

บทที่ 5

การทดสอบสะพานในภาคสนาม

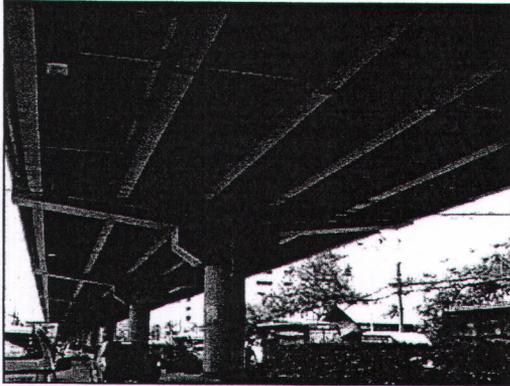
ดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับปัญหาสะพานและรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพาน โดยแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาถูกแทนด้วยรถยนต์ระบบของศาสตร์เดียวที่ติดอยู่บนสะพานซึ่งแทนด้วยคันช่วงเดียวซึ่งมีการสั่นไหวที่จุดรองรับของคัน ทั้งนี้สัญญาณการสั่นไหวที่จุดรองรับของคันในแบบจำลองจะต้องถูกป้อนเข้าสู่แบบจำลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ผ่านสมการการเคลื่อนที่ที่เกิดปฏิริยากระทำร่วมกันระหว่างรถยนต์และสะพาน (Vehicle-Bridge Interaction) ในแบบจำลอง เพื่อให้การจำลองสถานการณ์มีความใกล้เคียงความเป็นจริงที่เกิดขึ้นกับจุดรองรับของสะพานมากที่สุดจำเป็นต้องมีการหาสัญญาณที่มีความสอดคล้องกับปัญหาจริงอันส่งผลถึงการสั่นสะเทือนกับรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพาน ซึ่งการจำลองสถานการณ์ขึ้นด้วยการสังเคราะห์สัญญาณการสั่นไหวที่จุดรองรับในคอมพิวเตอร์นั้นทำได้ยากลำบากยิ่งอีกทั้งยังไม่สามารถรับรู้ถึงพฤติกรรมที่แท้จริงของสะพานได้อย่างแท้จริง ดังนั้นการที่จะให้ได้มาซึ่งสัญญาณการสั่นไหวที่จุดรองรับของสะพานและรับทราบถึงพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานจึงจำเป็นต้องทำการทดสอบสะพานในภาคสนาม (Bridge Test)

สัญญาณการสั่นไหวที่เป็นตัวแปรสำคัญเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบสะพานจริงประกอบไปด้วยสัญญาณความเร่งและสัญญาณการกระจัดซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.17) กล่าวคือในสมการที่ (2.17) ประกอบไปด้วยตัวแปรที่ไม่ทราบค่าจำนวน 2 ชุด โดยชุดที่ 1 ประกอบด้วยพิกัดทั่วไปของสะพานและรถยนต์คือ $\ddot{q}(t)$ $\dot{q}(t)$ และ $q(t)$ ส่วนชุดที่ 2 คือสัญญาณการสั่นไหวที่จุดรองรับของสะพานประกอบด้วยความเร่ง $\ddot{q}_r(t)$ และการกระจัด $q_r(t)$ แต่ในส่วนของสัญญาณการสั่นไหวที่ปลายจุดรองรับของสะพานสามารถหาค่าได้เมื่อทำการทดสอบสะพานจริงซึ่งสัญญาณความเร่งและการกระจัดที่จุดรองรับทั้งสองข้างของสะพานจากการทดสอบจะถูกนำไปป้อนเข้าสู่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้สามารถคำนวณค่าพิกัดทั่วไปของสะพานและรถยนต์ได้ตามขั้นตอนการแก้สมการที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2

การทดสอบสะพานในภาคสนามสำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกสะพานข้ามทางแยกแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร เป็นสะพานที่ใช้ในการทดสอบ โดยการทดสอบจะแยกออกเป็น 2 กรณี กรณีแรกเป็นการศึกษาถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจากการจำลองสถานการณ์ด้วยการเคลื่อนที่ผ่านโดยรถบรรทุกสิบล้อที่ใช้สำหรับการทดสอบในทิศทางตรงข้าม ในกรณีนี้จะทำการทดสอบเพื่อนำไปวิเคราะห์และประเมินในขั้นต้นถึงปัญหาที่เกิดขึ้นกับรถยนต์โดยสารที่จอดติดอยู่บนสะพานก่อนที่จะขยายผลจากการวิเคราะห์ไปสู่การทดสอบในกรณีที่ 2 ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลการสั่นไหวที่จุดรองรับทั้งสองข้างของสะพานในสภาวะการใช้งานจริงของสะพานภายใต้การจราจรปกติ ทั้งนี้รายละเอียดของการทดสอบสะพานจริงในสนามทั้ง 2 กรณีนี้จะได้กล่าวในหัวข้อที่ 5.2 และ 5.3 ต่อไป

5.1 ลักษณะทั่วไปของสะพานข้ามทางแยก

สะพานข้ามทางแยกซึ่งเป็นโครงสร้างเหล็กประกอบด้วย โครงสร้างหลักที่อยู่เหนือพื้นดิน (Super structure) ได้แก่ เสาเหล็กกลมแบบเชื่อมประกอบ (Pier) คานเหล็กประกอบทางขวาง (Cross beam) คานเหล็กประกอบแบบ I-Girder พื้นสะพานคอนกรีตแบบสำเร็จรูป โดยคานเหล็กประกอบจะทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักจากพื้นสะพานลงสู่ปลายทั้งสองข้างของคานขวางในแต่ละด้านที่มีทิศทางจราจรสวนทางกัน ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 โครงสร้างสะพานเหล็กข้ามทางแยก
แห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร



รูปที่ 5.2 สภาพการจราจรบนสะพานข้ามทางแยกใน
กรุงเทพมหานครที่มีความหนาแน่นแตกต่าง
กันมาก

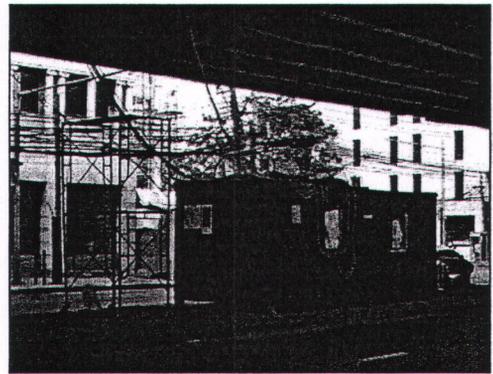
ปัญหาจากสภาพการจราจรที่แตกต่างกันอย่างมากในแต่ละทิศทางการจราจรดังรูปที่ 4.2 ส่งผลให้เมื่อมีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในฝั่งที่มีการจราจรคล่องตัวจะเกิดการสั่นไหวส่งผ่านไปยังฝั่งตรงข้ามที่มียานพาหนะจอดติดอยู่บนสะพาน ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นภายในห้องโดยสารจนรู้สึกได้อย่างรุนแรง โดยคานขวางเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่ทำหน้าที่เป็นจุดรองรับของสะพานหลักในแต่ละทิศทางการจราจรจึงเป็นสาเหตุของการสั่นไหวที่เกิดขึ้นของยานพาหนะที่จอดติดอยู่บนสะพานเมื่อมีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในฝั่งที่มีการจราจรคล่องตัว

5.1.1 สะพานข้ามทางแยกที่ใช้ในการทดสอบ

สะพานข้ามทางแยกที่ใช้ในการทดสอบเพื่อตรวจวัดสัญญาณการสั่นไหวสำหรับงานวิจัยนี้มีความยาวช่วงสะพานทั่วไปช่วงละ 25 เมตร และมีระยะทางรวม 2100 เมตร สะพานข้ามทางแยกแห่งนี้มีรูปแบบเป็นโครงสร้างเหล็กขนาด 2 ช่องจราจร (1 ทิศทางจราจร) พื้นสะพานเป็นแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูป โดยมีคานสะพานเหล็กเป็นโครงสร้างรองรับ และคานสะพานเหล็กได้ถ่ายน้ำหนักด้วยการวางตัวอยู่บนคานขวางในแต่ละข้างเช่นเดียวกับกับสะพานข้ามทางแยกทั่วไป



