |
|                     |            | V (T)    | 4.60 | 3.73    | 0.3        | 16.62    | 28.06     | 5.08                    | 8.49                    | 1.95                    | 2.52                    | 4.03            |
| D4-2nd-Left(Fast)   | LVDT       | M' (T.m) | 2.24 | 0.57    | 0.3        | 5.34     | 59.47     | 35.17                   | 58.71                   | 36.22                   | 46.95                   | 69.10           |
|                     |            | M (T.m)  | 2.21 | 0.47    | 0.3        | 5.06     | -59.47    | 42.69                   | 71.25                   | 43.96                   | 56.98                   | 83.87           |
|                     |            | V (T)    | 4.58 | 3.73    | 0.3        | 16.58    | 28.06     | 5.09                    | 8.49                    | 1.95                    | 2.52                    | 4.04            |
| D5-2nd-Right(Slow)  | LVDT       | M' (T.m) | 2.15 | 0.56    | 0.3        | 5.19     | 59.47     | 35.88                   | 59.88                   | 36.95                   | 47.90                   | 70.50           |
|                     |            | M (T.m)  | 2.13 | 0.46    | 0.3        | 4.89     | -59.47    | 43.69                   | 72.94                   | 45.00                   | 58.34                   | 85.87           |
|                     |            | V (T)    | 4.49 | 3.73    | 0.3        | 16.42    | 28.06     | 5.10                    | 8.51                    | 1.96                    | 2.55                    | 4.06            |

ตารางที่ 4.8 ค่าหน่วยแรงและค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างเสาตอม่อ

สะพาน

| Load Case           | Fit by |           | PIER  |         |            |          |           | LFR Method              |                         | LRFR Method             |                         | Korean Standard |
|---------------------|--------|-----------|-------|---------|------------|----------|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
|                     |        |           | DL    | HS20-44 | I (Impact) | Ultimate | Capacity* | RF <sub>INVENTORY</sub> | RF <sub>OPERATING</sub> | RF <sub>INVENTORY</sub> | RF <sub>OPERATING</sub> | RF              |
| S1-Center           | Strain | Axial (T) | 13.81 | 7.69    | 0.3        | 42.13    | 387.20    | 17.02                   | 28.41                   | 16.50                   | 21.39                   | 33.45           |
| S2-Left             | Strain | Axial (T) | 13.72 | 7.71    | 0.3        | 42.01    | 387.20    | 16.98                   | 28.35                   | 16.47                   | 21.35                   | 33.37           |
| S3-Right            | Strain | Axial (T) | 13.65 | 7.71    | 0.3        | 41.88    | 387.20    | 16.99                   | 28.35                   | 16.47                   | 21.35                   | 33.38           |
| S4-2Left            | Strain | Axial (T) | 13.90 | 7.67    | 0.3        | 42.25    | 387.20    | 17.06                   | 28.48                   | 16.54                   | 21.44                   | 33.53           |
| S5-2Right           | Strain | Axial (T) | 13.67 | 7.71    | 0.3        | 41.92    | 387.20    | 16.99                   | 28.35                   | 16.47                   | 21.35                   | 33.38           |
| S6-2Center          | Strain | Axial (T) | 13.67 | 7.71    | 0.3        | 41.92    | 387.20    | 16.99                   | 28.35                   | 16.47                   | 21.35                   | 33.38           |
| D1-2Center(Slow)    | Strain | Axial (T) | 13.67 | 7.71    | 0.3        | 41.92    | 387.20    | 16.99                   | 28.35                   | 16.47                   | 21.35                   | 33.38           |
| D2-Center(Slow)     | Strain | Axial (T) | 13.81 | 7.69    | 0.3        | 42.13    | 387.20    | 17.02                   | 28.41                   | 16.50                   | 21.39                   | 33.45           |
| D3-Center(medium)   | Strain | Axial (T) | 13.81 | 7.69    | 0.3        | 42.13    | 387.20    | 17.02                   | 28.41                   | 16.50                   | 21.39                   | 33.45           |
| D4-Center(Fast)     | Strain | Axial (T) | 13.81 | 7.69    | 0.3        | 42.13    | 387.20    | 17.02                   | 28.41                   | 16.50                   | 21.39                   | 33.45           |
| D5-Left(Slow)       | Strain | Axial (T) | 13.39 | 7.72    | 0.3        | 41.43    | 387.20    | 16.98                   | 28.34                   | 16.47                   | 21.35                   | 33.37           |
| D6-Right(Slow)      | Strain | Axial (T) | 13.72 | 7.71    | 0.3        | 42.01    | 387.20    | 16.98                   | 28.35                   | 16.47                   | 21.35                   | 33.37           |
| D7-Left(Medium)     | Strain | Axial (T) | 13.31 | 7.72    | 0.3        | 41.29    | 387.20    | 16.98                   | 28.35                   | 16.47                   | 21.36                   | 33.38           |
| D8-Right(Medium)    | Strain | Axial (T) | 13.72 | 7.72    | 0.3        | 42.03    | 387.20    | 16.96                   | 28.31                   | 16.45                   | 21.32                   | 33.33           |
| D9-Left(Fast)       | Strain | Axial (T) | 13.35 | 7.72    | 0.3        | 41.36    | 387.20    | 16.98                   | 28.35                   | 16.47                   | 21.35                   | 33.38           |
| D10-Right(Fast)     | Strain | Axial (T) | 13.51 | 7.72    | 0.3        | 41.65    | 387.20    | 16.97                   | 28.35                   | 16.46                   | 21.34                   | 33.38           |
| S1-2nd-Left         | Strain | Axial (T) | 13.51 | 7.72    | 0.3        | 41.65    | 387.20    | 16.97                   | 28.35                   | 16.46                   | 21.34                   | 33.36           |
| S2-2nd-Center       | Strain | Axial (T) | 13.58 | 7.72    | 0.3        | 41.78    | 387.20    | 16.97                   | 28.32                   | 16.46                   | 21.35                   | 33.53           |
| D1-2nd-Left(Slow)   | Strain | Axial (T) | 13.58 | 7.72    | 0.3        | 41.78    | 387.20    | 16.97                   | 28.32                   | 16.46                   | 21.33                   | 33.45           |
| D2-2nd-Center(Slow) | Strain | Axial (T) | 13.67 | 7.71    | 0.3        | 41.92    | 387.20    | 16.99                   | 28.35                   | 16.47                   | 21.39                   | 33.38           |
| D3-2nd-Left(Medium) | Strain | Axial (T) | 13.58 | 7.72    | 0.3        | 41.78    | 387.20    | 16.97                   | 28.32                   | 16.46                   | 21.33                   | 33.35           |
| D4-2nd-Left(Fast)   | Strain | Axial (T) | 13.78 | 7.70    | 0.3        | 42.13    | 387.20    | 17.00                   | 28.38                   | 16.48                   | 21.32                   | 33.41           |
| D5-2nd-Right(Slow)  | Strain | Axial (T) | 13.78 | 7.70    | 0.3        | 42.10    | 387.20    | 17.00                   | 28.38                   | 16.48                   | 21.32                   | 33.41           |
| S1-2nd-Left         | LVDT   | Axial (T) | 12.97 | 6.83    | 0.3        | 38.70    | 387.20    | 19.22                   | 32.08                   | 18.65                   | 24.17                   | 37.78           |
| S2-2nd-Center       | LVDT   | Axial (T) | 12.96 | 6.83    | 0.3        | 38.68    | 387.20    | 19.22                   | 32.09                   | 18.65                   | 24.17                   | 37.79           |
| D1-2nd-Left(Slow)   | LVDT   | Axial (T) | 12.97 | 6.82    | 0.3        | 38.68    | 387.20    | 19.25                   | 32.13                   | 18.68                   | 24.21                   | 37.84           |
| D2-2nd-Center(Slow) | LVDT   | Axial (T) | 12.95 | 6.82    | 0.3        | 38.64    | 387.20    | 19.25                   | 32.13                   | 18.68                   | 24.21                   | 37.84           |
| D3-2nd-Left(Medium) | LVDT   | Axial (T) | 12.92 | 6.81    | 0.3        | 38.56    | 387.20    | 19.28                   | 32.18                   | 18.71                   | 24.25                   | 37.90           |
| D4-2nd-Left(Fast)   | LVDT   | Axial (T) | 12.91 | 6.80    | 0.3        | 38.52    | 387.20    | 19.31                   | 32.23                   | 18.74                   | 24.29                   | 37.96           |
| D5-2nd-Right(Slow)  | LVDT   | Axial (T) | 12.82 | 6.77    | 0.3        | 38.29    | 387.20    | 19.40                   | 32.39                   | 18.83                   | 24.40                   | 38.14           |

