บทที่ 5

การปรับเทียบแบบจำลองย่อส่วน

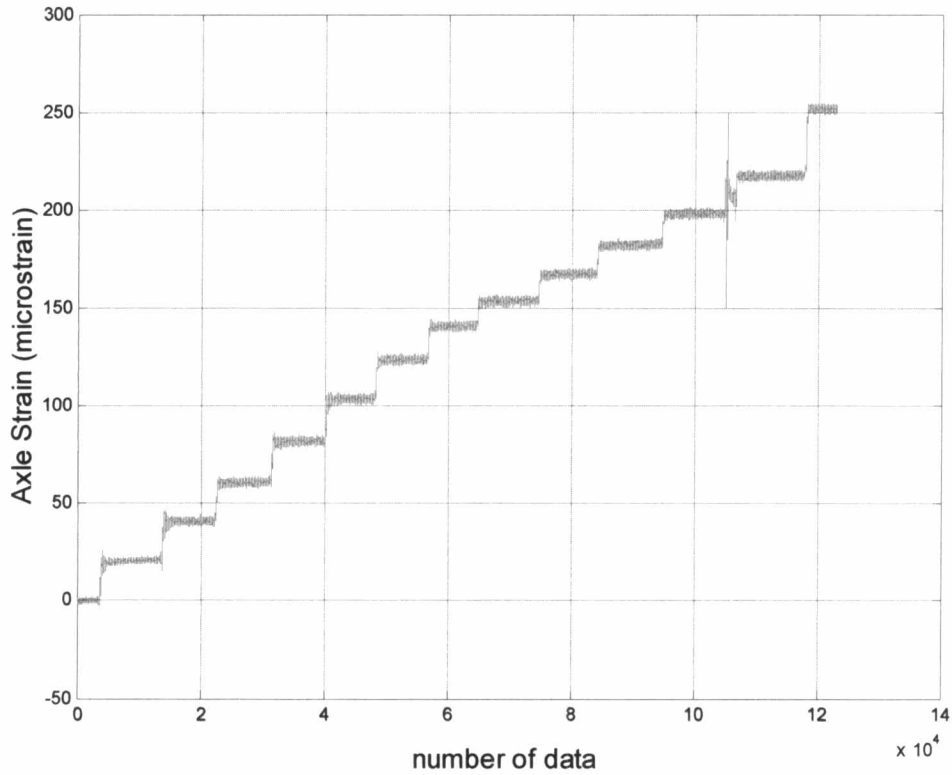
ในบทนี้จะได้กล่าวถึงวิธีการหาคุณสมบัติพื้นฐานของสะพาน และการปรับเทียบ (calibration) แบบ จำลองย่อส่วนของรถและสะพาน รวมทั้งระเบียบวิธีในการเก็บข้อมูลก่อนที่จะนำไปใช้ในการทดสอบเพื่อหาน้ำหนักรถบรรทุก