รูปที่ 5.3 สะพานเหล็กข้ามทางแยกที่ใช้ในการทดสอบ

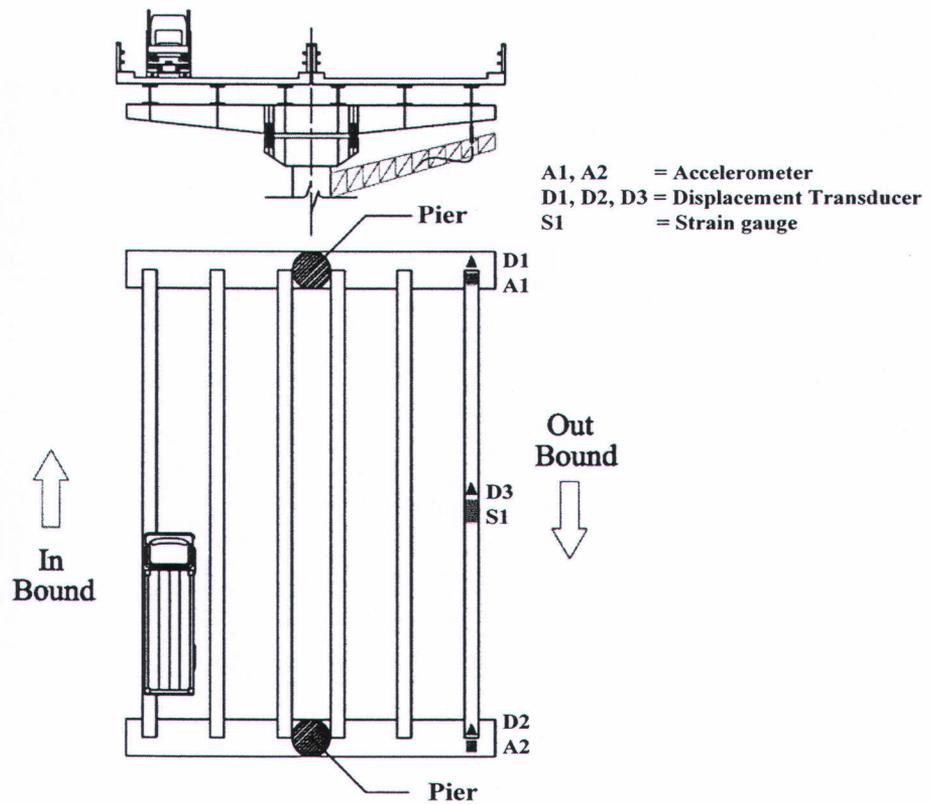


รูปที่ 5.4 ภาพสำนักงานชั่วคราวที่ใช้สำหรับการทดสอบสะพาน

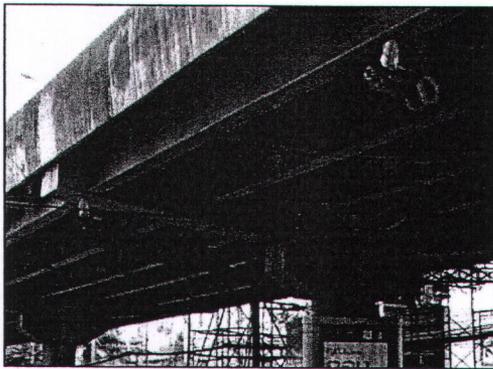
5.2 การทดสอบสะพานจริงโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก

การวิเคราะห์ในเบื้องต้นเพื่อให้ทราบถึงปัญหาตลอดจนถึงการประเมินความรุนแรงในการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์พาดหน้าโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบสะพานเพื่อให้ได้มาซึ่งสัญญาณความเร่งและการกระจัดที่ปลายของคานขวางซึ่งเป็นจุดรองรับทั้งสองข้างของคานสะพานที่ถูกใช้เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกสร้างขึ้น ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการจำลองสถานการณ์โดยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกซึ่งเป็นการสร้างสัญญาณขึ้นกับตัวสะพานโดยมีตำแหน่งบนสะพานที่สำคัญและเป็นตำแหน่งที่ต้องการทราบถึงข้อมูลสัญญาณคือที่ปลายคานขวาง การจำลองสถานการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกนี้ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ (sensor) ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณการกระจัด (Displacement Transducer; DT) และอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณความเร่ง (Acceleration transducers หรือ Accelerometer; AS) โดยอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณการกระจัด (D1 D2) และอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณความเร่ง (A1 A2) ที่ตำแหน่งปลายของคานขวางเป็นไปตามแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 4.5 ส่วนค่าการแอ่นตัวและค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้บริเวณกึ่งกลางคานสะพาน (D3, S1) จะถูกใช้เพื่อประกอบการประเมินหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของแบบจำลองคานสะพานเพื่อจะนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

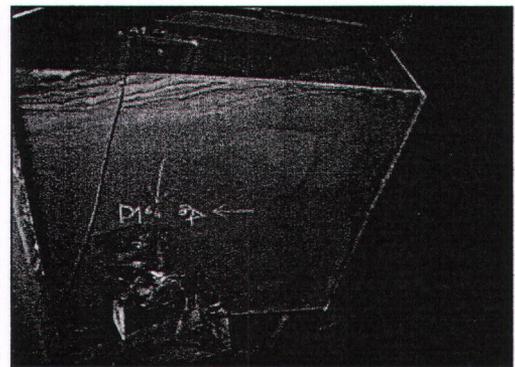




รูปที่ 5.5 แสดงผังการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆของสะพาน

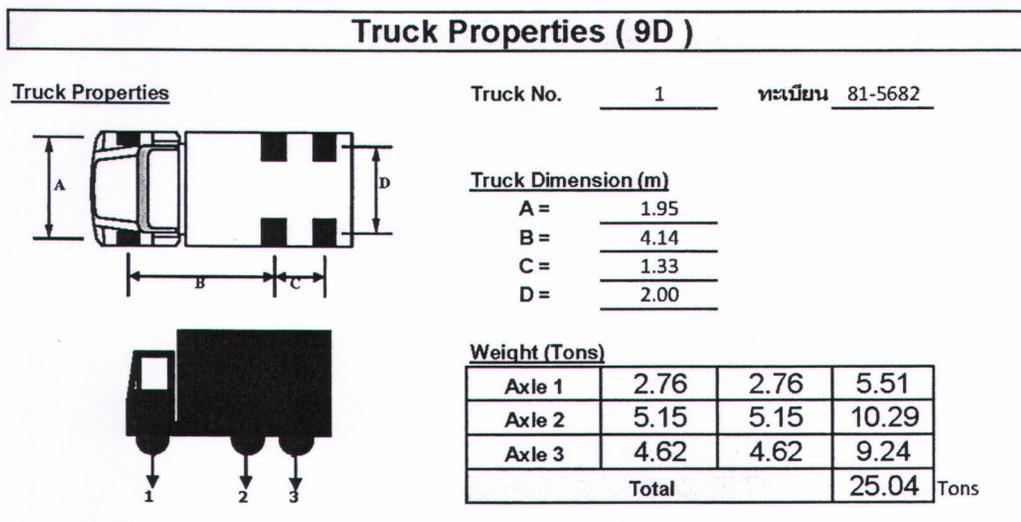


รูปที่ 5.6 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณที่สะพานทดสอบจริงในสนาม



รูปที่ 5.7 ภาพขยายการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณที่ปลายคานขวาง

ในการทดสอบสะพานด้วยการเคลื่อนที่ผ่านโดยรถบรรทุกนั้นได้เลือกใช้รถบรรทุกชนิดสิบล้อ (3 เพลา) ที่มีน้ำหนักบรรทุกไม่เกินค่าตามที่กฎหมายกำหนดเท่ากับ 25 ตัน เพื่อมิให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างสะพาน โดยการเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุกจะแบ่งการทดสอบออกเป็นความเร็วในการวิ่งผ่านของรถบรรทุกทั้งหมด 3 ระดับคือ 5, 30 และ 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง



รูปที่ 5.8 แสดงขนาดและน้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ

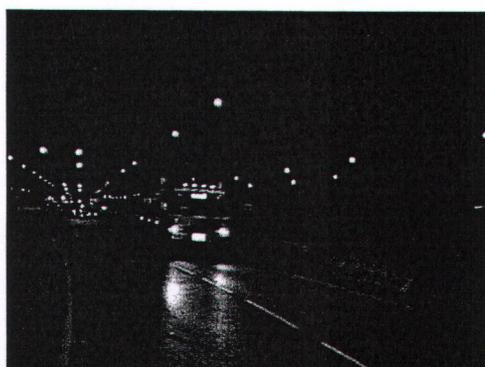
ทั้งนี้รถบรรทุกวิ่งผ่านยังฝั่งตรงข้ามของสะพานที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณในช่องทางจราจรซ้ายสุด (ใกล้ที่ปลายของคานขวางในฝั่งตรงข้าม) เนื่องจากเป็นกรณีที่เกิดค่าวิกฤติ



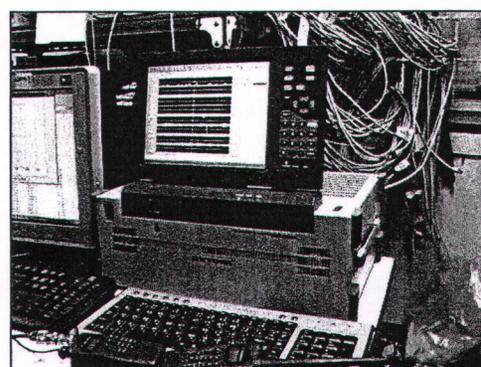
รูปที่ 5.9 ภาพแสดงการชั่งน้ำหนัก
รถบรรทุกที่ด่านชั่งน้ำหนักก่อนการทดสอบ