\*ค่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างเสาตอม่อพิจารณาเฉพาะในโครงสร้างเสาตอม่อเท่านั้น ไม่รวมถึงความสามารถในการรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม



จากตารางสรุปข้อมูลค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพาน ที่ได้จากการคำนวณพบว่า สะพานยังมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะใช้งานได้อย่างปลอดภัย โดยมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของแผ่นพื้นสะพานจากการทดสอบแบบสถิตย์ และแบบพลวัตแบบเคลื่อนที่ช้ามาก ๆ สอดคล้องกัน โดยการวิเคราะห์ผลของค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณีคือ กรณีเปรียบเทียบแบบจำลองโครงสร้างจากค่าความเครียด และกรณีเปรียบเทียบแบบจำลองโครงสร้างจากการแอ่นตัว

โดยผลของค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานจากการเปรียบเทียบทั้ง 2 กรณีข้างต้นพบว่า การให้น้ำหนักบรรทุกในแต่ละช่องจราจรมีผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของสะพาน โดยจะสังเกตได้ว่าโครงสร้างสะพานมีแนวโน้มที่ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจะลดลงเมื่อมีรถบรรทุกเคลื่อนที่ในช่องจราจรด้านขวา ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างสะพานเป็นแบบแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูป (PC plank) เททับหน้าด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก มีลักษณะเป็นโครงสร้างประกอบ (Composite structure) เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกกระทำในแผ่นพื้นสะพานแผ่นใดแผ่นหนึ่ง การถ่ายแรงไปสู่แผ่นพื้นสะพานอื่น ๆ อาจจะไม่เป็นไปอย่างสมบูรณ์

ความเร็วที่รถบรรทุกใช้ในการทดสอบโครงสร้างสะพานก็ส่งผลให้ค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลงได้ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงจะเกิดแรงกระแทก (Impact load) ซึ่งส่งผลให้ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่าแบบสถิตย์และส่งผลให้ค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลงได้ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ออกมาในรูปของค่าตัวคูณขยายทางพลวัต (Dynamic Amplification Factor, DAF) ดังสรุปในตารางที่ 4.9