5.1 การปรับเทียบแบบจำลองรถบรรทุก

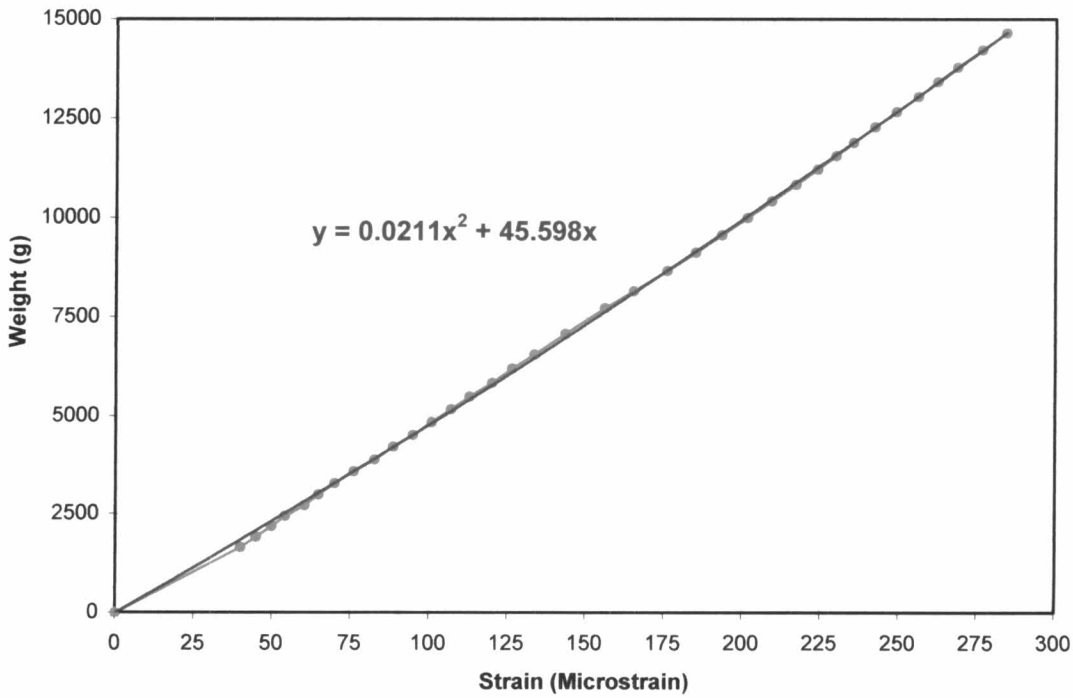
เนื่องจากแบบจำลองรถบรรทุก ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงพลศาสตร์ (Dynamics Axle Force Detector) ในล้อรถไว้ จึงต้องมีการปรับเทียบค่าความเครียดที่อุปกรณ์ดังกล่าวอ่านค่าได้ให้มีความถูกต้องแม่นยำและละเอียดพอที่จะนำไปอ้างอิงเป็นแรงทางพลศาสตร์ของรถขณะเคลื่อนที่ โดยมีหลักในการปรับเทียบด้วยการวัดความเครียดที่อ่านค่าได้กับแรงทางสถิตที่กระทำกับล้อรถ ลักษณะการปรับเทียบของแบบจำลองรถบรรทุกได้แสดงดังรูปที่ 5.1 โดยใช้ตาชั่งแบบดิจิตอลซึ่งมีความละเอียดถึง 1 กรัมในการอ่านค่าแรงที่กระทำต่อล้อรถ

รูปที่ 5.1 ลักษณะการให้แรงกระทำทางสถิตสำหรับการปรับเทียบแบบจำลองรถบรรทุก

โดยทำการบันทึกค่าน้ำหนักที่กระทำต่อล้อจากตาชั่งและบันทึกค่าความเครียดจาก Dynamics Axle Force Detector ไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งลักษณะของสัญญาณความเครียดที่เก็บวัดได้แสดงดังรูปที่ 5.2 จากนั้นนำค่าความเครียดที่เก็บวัดได้กับน้ำหนักที่กระทำต่อล้อมาพล็อตกราฟ และหาฟังก์ชันของเส้นกราฟ ซึ่งจะได้กราฟสำหรับใช้ในการหาค่าแรงกระทำในล้อรถแต่ละล้อ โดยที่แรงทางพลศาสตร์ในเพลารถจะได้มากจากผลรวมของแรงทางพลศาสตร์ในคู่ล้อแต่ละคู่รวมกัน ตัวอย่างของสมการที่ใช้ในการปรับเทียบรวมทั้งลักษณะของกราฟของล้อรถแสดงไว้ในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 ลักษณะสัญญาณความเครียดที่เก็บวัดได้จากการปรับเทียบด้วยแรงกระทำทางสถิต



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างกราฟและฟังก์ชันสำหรับใช้ปรับเทียบเพื่อหาค่าแรงทางพลศาสตร์ในล้อหมายเลข 1