รูปที่ 5.10 แสดงผลการชั่งน้ำหนักของ
รถบรรทุกที่ด่านชั่งน้ำหนัก



รูปที่ 5.11 ภาพแสดงการวิ่งผ่านของ
รถบรรทุกทดสอบบนสะพาน



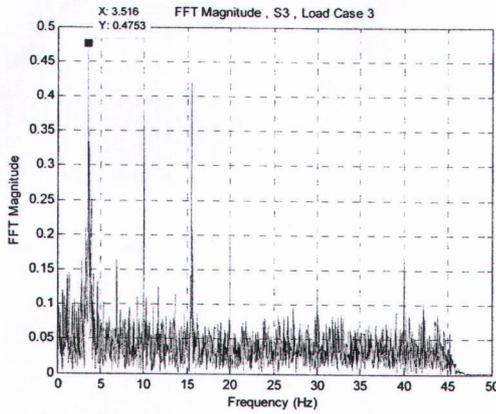
รูปที่ 5.12 ภาพแสดงเครื่องบันทึกข้อมูล
ที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณ

5.2.1 ผลการตรวจวัดสะพานจากการทดสอบโดยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก

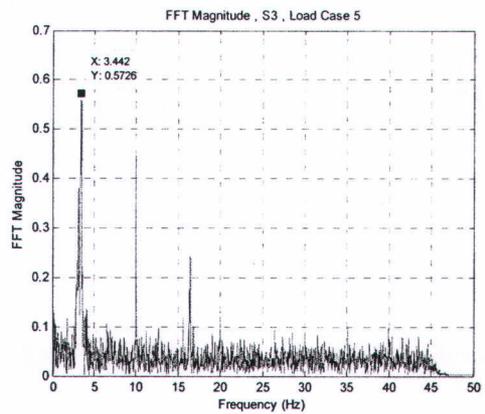
ผลการตรวจวัดจากการทดสอบโดยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกสามารถทำให้ทราบถึงการสั่นไหวที่ปลายของคานขวางสะพานทั้งในส่วนของคุณค่าความเร่งและการกระจัด เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปน้อมเข้าสู่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นผ่านตัวแปร $\ddot{q}_s(t)$ และ $q_s(t)$ จนนำไปสู่ผลการวิเคราะห์โดยการแก้สมการการเคลื่อนที่ที่ได้กล่าวรายละเอียดไว้ในบทที่ 2 โดยข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบจะอยู่ในรูปของตัวเลขดิจิทัลที่ยังไม่ผ่านการแปลงค่าให้อยู่ในรูปของคุณค่าคงที่ประจำเครื่องมือแต่ละชิ้น (Calibration coefficient number) จึงต้องทำการแปลงค่าจากข้อมูลดิบที่ได้จากการตรวจวัดเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบของหน่วยการวัดสากล เช่นค่าความเร่งที่วัดได้โดยอุปกรณ์ Accelerometer จะอยู่ในรูปของหน่วยความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก g (มีค่าเท่ากับ 9.81 m/s^2) ส่วนค่าการกระจัดที่วัดได้โดยอุปกรณ์ DT จะอยู่ในรูปของหน่วยระยะกระจัดซึ่งในที่นี้ใช้หน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) นอกจากนี้ค่าตัวแปรที่ได้จากการตรวจวัดเหล่านี้แล้วยังสามารถนำสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดมาหาค่าความถี่ธรรมชาติของตัวคานสะพานที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณทั้งในส่วนของการกระจัดและความเครียด จากรูปที่ 5.5 ที่กลางช่วงของคานสะพานมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณการกระจัด (DT) และ อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณความเครียด (Strain gauge) ทั้งนี้ อุปกรณ์ทั้งสองอย่างถูกติดตั้งเข้ากับคานสะพานโดยตรงจึงสามารถนำมาหาค่าความถี่ธรรมชาติของคานสะพานได้ซึ่งมีความแตกต่างจากอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณความเร่งและการกระจัดที่ปลายคานขวางที่ถูกติดตั้งเข้ากับปลายคานขวางซึ่งมีค่าความถี่ธรรมชาติที่แตกต่างกันเนื่องจากเป็นส่วนโครงสร้างที่แตกต่างกันทั้งในส่วนของความแข็งและมวลของแต่ละโครงสร้างที่ไม่เท่ากัน

5.2.1.1 การหาค่าความถี่ธรรมชาติจากสัญญาณที่ตรวจวัดได้

การหาค่าความถี่ธรรมชาติจากสัญญาณที่ตรวจวัดได้โดยตรงสามารถทำได้โดยการใช้หลักการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform; FFT) ซึ่งเป็นหลักการวิเคราะห์สัญญาณแบบผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency response) ที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความถี่ (Magnitude-Frequency) โดยค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจะแสดงออกมาในรูปแบบของขนาดที่โดดเด่น ณ ตำแหน่งที่ตรงกับค่าความถี่ธรรมชาติบนแกนความถี่ ซึ่งวิธีการนี้เป็นผลจากการประมาณแต่ให้ค่าความถูกต้องที่ยอมรับได้



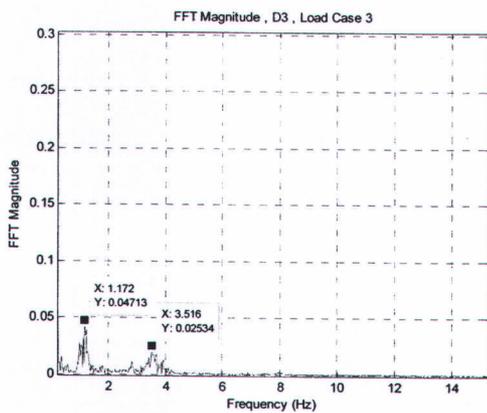
(ก)



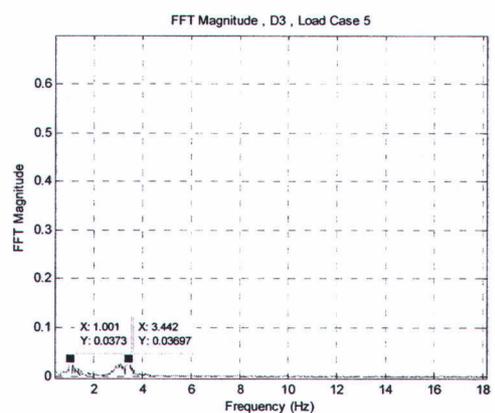
(ข)

รูปที่ 5.13 ตัวอย่างของการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณความเครียด (ก) กรณีที่รถบรรทุกทดสอบวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 30 km/hr

(ข) กรณีที่รถบรรทุกทดสอบวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 60 km/hr



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.14 ตัวอย่างของการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณการกระจัด (ก) กรณีที่รถบรรทุกทดสอบวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 30 km/hr

(ข) กรณีที่รถบรรทุกทดสอบวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 60 km/hr

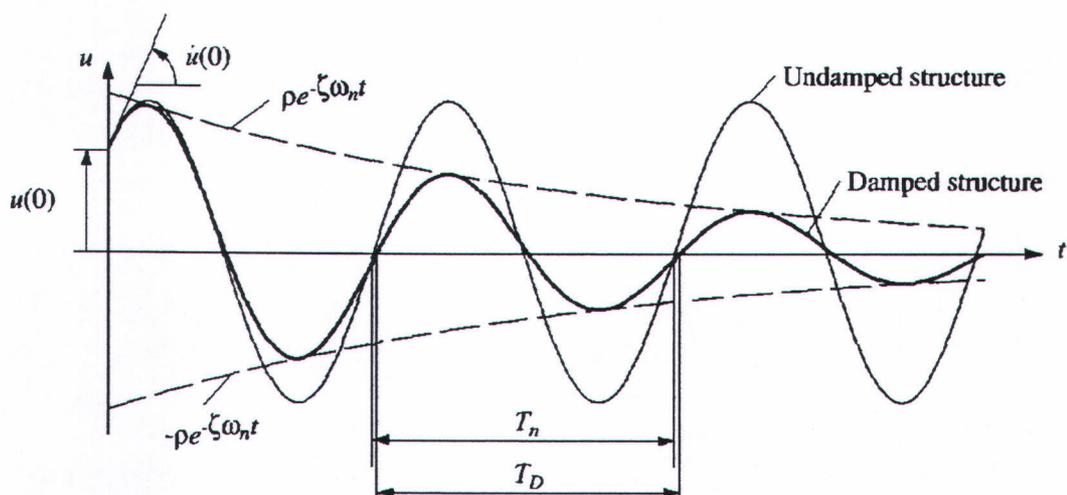
จากผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 5.13 และ 5.14 พบว่าค่าขนาดการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT Magnitude) มีค่าที่โดดเด่นอยู่สองย่านความถี่ โดยกรณีที่รถบรรทุกมีความเร็วในการวิ่งผ่านเท่ากับ 30 km/hr นั้นขนาดที่โดดเด่นปรากฏอยู่ในย่านความถี่ที่มีค่าเท่ากับ 1.172 และ 3.516 Hz ตามลำดับ ส่วนในกรณีที่รถบรรทุกมีความเร็วในการวิ่งผ่านเท่ากับ 60 km/hr นั้นขนาดที่โดดเด่นปรากฏอยู่ในย่านความถี่ที่มีค่าเท่ากับ 1.001 และ 3.442 Hz ตามลำดับ ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าความถี่ทั้งสองย่านในแต่ละกรณีมีย่านความถี่ที่ใกล้เคียงกัน โดยขนาดที่โดดเด่นปรากฏในย่านความถี่แรกเป็นความถี่ที่ต่ำกว่าซึ่งความถี่ย่านนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของสะพานในช่วงแรกของการเคลื่อนตัวตามการสั่นไหวของจุดรองรับสะพานโดยปราศจากการดัด (Rigid body motion)