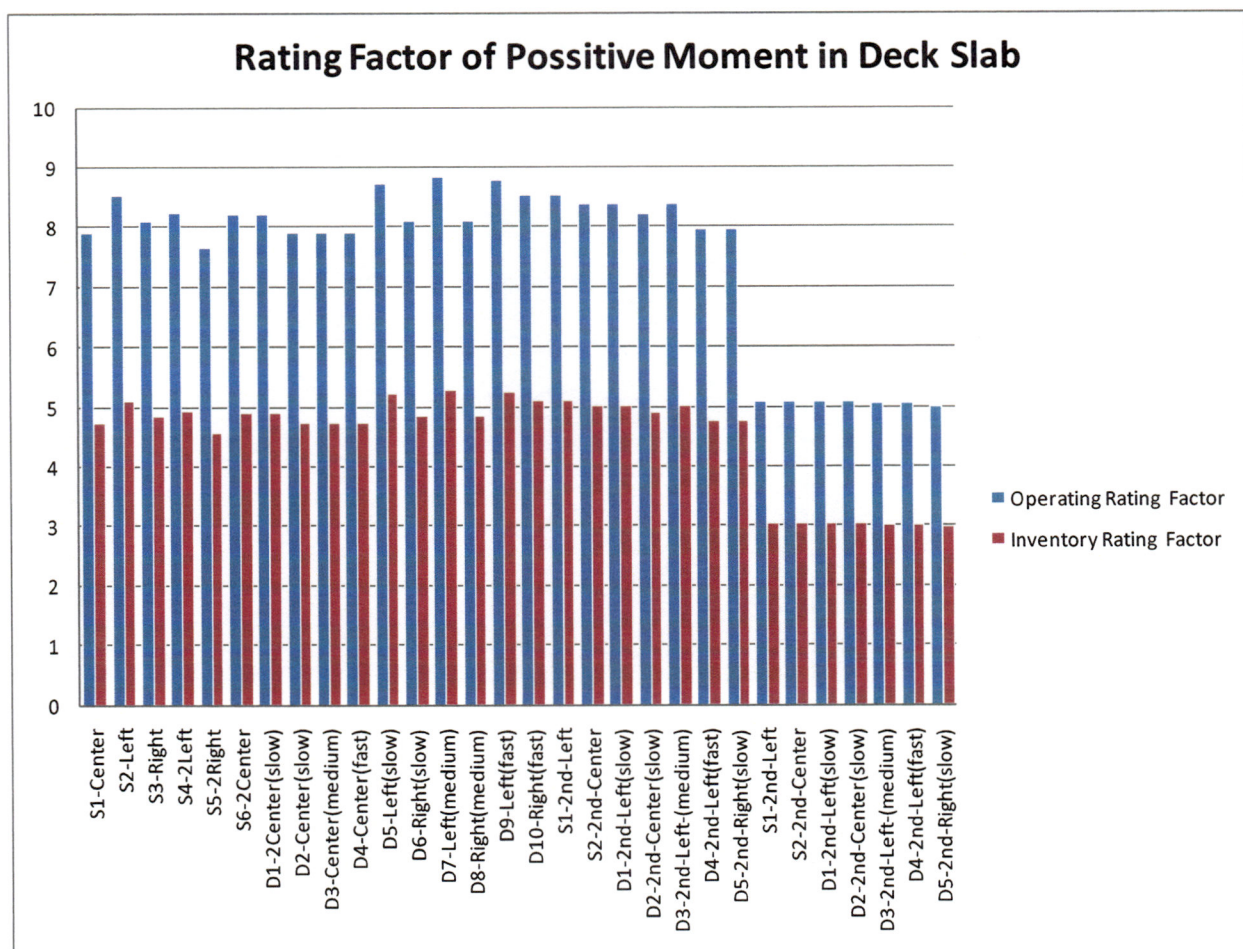
ตารางที่ 4.9 ค่าความเครียดสูงสุดและค่าตัวคูณขยายจากการทดสอบ

| Load Case          | Speed     | Maximum Strain(micro) | DAF  |
|--------------------|-----------|-----------------------|------|
| Static Right Lane  | -         | 30.8                  | -    |
| Dynamic Right Lane | Very Slow | 31.1                  | 1.01 |
| Dynamic Right Lane | Medium    | 34.9                  | 1.13 |
| Dynamic Right Lane | Fast      | 35.6                  | 1.16 |