จากนั้นเพื่อตรวจสอบการทำงานของ Detector จึงนำแบบจำลองรถมาทดลองวิ่งบนสะพานที่มีพื้นผิวเรียบ และเปรียบเทียบค่าน้ำหนักที่วัดได้กับน้ำหนักรถที่ชั่งจริง ซึ่งพบว่ามีความแม่นยำที่ดีเมื่อรถมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำและมีความแม่นยำลดลงเมื่อรถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมาก ซึ่งสำหรับกรณีทั่วไปพบว่ามีความแตกต่างไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์จากน้ำหนักรถที่อ่านได้จากตาชั่ง

5.2 การปรับเทียบแบบจำลองสะพาน

เนื่องจากในโปรแกรมที่ใช้ในการหาน้ำหนักนั้นจะทำการคำนวณจากค่าที่เก็บวัดได้ $\mathbf{d}$ ของสะพาน ซึ่งจะเป็นค่าความเครียดหรือโมเมนต์ดัดของสะพานตามตำแหน่งที่ได้ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียดไว้ ซึ่งค่าความเครียดหรือโมเมนต์ดัดนี้จะมีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองของสะพาน $\mathbf{X}$ (การเปลี่ยนตำแหน่งและความเร็วของการสั่นไหว) ดังสมการที่ (2.37) โดยค่าที่เก็บวัดกับผลตอบสนองของสะพานถูกเชื่อมโยงด้วยเมตริกซ์ $\mathbf{Q}$ ซึ่งจะเปรียบเสมือนค่าสติฟเนสของสะพาน โดยมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของสะพาน ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย และความยาวของสะพานแฝงอยู่

ดังนั้นก่อนที่จะทำการทดสอบนั้น จำเป็นจะต้องทำการปรับเทียบแบบจำลอง เนื่องจากแบบจำลองย่อส่วนสะพานที่ใช้ในการทดสอบ และสะพานที่จะทำการทดสอบในงานจริงนั้น ค่าสติฟเนสของสะพานอาจจะมีค่าไม่คงที่หรือมีค่าไม่เป็นไปตามทฤษฎีเนื่องจากผลของคุณสมบัติของวัสดุ (ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก) และผลของความไม่สม่ำเสมอของขนาดหน้าตัด (ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย) จึงต้องมีการปรับเทียบโดยการหาค่าพารามิเตอร์มาปรับเทียบค่าสติฟเนส โดยนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเข้าไปคูณกับเมตริกซ์ของการวัดก่อนที่จะนำไปทายน้ำหนักดังแสดงในสมการที่ (5.1) เพื่อให้ค่าที่เก็บวัดมาได้มีความถูกต้อง ก่อนที่จะเข้าสู่ขั้นตอนการหาน้ำหนักต่อไป