ดังนั้นความถี่ในย่านนี้จึงยังไม่ใช่ค่าความถี่ธรรมชาติที่แท้จริงของสะพาน ทั้งนี้เมื่อเวลาผ่านไปการเคลื่อนตัวของสะพานอันเกิดขึ้นมาจากการตัดจะปรากฏให้เห็นได้ด้วยขนาดที่โดดเด่นในภายหลังซึ่งจากรูปที่ 5.13 และ 5.14 พบว่าตรงกับย่านความถี่ที่มีค่าเท่ากับ 3.516 และ 3.442 Hz เมื่อมีการวิ่งผ่านของรถบรรทุกด้วยความเร็ว 30 และ 60 km/hr ตามลำดับซึ่งความถี่ดังกล่าวนี้คือความถี่ธรรมชาติของสะพานอันเนื่องมาจากการตัดในโหมดที่ 1 ซึ่งเป็นโหมดหลักเนื่องจากปรากฏขนาดที่เด่นชัดเพียงโหมดเดียว ดังสามารถสังเกตได้ในรูปที่ 5.14 (ก) และ (ข) ที่ไม่ปรากฏขนาดที่โดดเด่นภายหลังจากผ่านความถี่ในย่านดังกล่าว และเมื่อทำการหาค่าเฉลี่ยความถี่จะทำให้ทราบได้ว่าค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานมีค่าเท่ากับ 3.51 Hz ดังที่ได้กล่าวถึงผลการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติจากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานในบทที่ 3 ดังตารางที่ 3.2 พบว่าค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานในโหมดที่ 1 มีค่าเท่ากับ 3.58 Hz ซึ่งค่าที่ใกล้เคียงกับผลจากการตรวจวัดสะพานโดยการทดสอบเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ธรรมชาติของคาน ค่า EI และมวลต่อหน่วยความยาวดังสมการที่ 3.2 ทำให้สามารถหาค่า EI ได้เมื่อทราบค่าความถี่ธรรมชาติของคานและค่ามวลต่อหน่วยความยาว ส่วนค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio; ζ) สามารถหาค่าได้จากสัญญาณโดยใช้หลักการทดสอบแบบการสั่นไหวอิสระ (Free Vibration Tests) หลักการนี้เป็นการนำสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดได้มาพิจารณาเพื่อหาช่วงที่สัญญาณมีการสั่นไหวในลักษณะแบบการสั่นไหวอิสระหรือใกล้เคียงที่สุด จากนั้นจะใช้หลักการการสั่นไหวแบบอิสระเพื่อคำนวณหาค่าอัตราส่วนความหน่วงจากขนาดที่ลดลงจากผลกระทบของความหน่วงหรือที่เรียกว่า ขนาดการสั่นไหวที่เสื่อมถอยแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential decrement) ดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.15 โดยขนาดการสั่นไหวสูงสุดของแต่ละลูกคลื่นจะมีค่าที่ลดลงเรื่อยๆตามสมการความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียล $\delta(t)$

$$\delta(t) = \rho e^{-\zeta\omega_n t} \quad (4.1)$$

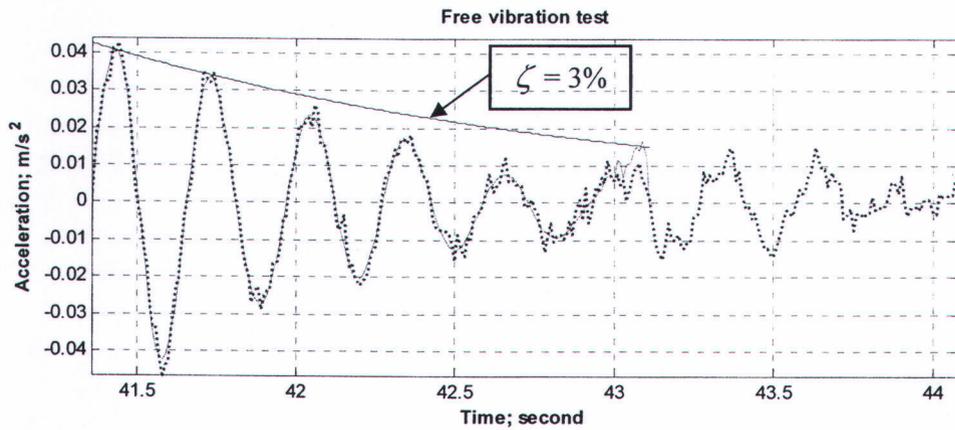
โดยที่

$$\rho = \sqrt{[u(0)]^2 + \left[\frac{\dot{u}(0) + \zeta\omega_n u(0)}{\omega_D} \right]^2} \quad (4.2)$$



รูปที่ 5.15 ผลกระทบของความหน่วงต่อการสั่นไหวแบบอิสระ

ทั้งนี้การหาสัญญาณการสั่นไหวในช่วงที่มีการสั่นแบบอิสระอาจทำได้ง่ายกว่าในสัญญาณความเร่งเนื่องจากสัญญาณความเร่งจะมีการแสดงช่วงการสั่นไหวแบบอิสระที่ชัดเจนกว่า โดยผลการทดสอบจากการสั่นไหวแบบอิสระที่ได้จากการวิเคราะห์ สามารถประมาณค่าอัตราส่วนความหน่วง ζ ได้เท่ากับ 0.03



รูปที่ 5.16 ผลการทดสอบสัญญาณความเร่งในช่วงที่มีการสั่นไหวแบบอิสระ

จากการสมมติค่าความหน่วงมีค่าเท่ากับ 0.02 สำหรับโครงสร้างเหล็กที่นำเสนอไว้ในบทที่ 3 เป็นการใช้ค่าความหน่วงทั่วไปตามชนิดของวัสดุที่ใช้กับโครงสร้าง อย่างไรก็ตามแม้ว่าโครงสร้างสะพานที่มีส่วนของโครงสร้างหลักเป็นโครงสร้างเหล็กซึ่งมีค่าอัตราส่วนความหน่วงโดยทั่วไปเท่ากับ 0.02 (2%) แต่จากผลการวิเคราะห์สัญญาณพบว่าค่าความหน่วงมีค่าที่สูงกว่าค่าที่ถูกสมมติขึ้นสำหรับโครงสร้างเหล็ก ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าโครงสร้างสะพานมีพฤติกรรมเป็นแบบคอมโพสิตเนื่องจากพื้นสะพานเป็นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปชนิดเทพื้นหน้า จึงทำให้ค่าอัตราส่วนมีค่าที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับโครงสร้างเหล็กทั่วไป สำหรับ ค่าคุณสมบัติของคานสะพานที่ได้มาจากการทดสอบสะพานสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าคุณสมบัติของสะพานที่ได้จากการทดสอบสะพานจริง