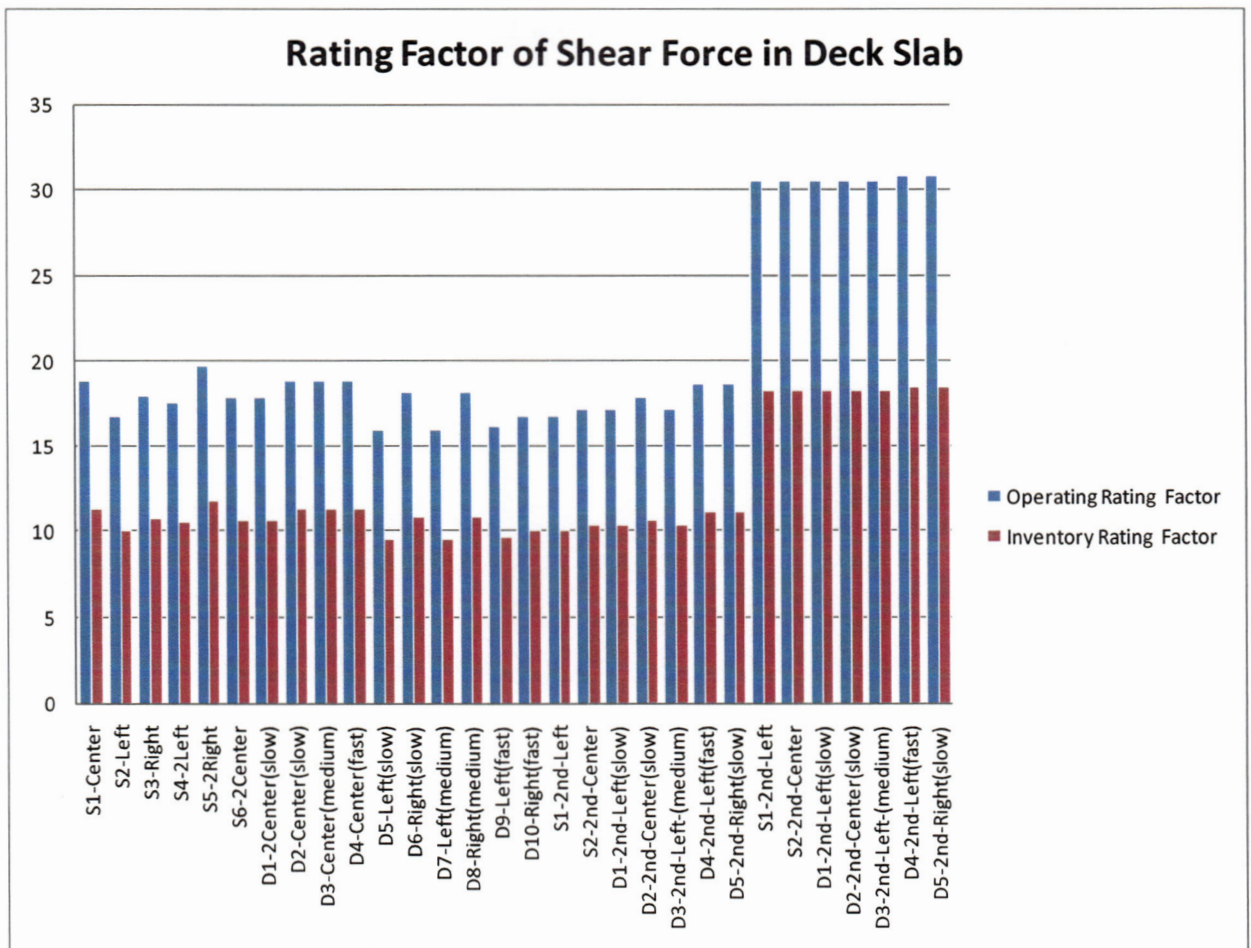
จำนวนของรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบมีผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานได้เช่นกัน โดยค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานจะลดลงเมื่อมีรถบรรทุกจอดบนสะพาน 2 คันพร้อมกันแบบจับตามกันในช่องจราจรด้านขวา โดยมีค่าลดลงจากกรณีที่มียรถบรรทุกจอดบนสะพานคันเดียวถึง 5.77%

วิธีการทดสอบแบบสถิตย์และแบบพลวัตที่ความเร็วช้ามาก ให้ผลของความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของโครงสร้างสะพานใกล้เคียงกัน ซึ่งทำให้สามารถเลือกใช้การทดสอบแบบพลวัตที่ความเร็วช้ามาก ๆ แทนการทดสอบแบบสถิตย์ที่อาจจะจำเป็นต้องปิดการจราจรเป็นเวลานานานได้ดี ทำให้การทดสอบสะพานมีความสะดวกและรวดเร็วขึ้นได้

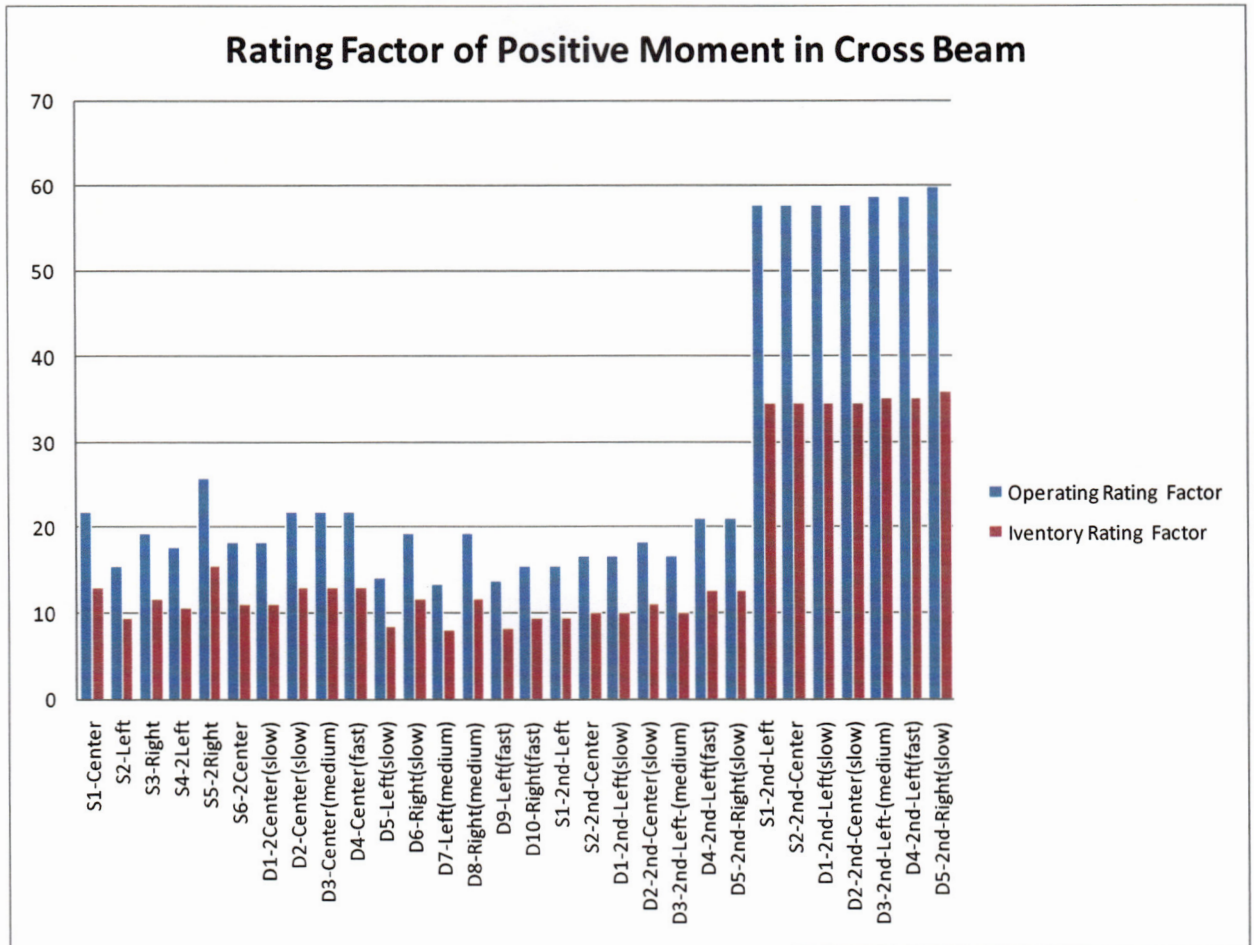
ข้อมูลวิเคราะห์ข้างต้นพิจารณาจากการเปรียบเทียบจากค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานโดยวิธี Load Factor Method (LF) ซึ่งแบ่งออกได้ตามลักษณะของแรงภายในต่าง ๆ ของแต่ละชิ้นส่วนของโครงสร้างสะพาน และยังแบ่งออกตามระดับของค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกอีกด้วย ดังแสดงตามรูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าบ่งชี้ความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกเนื่องจากโมเมนต์บวกของพื้นสะพาน