$$\mathbf{d}_{input} = \alpha \mathbf{d}_{measured} \tag{5.1}$$

โดยที่ $\mathbf{d}_{measured}$ คือ เวคเตอร์ของการวัด

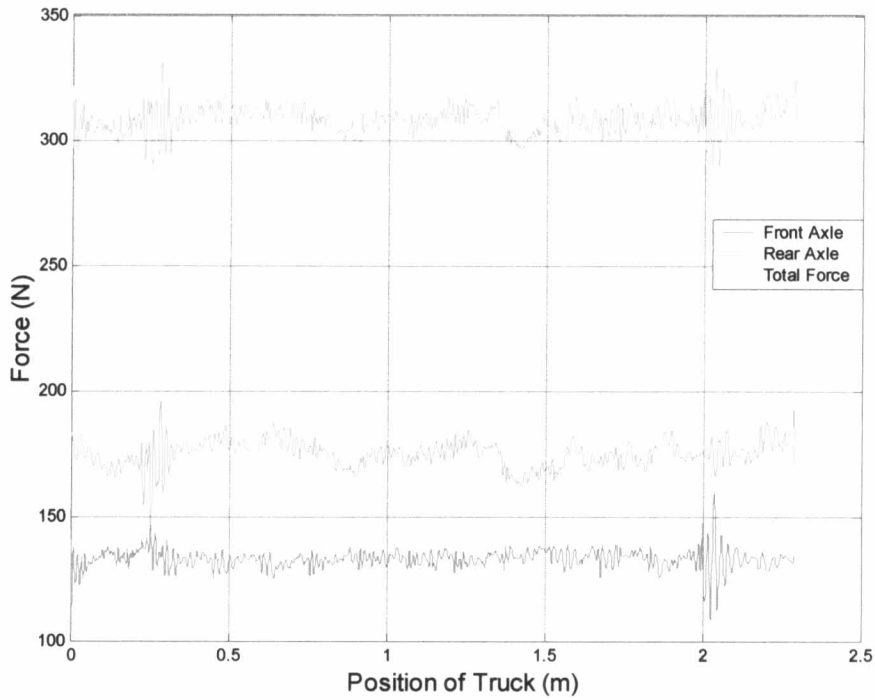
$\mathbf{d}_{input}$ คือ เวคเตอร์ของการวัดหลังจากผ่านการปรับเทียบแล้ว

α คือ พารามิเตอร์ค่าปรับเทียบ

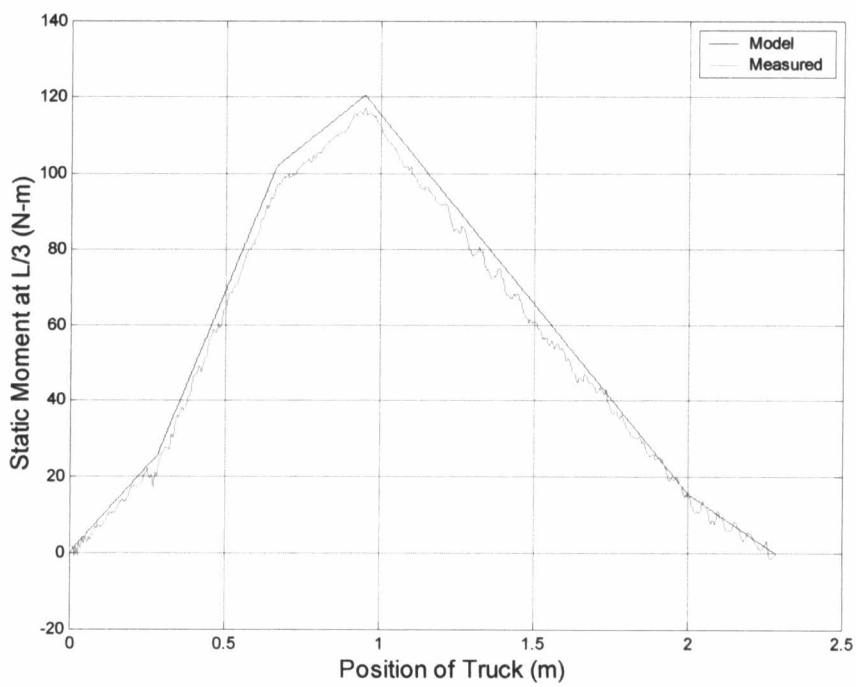
5.2.1 การปรับเทียบแบบจำลองสะพานช่วงเดียว