ω_1 (Hz)	EI (N-sq.m)	ζ
3.51	4.64×10^9	0.03

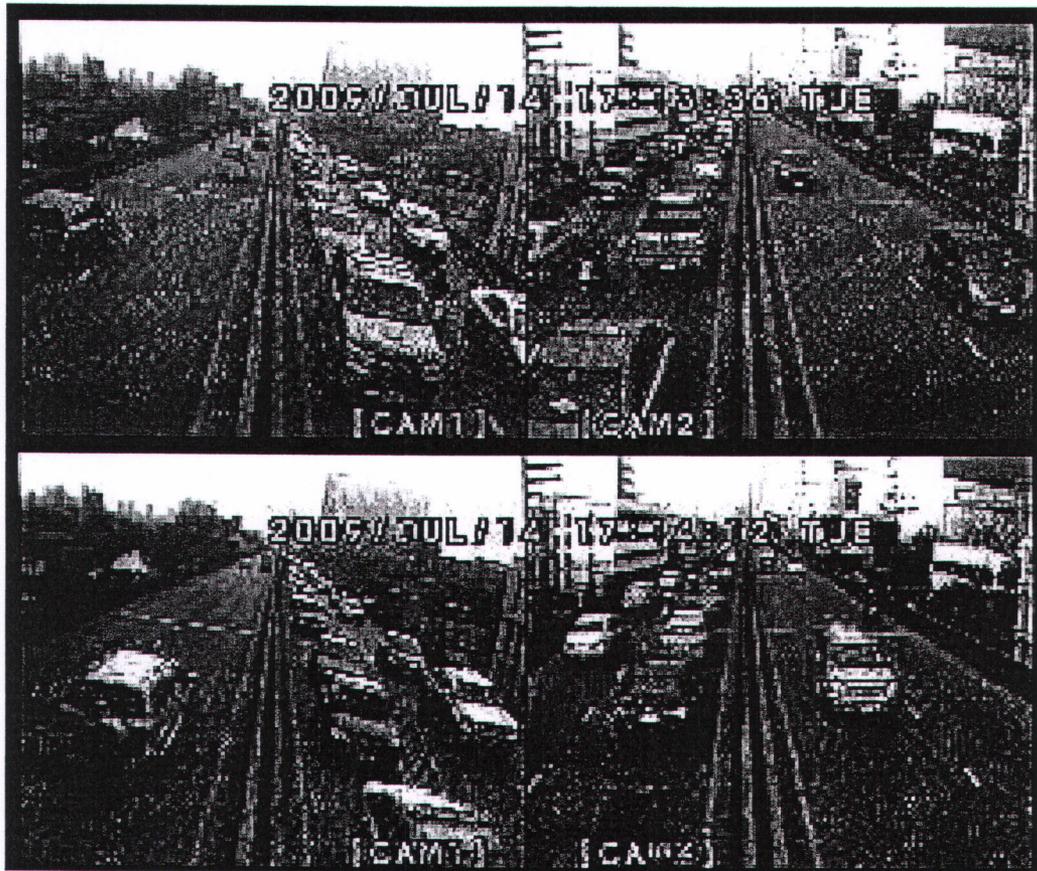
ค่าที่ได้จากการทดสอบในตารางที่ 5.1 เป็นค่าที่วิเคราะห์ได้จากการทดสอบ แต่มีความใกล้เคียงกับค่าที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นำเสนอไว้ในบทที่ 3 อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบต่อการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้เนื่องจากเป็นค่าที่ได้จากสภาพที่แท้จริงของสะพานจึงมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับความเป็นจริง

5.3 การทดสอบสะพานจริงเมื่อสะพานอยู่ในสภาวะการใช้งานภายใต้การจราจรปกติ

จากการทดสอบสะพานจริงโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.2 ทำให้สามารถนำค่าสัญญาณการสั่นไหวที่จุดรองรับของคานสะพานซึ่งเป็นปลายคานขวางของสะพานตลอดจนการหาค่าคุณสมบัติของสะพานจากสัญญาณที่ตรวจวัดได้จริง จะถูกนำไปประเมินผลกระทบต่อการสั่นไหวที่เกิดขึ้นกับรถยนต์เมื่อจุดรองรับของสะพานเกิดการสั่นไหว ทั้งนี้การวิเคราะห์และประเมินผลที่เกิดจากการทดสอบด้วยการจำลองสถานการณ์ขึ้นนี้เป็นเพียงแค่การประเมินถึงผลกระทบขั้นต้นเพื่อให้เห็นถึงปัญหาและผลกระทบที่เกิดขึ้นเท่านั้น เนื่องจากในสภาพการใช้งานจริงของสะพานนั้นไม่อนุญาตให้รถบรรทุกวิ่งผ่านสะพานเหล็กข้ามทางแยก อีกทั้งสภาพการจราจรที่เกิดขึ้นบนสะพานเหล็กข้ามทางแยกภายในกรุงเทพมหานครรถยนต์ส่วนมากจะวิ่งผ่านสะพานข้ามทางแยกด้วยความเร็วสูงในทิศทางที่การจราจรคล่องตัว ซึ่งความเร็วที่ใช้ในการทดสอบด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกมีความเร็วสูงสุดที่ 60 km/hr แต่ในความเป็นจริงรถยนต์วิ่งผ่านสะพานข้ามทางแยกด้วยความเร็วที่สูงกว่านั้น เมื่อการจราจรมีความคล่องตัวมาก ทำให้สภาพของปัญหามีความแตกต่างออกไปจากการจำลองสถานการณ์ขึ้นเพื่อทดสอบ ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบสะพานภายใต้สภาพการจราจรปกติเพื่อให้ได้ผลลัพท์วิเคราะห์ที่สอดคล้องและใกล้เคียงสภาวะการจราจรจริงมากที่สุด ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำเสนอรายละเอียดของการทดสอบภายใต้สภาพการจราจรปกติบนสะพานข้ามทางแยก

5.3.1 การเก็บข้อมูลสัญญาณการสั่นไหวของสะพานแบบระยะยาวภายใต้สภาพการจราจรปกติ

การเก็บข้อมูลสัญญาณการสั่นไหวของสะพานภายใต้สภาพการจราจรปกติจะกระทำต่อเนื่องมาจากการทดสอบสะพานจากการจำลองสถานการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก โดยอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณยังคงถูกติดตั้งไว้ในตำแหน่งเดิมแต่มีการบันทึกภาพเหตุการณ์ต่างๆบนสะพานผ่านกล้องวงจรปิดเพื่อสังเกตสภาพการจราจรให้เกิดความสอดคล้องกับสัญญาณ เมื่อสะพานมีการเปิดให้บริการตามปกติอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณจะมีการส่งสัญญาณไปยังเครื่องบันทึกข้อมูลภายในสำนักงานชั่วคราวที่อยู่บริเวณใต้สะพาน เช่นเดียวกับการทดสอบที่ผ่านมาในหัวข้อที่ 5.2 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นบนสะพานซึ่งถูกบันทึกโดยกล้องวงจรปิดพบว่าเหตุการณ์ที่การจราจรในแต่ละทิศทางมีความแตกต่างกันมากจะเกิดขึ้นใน 2 ช่วงเวลากล่าวคือในช่วงเวลาเข้าการจราจรในฝั่งขาเข้า (In Bound) จะมีการจราจรที่ติดขัดในขณะที่การจราจรในฝั่งขาออก (Out Bound) จะมีสภาพการจราจรที่คล่องตัวมากเนื่องจากเนื่องรูปแบบการดำเนินชีวิตของประชากรในเมืองหลวงที่พักอาศัยอยู่บริเวณรอบนอกแต่ก็จะเดินทางเข้ามายังใจกลางกรุงเทพมหานครเพื่อประกอบธุรกิจหรือแม้แต่การเดินทางเข้ามายังสถานศึกษาของนักเรียนและนักศึกษา ทำให้เกิดการจราจรที่หนาแน่นบนสะพานข้ามทางแยกในขาเข้าในทางกลับกันเมื่อถึงช่วงเวลาเย็นการจราจรจะเกิดความหนาแน่นอย่างมากในทิศทางที่สลับกับช่วงเวลาเช้าเนื่องจากประชากรต่างเดินทางกลับไปยังที่พักอาศัยที่ตั้งอยู่บริเวณรอบนอกกรุงเทพมหานครทำให้เกิดการจราจรที่หนาแน่นบนสะพานข้ามทางแยกในขาออก ดังนั้นเหตุการณ์ที่สอดคล้องกับปัญหาที่เกิดขึ้นคือเหตุการณ์ที่กล่าวไว้ข้างต้นทั้ง 2 ช่วงเวลา แต่ในที่นี้จะพิจารณาเพียงช่วงเวลาเย็นเนื่องจากได้มีติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณไว้ในทิศทางขาออก (Out Bound) ซึ่งมีความหนาแน่นอย่างมากของการจราจรในช่วงเย็นในขณะที่ฝั่งกลับกันมีการจราจรที่คล่องตัว