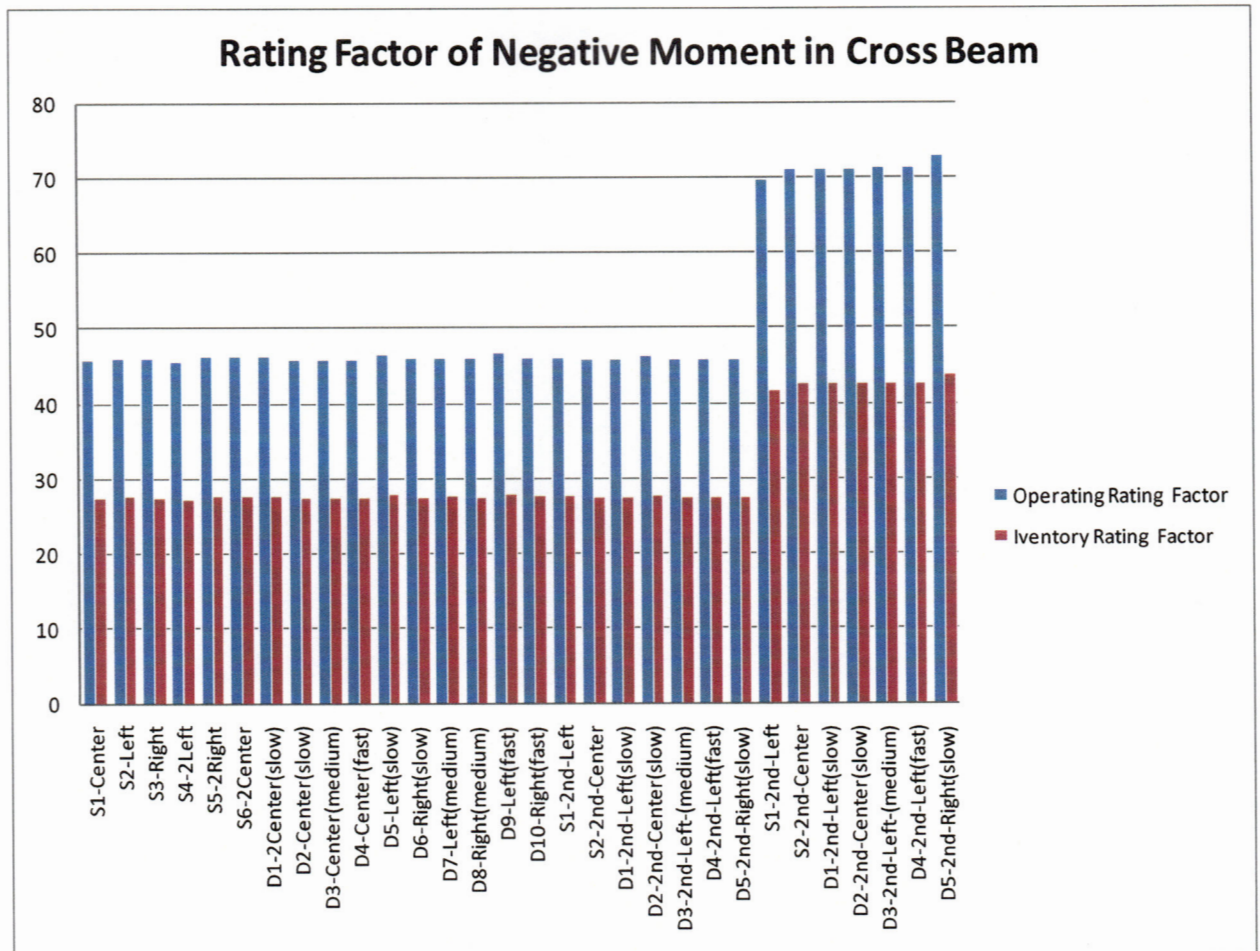


รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าปัจจัยความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกเนื่องจากแรงเฉือนของพื้นสะพาน