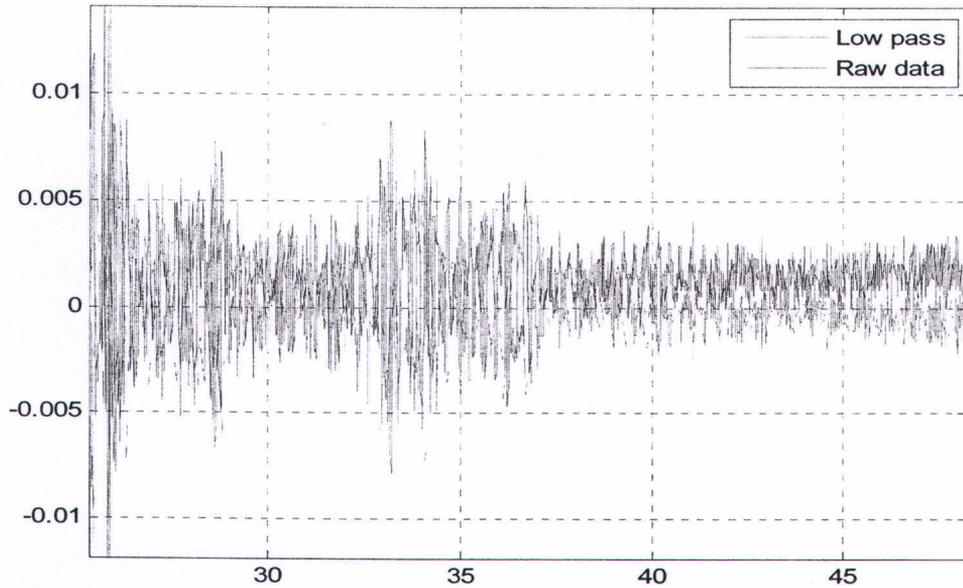


รูปที่ 5.17 การจราจรบนสะพานเหล็กข้ามทางแยกในช่วงเวลาเย็นที่จับภาพโดยกล้องวงจรปิด

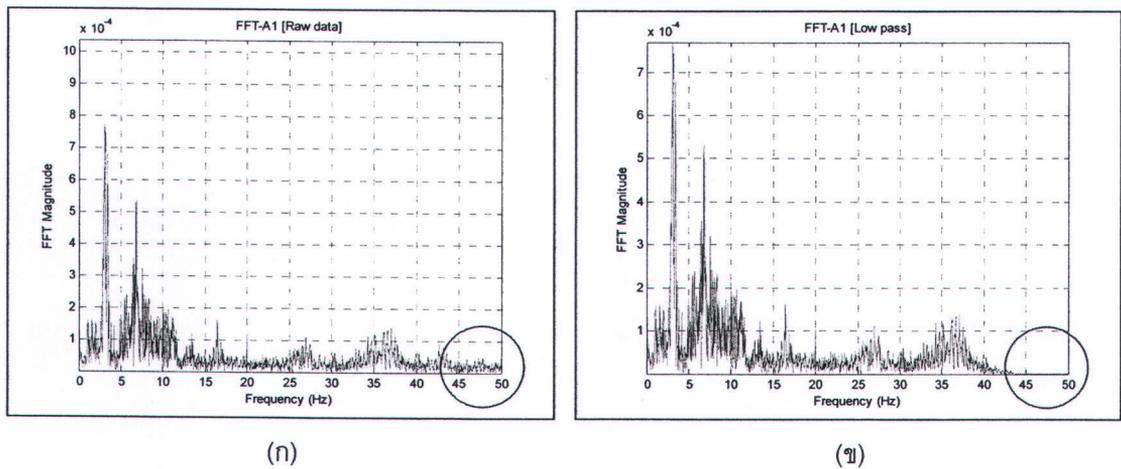
5.4 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการทดสอบสะพานจริง

5.4.1 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการทดสอบสะพานจริงโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก

สัญญาณที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบสะพานจะถูกตรวจจับโดยอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ (sensor) และจะถูกส่งไปยังเครื่องบันทึกสัญญาณดังรูปที่ 5.9 เมื่อการบันทึกข้อมูลเสร็จสิ้นจะมีการนำสัญญาณที่ตรวจวัดได้ดังกล่าวมาทำการแปลงค่าด้วยค่าคงที่ประจำเครื่องมือแต่ละชิ้น (Calibration coefficient number) ให้อยู่ในรูปแบบของหน่วยการวัดสากลตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.2.1 นอกจากนี้ข้อมูลดิบของสัญญาณที่ตรวจวัดได้อาจจะต้องผ่านกระบวนการกรองความถี่แบบดิจิทัล (Digital filter) เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณทุกชนิดเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าจึงมีความเป็นไปได้ว่าจะเกิดสัญญาณรบกวนความถี่สูงจากความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเข้ามาในระหว่างการทดสอบ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องกรองสัญญาณด้วยกระบวนการกรองความถี่แบบดิจิทัลเพื่อขจัดสัญญาณรบกวนดังกล่าว โดยความถี่ที่ใช้ในการกรองเป็นค่าความถี่ที่สูงตั้งนั้นในกระบวนการคัดกรองความถี่นี้จึงไม่ส่งผลกระทบต่อความถี่ธรรมชาติของสะพานในโหมดหลักที่ใช้ในการพิจารณา ซึ่งค่าความถี่ที่พบเห็นได้ทั่วไปจากอุปกรณ์ไฟฟ้าจะมีค่าความถี่ที่สูงกว่า 40 Hz



รูปที่ 5.18 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณความถี่ที่วัดได้ทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการกรองความถี่



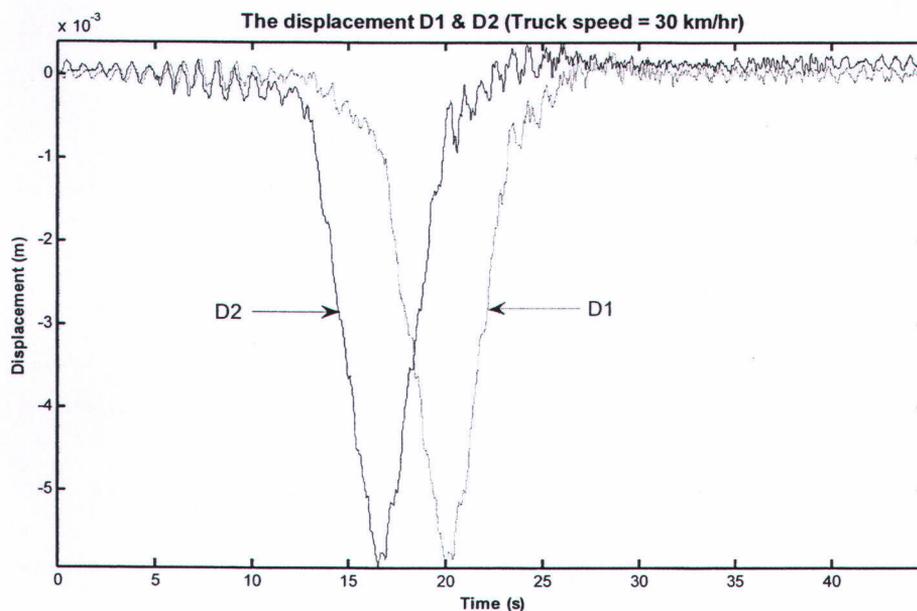
รูปที่ 5.19 การวิเคราะห์ค่าความถี่ของตัวอย่างสัญญาณโดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว

(ก) ความถี่ของตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้ก่อนผ่านกระบวนการกรองความถี่

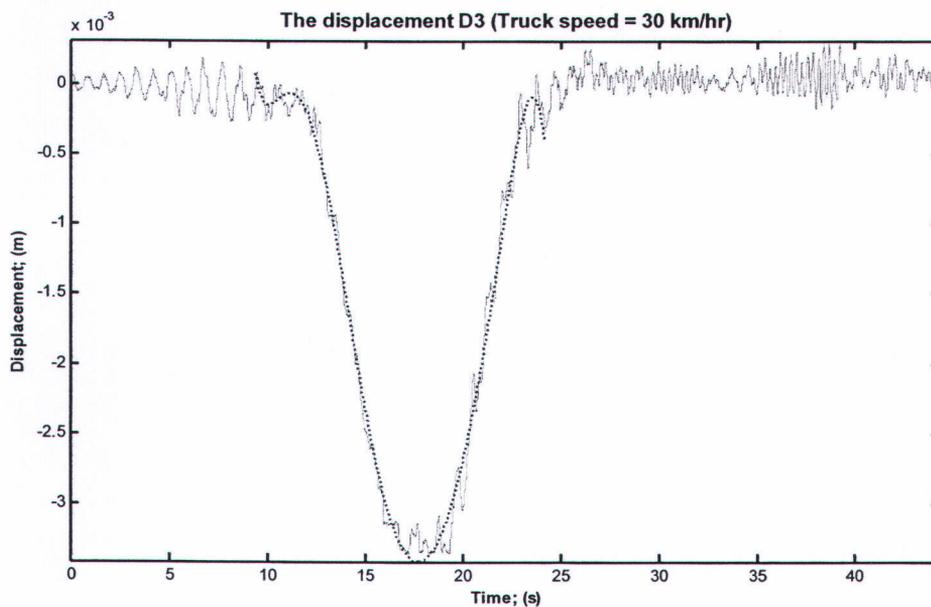
(ข) ความถี่ของตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้หลังผ่านกระบวนการกรองความถี่