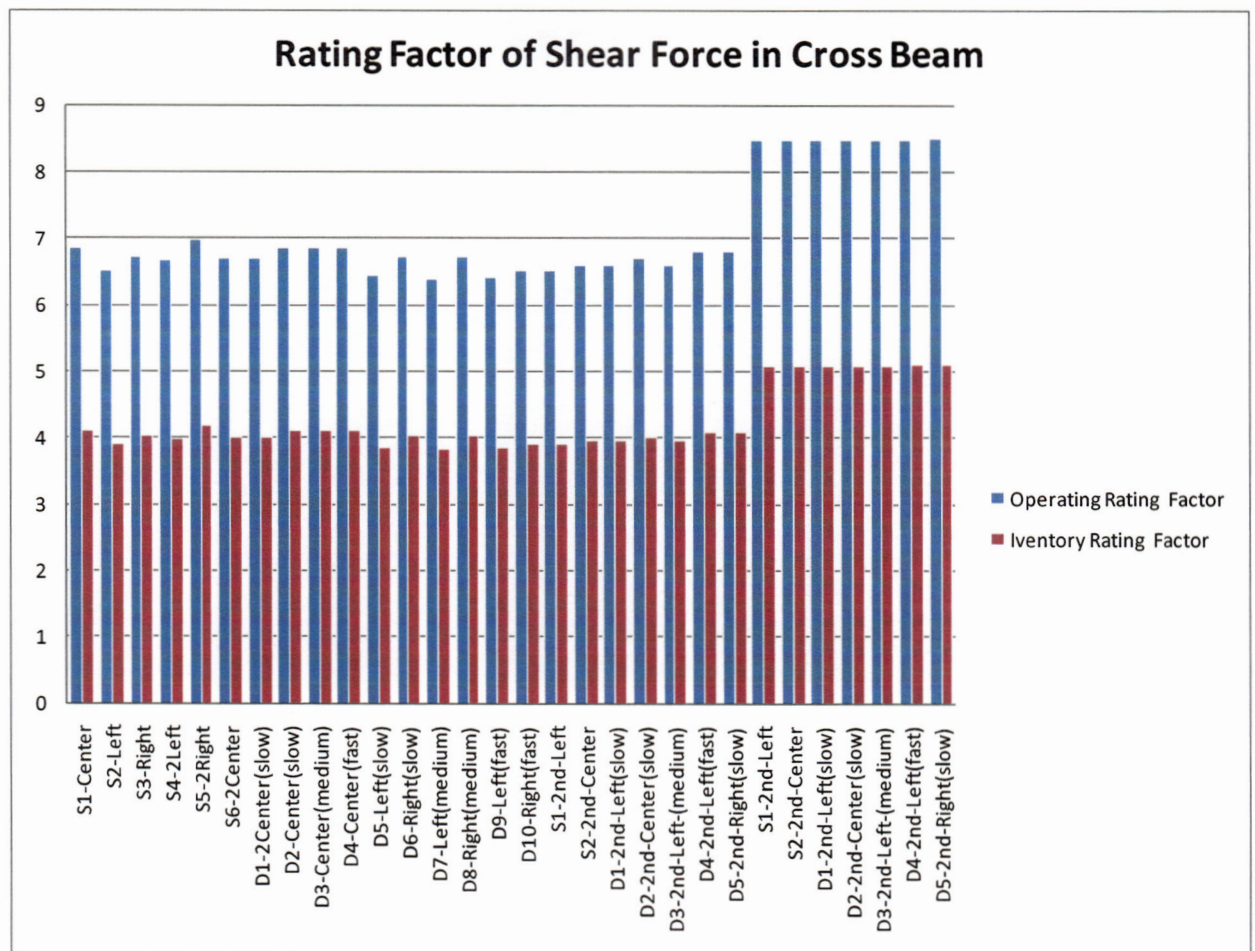


รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าบ่งชี้ความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกเนื่องจากโมเมนต์บวกของคานตามขวาง

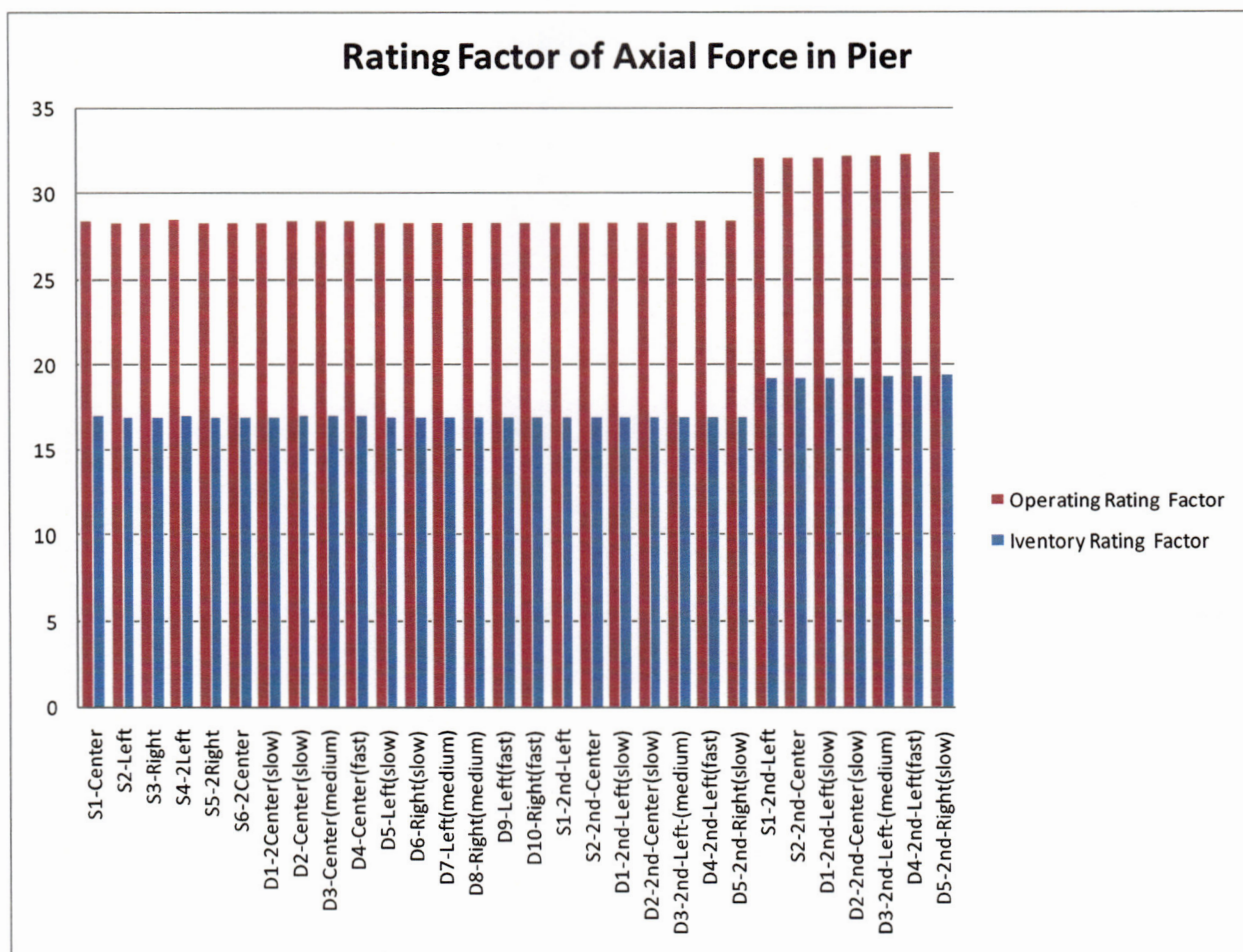




รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าปัจจัยความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกเนื่องจากโมเมนต์ลบของคานตามขวาง



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าปัจจัยความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกเนื่องจากแรงเฉือนของคานตามขวาง



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบค่าปัจจัยความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกเนื่องจากแรงในแนวแกนของเสา  
ค่อมสะพาน



## สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการศึกษา

1. จากการศึกษาและวิเคราะห์ค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในครั้งนี้พบว่า โครงสร้างสะพานที่ทำการทดสอบยังมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย เนื่องจากค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่ได้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่สูง โดยการทดสอบแบบสถิตย์กับการทดสอบแบบพลวัตที่ความเร็วของรถบรรทุกช้ามาก ๆ มีแนวโน้มของค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกใกล้เคียงกันมาก จึงอาจจะใช้วิธีการทดสอบแบบพลวัตที่ความเร็วช้ามาก ๆ แทนการทดสอบแบบสถิตย์ได้ เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการทดสอบ เนื่องจากการทดสอบแบบสถิตย์ใช้ระยะเวลาในการทดสอบค่อนข้างนาน จนอาจส่งผลให้การจราจรติดขัดได้ในกรณีที่สะพานที่จะทำการทดสอบมีปริมาณการจราจรหนาแน่น

2. ค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกโดยวิธี LFR และ LRFR มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย โดยค่าบ่งชี้ที่ระดับ Inventory Level วิธี LRFR ให้ค่าบ่งชี้มากกว่าวิธี LFR แต่ค่าบ่งชี้ที่ระดับ Operating Level วิธี LRFR จะให้ค่าบ่งชี้ต่ำกว่าวิธี LFR ส่วนค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจากมาตรฐานกระทรวงคมนาคมประเทศเกาหลีให้ค่าสูงที่สุด

3. ในการทดสอบนี้ใช้วิธีวิเคราะห์ค่ากำลังประลัยของคอนกรีตโครงสร้างโดยอุปกรณ์ ชมิคแฮมเมอร์ (Schmidt hammer) ค่ากำลังประลัยของแผ่นพื้นสะพานที่ได้มีค่า 599.16 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่สูงมาก จนอาจจะส่งผลให้การทดสอบผิดพลาดได้ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ค่ากำลังโดยชมิคแฮมเมอร์ซึ่งเป็นการทดสอบหาค่ากำลังประลัยของคอนกรีตแบบไม่ทำลาย ก็มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้อ้างอิงกับการทดสอบสะพานเบื้องต้น

4. การเปรียบเทียบแบบจำลองโครงสร้างสะพานด้วยค่าการแอ่นตัว (Displacement) มีความเหมาะสมกว่าการเปรียบเทียบโครงสร้างสะพานด้วยค่าความเครียด (Strain) มาก เพราะเป็นการตรวจวัดจากองค์รวมของแผ่นพื้นสะพาน และค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดสอบจริงกับแบบจำลองก็ยังมีค่าคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย โดยมีค่าใกล้เคียงกันถึง 84.67% อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบจากค่าความเครียดก็ยังคงมีความจำเป็นเพื่อใช้ดูแนวโน้มของค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจริงกับแบบจำลองว่ามีพฤติกรรมสอดคล้องกันหรือไม่