จากรูปที่ 5.18 พบว่าสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดโดยที่ยังไม่ผ่านกระบวนการกรองความถี่จะมีลักษณะของสัญญาณที่ไม่ผ่านรอบแกนศูนย์ ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจเกิดขึ้นได้จากอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณที่ใช้หรือขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์ ดังนั้นก่อนที่จะมีการนำสัญญาณดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองจะต้องทำการปรับแก้สัญญาณให้มีรูปแบบที่อยู่ในลักษณะที่ต้องการ ทั้งนี้วิธีการที่ง่ายต่อการปรับแก้และทำได้อย่างรวดเร็วคือการปรับค่าเฉลี่ยของสัญญาณทีละช่วงเพื่อให้สัญญาณมีค่าเฉลี่ยรวมอยู่รอบแกนศูนย์ในแนวนอนได้จากรูปที่ 5.19 พบว่าหลังจากที่สัญญาณผ่านกระบวนการกรองความถี่แล้วความถี่ในช่วงที่สูงกว่า 40 Hz จะมีขนาดสัญญาณที่เท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายความว่าความถี่ในช่วงดังกล่าวถูกคัดกรองออกไปแล้ว ทำให้สัญญาณที่

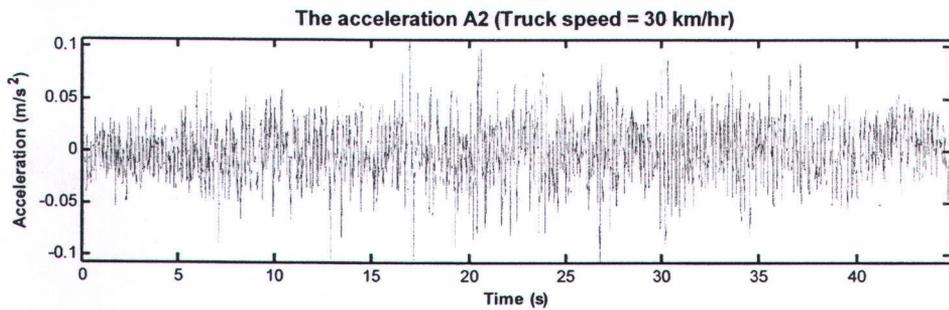
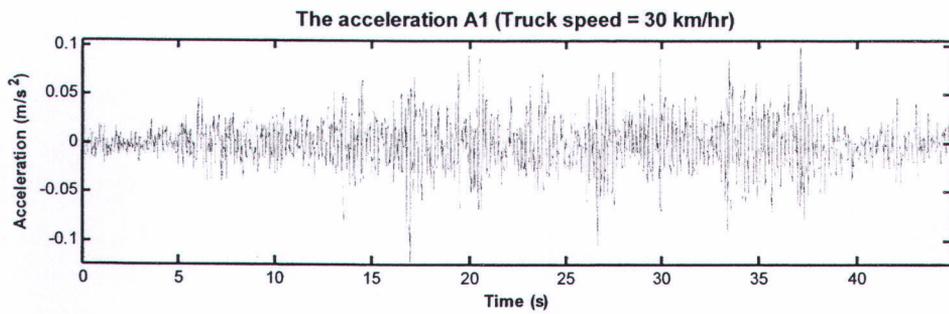
ได้เป็นสัญญาณที่ไม่ถูกรบกวนด้วยความถี่สูงของกระแสไฟฟ้าซึ่งหลังจากการปรับแก้ค่าเฉลี่ยและผ่านกระบวนการคัดกรองความถี่แบบดิจิทัลแล้วสัญญาณจะมีลักษณะเป็นดังสัญญาณเส้นสีแดงในรูปที่ 5.18 จึงสามารถนำสัญญาณดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป



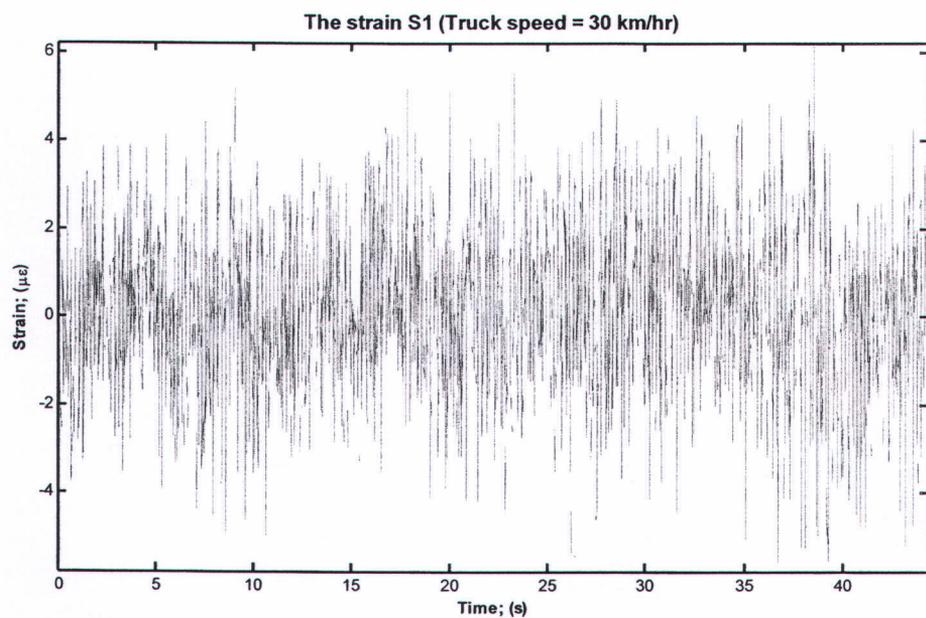
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 5.20 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการทดสอบสะพานจริงโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกด้วยความเร็ว 30 km/hr (ก) สัญญาณการกระจัด (ข) สัญญาณการกระจัดที่กลางช่วงของสะพาน

(ค) สัญญาณความเร่ง (ง) สัญญาณความเครียดที่กลางช่วงของสะพาน

ผลการทดสอบสะพานจริงจากการวิ่งผ่านของรถบรรทุกสามารถสรุปค่าสูงสุด (Peak) และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square; r.m.s.) ของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ดังตารางที่ 5.2

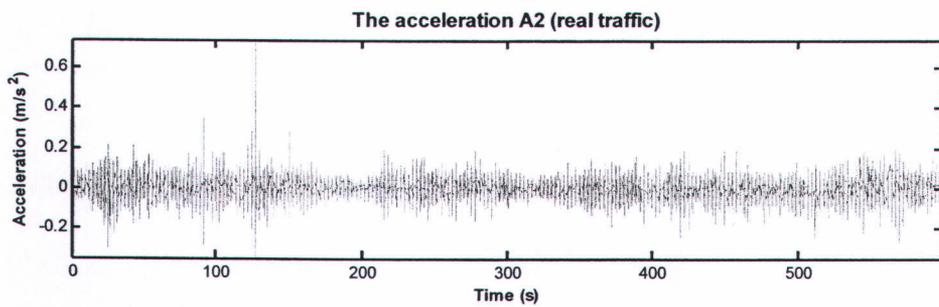
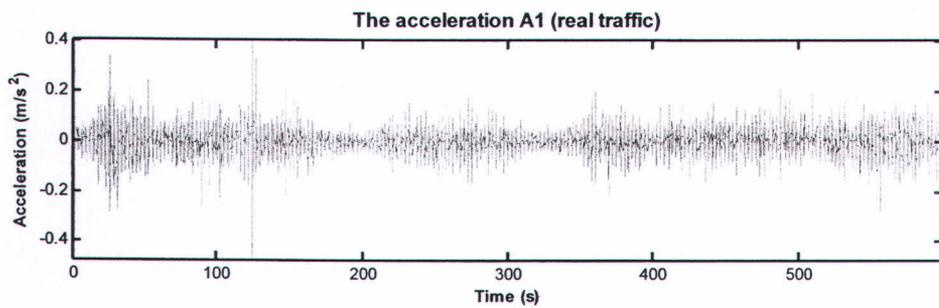
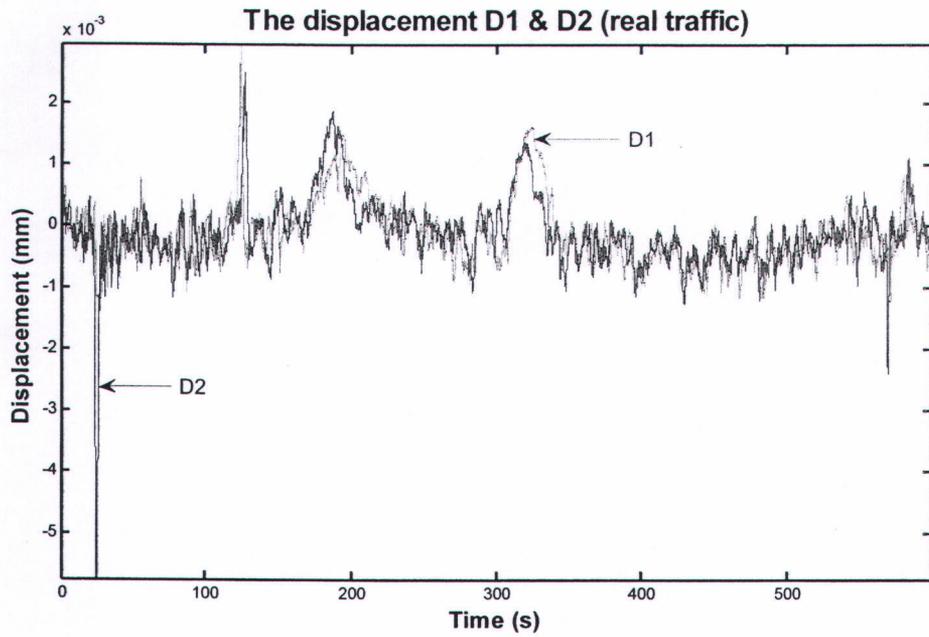