5. ความเร็วของรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบสามารถส่งผลให้ค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลงได้ เนื่องจากการที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง จะก่อให้เกิดแรงกระแทก (Impact Load) ทำให้โครงสร้างสะพานต้องรับน้ำหนักมากขึ้นจนส่งผลต่อค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก อย่างไรก็ตามหากทำการทดสอบด้วยความเร็วในระดับที่ต่ำจะทำให้ระดับค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน จึงสามารถใช้การทดสอบแบบพลวัตด้วยความเร็วต่ำแทนการทดสอบทางสถิตย์ได้ ซึ่งจะลดระยะเวลาในการทดสอบและการปิดช่องจราจรในขณะทดสอบได้

6. กรณีที่รถบรรทุกใช้ช่องจราจรใดในการเคลื่อนที่ก็ส่งผลกระทบต่อโครงสร้าง เนื่องจากในกรณีที่รถบรรทุกใช้ช่องจราจรซ้ายหรือขวา จะส่งผลให้สะพานเกิดการบิดตัว (Torsion) ซึ่งโครงสร้างสะพานที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นแบบแผ่นพื้นสำเร็จรูป (PC plank) และเททับหน้าด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งมีลักษณะเป็นโครงสร้างประกอบ (Composite Structure) อาจจะทำให้การถ่ายเทแรงภายในเป็นไปอย่างไม่สมบูรณ์

7. จำนวนรถบรรทุกและลักษณะการจัดรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างสะพานก็ส่งผลกับค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเช่นเดียวกัน โดยค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานจะลดลงเมื่อมีรถบรรทุกจอดบนสะพาน 2 คันพร้อมกัน โดยมีค่าลดลงจากกรณีที่มีรถบรรทุกจอดบนสะพานคันเดียวถึง 5.77% เมื่อพิจารณาจากกรณีรถบรรทุกอยู่บนสะพานในช่องจราจรด้านขวา

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดและอุปกรณ์ตรวจวัดการแอ่นตัวควรจะทำการติดตั้งในแนวที่ล้อของรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านใกล้กึ่งกลางของพื้นสะพานจะทำให้การตรวจวัดมีความถูกต้องมากขึ้น เนื่องจากค่าความเครียดและค่าการแอ่นตัว มีแนวโน้มที่สูงที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดที่ตำแหน่งอื่นอาจจะมีค่าความสำคัญน้อยกว่า เนื่องจากค่าความเครียดและค่าการแอ่นตัวมีค่าน้อยกว่าตำแหน่งดังกล่าว

2. แบบแปลนที่นำมาใช้อ้างอิงในการวิเคราะห์ค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกครั้งนี้ ก็อาจจะส่งผลให้ผลที่ได้คลาดเคลื่อนได้เช่นกัน เนื่องจากแบบแปลนของสะพานที่ใช้อ้างอิง เป็นแบบแปลนสะพานมาตรฐาน มฐ-4-101/1 ของสำนักวิศวกรรมทางหลวงชนบทเป็นโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งแตกต่างกับโครงสร้างสะพานที่ทำการทดสอบจริงที่เป็นแบบแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปทับหน้าด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งเป็นโครงสร้างสะพานที่แตกต่างกัน

3. ในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างสะพาน อาจจะไม่จำเป็นต้องจำลองโครงสร้างที่ไม่ได้รับแรง เช่น ราวกันตกสะพานและขอบกัน โดยอาจจะพิจารณาน้ำหนักของชิ้นส่วนดังกล่าวให้เป็นแรงที่กระทำบนแผ่นพื้นสะพานที่ตำแหน่งนั้น ๆ มากกว่า เพื่อให้พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานไม่ผิดเพี้ยนไปจากโครงสร้างสะพานจริง

## เอกสารอ้างอิง

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (1996).

Standards specifications for highway bridges. 16th Ed., Washington, DC.

Sobanjo, J. O., Stukhart, G. and James, R. W., (1994), "Evaluation of projects for rehabilitation of highway bridges", ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 120, 81-99.

Zhao, Z. and Haldar, A. (1996), "Bridge fatigue damage evaluation and updating using non-destructive inspections", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 53, 775-788.

Downing, S. D. and Socie, D. F. (1982), "Simple rainflow counting algorithms", International Journal of Fatigue, 31-40.

Miner, M. A. (1945), "Cumulative damage in fatigue", Transaction of American Society of Mechanical Engineers, Vol. 67, A159-164.

Frank, K. H. (1992), "Using measured stress histories to evaluate the remaining fatigue life of bridges", Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Workshop on Bridge Rehabilitation, Darmstadt, 529-539.

Zuraski, P. D. (1993), "Service performance of steel bridges compared to fatigue-life predictions", ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 119, 3056-3068.

Laman, J. A. and Nowak, A. S. (1996), "Fatigue-Load Models for Girder Bridges", ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 122, 726-733.

Gagarine, N. and Albrecht, P. (1992), "Predicting fatigue life of highway bridges with weight-in-motion data", Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Workshop on Bridge Rehabilitation, Darmstadt, 679-693.

Moses, F., Schilling C. G., and Raju, K. S. (1987), "Fatigue evaluation procedures for steel bridges", NCHRP Report 299.

Manual for Condition Evaluation and Load Rating of Highway Bridges using Load and Resistance Factor Philosophy, NCHRP (2001).

Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges, FHWA-PD-96-001 (1995).

Fatigue Evaluation Procedures for Steel Bridges, NCHRP Report 299.

Bridge Inspector's Reference Manual, FHWA NHI 03 (2002).

Development of Bridge Load Testing Process for Load Evaluation, IOWA DOT TR 445 (2003).

Concrete Bridges: Inspection, Repair, Strengthening, Testing, Load Capacity Evaluation, Raina, V.K., (2003).