ตารางที่ 5.2 แสดงค่าสูงสุด (Peak) และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square; r.m.s.) ของสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบโดยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก

sensor	5 km/hr		30 km/hr		60 km/hr	
	peak	rms	peak	rms	peak	rms
A1	0.107	0.025	0.124	0.023	0.258	0.031
A2	0.103	0.024	0.107	0.027	0.185	0.028
D1	0.006	0.002	0.006	0.001	0.006	0.001
D2	0.006	0.002	0.006	0.001	0.006	0.001
D3	0.003	0.002	0.003	0.001	0.003	0.001
S3	10.308	2.253	6.207	1.756	9.224	2.190

5.4.2 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการทดสอบสะพานจริงภายใต้สภาพการจราจรปกติ

สัญญาณที่ตรวจวัดได้จากสะพานข้ามทางแยกในกรณีที่มีสภาพการใช้งานตามปกติเป็นสัญญาณที่เก็บรวบรวมเป็นระยะเวลาต่อเนื่องที่ยาวนาน โดยเก็บรวบรวมทั้งหมดเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์เพื่อให้ได้ทราบถึงลักษณะของการจราจรที่แตกต่างออกไปตามช่วงเวลา ซึ่งเมื่อสังเกตเหตุการณ์ตลอดช่วงเวลาที่มีการเก็บสัญญาณจากกล้องบันทึกวงจรปิดพบว่า พฤติกรรมทางการจราจรบนสะพานหลักข้ามทางแยกมีความสอดคล้องกับเหตุการณ์ที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.3.1 กล่าวคือการจราจรทั้งสองทิศทางจะมีความหนาแน่นทางการจราจรที่แตกต่างกันมากในช่วงเวลาเช้าและช่วงเวลาเย็นของแต่ละวัน ซึ่งทำให้ช่วงเวลาที่ทำการพิจารณาสัญญาณถูกจำกัดด้วยเหตุการณ์ที่สอดคล้องกับปัญหาที่ทำการวิจัยอยู่ นอกจากนี้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณได้ถูกติดตั้งอยู่ในทิศทางจราจรฝั่งขาออก (Out bound) ด้วยเหตุนี้จึงทำการพิจารณาเฉพาะเหตุการณ์ที่อยู่ในช่วงเวลาตอนเย็นของแต่ละวันเท่านั้น ทั้งนี้การพิจารณาสัญญาณตลอดช่วงเวลาที่รถยนต์จอดติดอยู่บนสะพานข้ามทางแยกอาจทำให้ต้องใช้ระยะเวลาอย่างมากในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เนื่องจากข้อมูลสัญญาณที่เก็บบันทึกได้ตลอดช่วงเวลาที่มีความหนาแน่นทางการจราจรในแต่ละทิศทางแตกต่างกันนั้น มีช่วงสัญญาณที่ยาวนานพอสมควร และเพื่อให้สอดคล้องกับการประเมินผลกระทบจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นตามมาตรฐาน ISO 2631-1 ที่นำเสนอเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินในส่วนของสุขภาพอนามัยด้วยการพิจารณาการอยู่ภายใต้สภาวะการสั่นสะเทือนที่เวลา 10 นาทีเป็นช่วงเวลาเริ่มต้น ดังนั้นจึงทำการค้นหาสัญญาณในช่วงเวลา 10 นาทีที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการเป็นตัวแทนสัญญาณสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น โดยมีหลักการพิจารณาถึงค่าสูงสุด (Peak response) และค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS) ของสัญญาณประกอบกับกล้องวงจรปิดที่บันทึกได้ เนื่องจากต้องการพิจารณาเพียงเหตุการณ์ที่การจราจรหนาแน่นเพียงข้างใดข้างหนึ่งเท่านั้นซึ่งอาจมีบางเหตุการณ์ที่การจราจรมีความคล่องตัวทั้งสองทิศทางพาหนะที่วิ่งอยู่บนสะพานจึงใช้ความเร็วสูงในการวิ่งผ่านด้วยกันทั้งสองทิศทางจึงจำเป็นต้องใช้กล้องวงจรปิดที่บันทึกได้เป็นเครื่องมือในการพิจารณาร่วมในการคัดเลือกสัญญาณที่เหมาะสม



รูปที่ 5.21 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการทดสอบสะพานจริงภายใต้สภาพการจราจรปกติ

(ก) สัญญาณการกระจัด (ข) สัญญาณความเร่ง

จากรูปที่ 5.21 (ก) และ (ข) แสดงตัวอย่างสัญญาณที่ใช้เป็นตัวอย่างเป็นระยะเวลา 10 นาที สามารถสรุปค่าสูงสุด (Peak) และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square; r.m.s.) ของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าสูงสุด (Peak) และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square; r.m.s.) ของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ภายใต้การจราจรปกติ

sensor	peak	rms
A1	0.474	0.033
A2	0.739	0.037
D1	0.003	0.001
D2	0.006	0.001

ซึ่งจากการสังเกตลักษณะของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ภายใต้การจราจรปกติพบว่ามีความแตกต่างจากสัญญาณที่ตรวจวัดได้โดยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกในทิศทางตรงข้าม โดยในรูปที่ 5.21 (ก) ค่าการกระจัดสูงสุดในบางช่วงของเวลาที่มีการกลับทิศทางของสัญญาณ ซึ่งหากพิจารณาตามรูปที่ 5.5 พบว่าทิศทางการวิ่งผ่านของรถยนต์ในฝั่งขาเข้าเมืองจะผ่านตำแหน่งที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการกระจัดหรือ DT หมายเลข D2 ก่อนดังนั้นสัญญาณการกระจัดที่ตำแหน่งนี้จะมีการกลับทิศทางนั้นหมายความว่าเมื่อรถยนต์วิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามของการจราจรซึ่งในที่นี้คือฝั่งขาเข้าเมืองจะเกิดการกดทับที่ปลายคานขวางในทิศทางดังกล่าวในขณะที่เดียวกันนี้ปลายคานขวางที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณก็จะเกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งสวนทางกับฝั่งตรงข้ามแต่เนื่องจากการจราจรในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณนั้นมีความคล่องตัวมากจึงเกิดลักษณะดังกล่าวไม่บ่อยครั้งนักในช่วงสัญญาณที่เลือกใช้เป็นตัวแทนในช่วง 10 นาที ซึ่งจากการคัดเลือกสัญญาณตัวแทนในช่วงเวลา 10 นาทีที่เหมาะสมพบว่าสัญญาณที่เลือกใช้จะต้องมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับปัญหาที่กำลังทำการศึกษาอยู่ กล่าวคือสัญญาณดังกล่าวจะต้องเป็นสัญญาณที่ตรวจจับได้ในช่วงเวลาที่มีการจราจรหนาแน่นจนถึงขั้นติดขัดในทิศทางที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณในขณะที่ทิศทางฝั่งตรงกันข้ามก็จะต้องมีสภาพการจราจรที่คล่องตัวอย่างมากในเวลาเดียวกันนี้ ซึ่งจากการพิจารณาร่วมกับสัญญาณภาพจากกล้องวงจรปิดที่ติดตั้งไว้ในมุมสูงบนสะพานพบว่าสัญญาณที่เลือกใช้เป็นตัวแทนนี้เกิดขึ้นในสถานการณ์ดังกล่าว นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงค่าสูงสุดและค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของสัญญาณที่เลือกใช้ซึ่งพบว่ามีค่าสูงกว่าสัญญาณในช่วงเวลาอื่นๆ ดังนั้นสัญญาณที่เลือกใช้จึงเป็นสัญญาณที่มีความเหมาะสมและสอดคล้องกับปัญหาของการศึกษาในครั้งนี้