เพื่อให้ค่าที่เก็บวัดมาได้มีค่าที่ถูกต้องมากที่สุด ดังนั้นการปรับเทียบจะทำการสร้างเส้นอินฟลูเอนซ์ไลน์ของโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในแต่ละหน้าตัดสะพานที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด เมื่อทำการวิ่งแบบจำลองรถบรรทุกด้วยความเร็วที่ต่ำมาก ๆ (ไม่เกิน 1.0 เมตร/วินาที) เพื่อให้ค่าโมเมนต์ดัดที่ได้มีผลจากแรงทางพลศาสตร์น้อยที่สุด โดยค่าแรงที่เกิดขึ้นในเพลารถนั้นแสดงดังรูปที่ 5.4 และน้ำหนักของรถจะอ้างอิงจากค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดแรงทางพลศาสตร์ที่เพลารถ (Dynamics Axle Force Detector) โดยทำการหาค่าเฉลี่ยของค่าแรงทางพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นในแต่ละเพลาให้เป็นค่าแรงทางสถิต ซึ่งก็คือน้ำหนักของรถในแต่ละเพลานั่นเอง เส้นอินฟลูเอนซ์ไลน์ของโมเมนต์ดัดที่

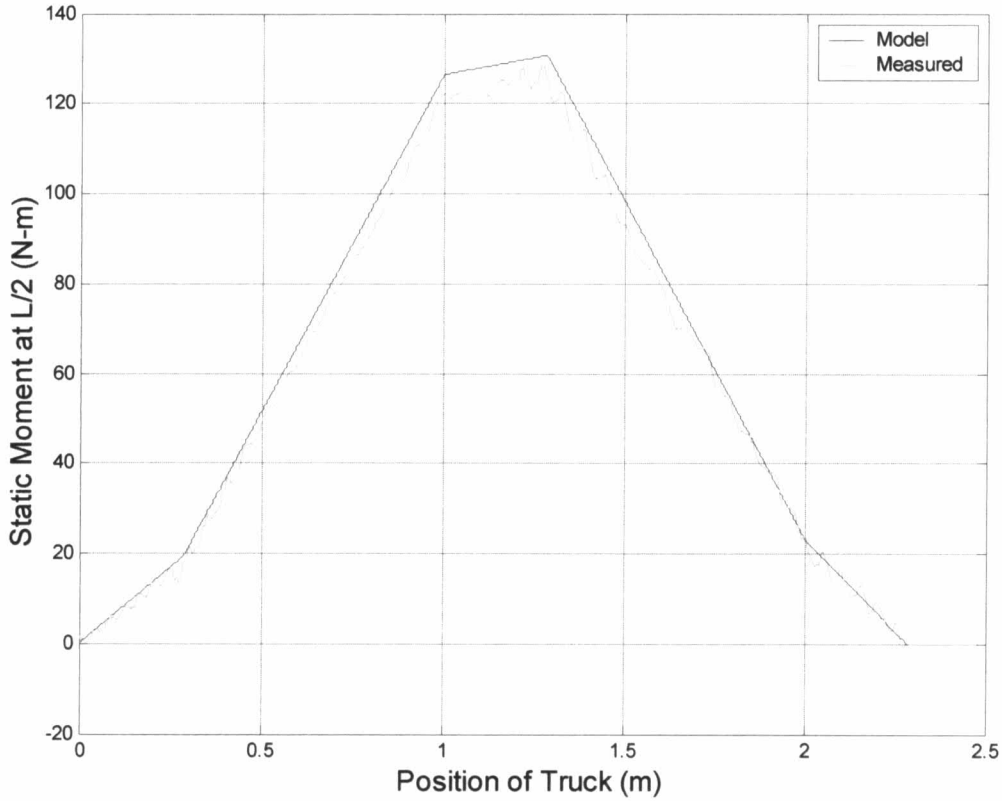
หาได้ในแต่ละหน้าตัดสะพานแสดงดังรูปที่ 5.5 ถึง 5.7 โดยจะทำการทดสอบ 3 กรณีด้วยกัน ประกอบด้วยการทดสอบการวิ่งรถด้วยความเร็วช้าของรถที่มีน้ำหนักแตกต่างกัน 3 รูปแบบคือ 10 กก., 20 กก. และ 30 กก. เพื่อให้ค่าพารามิเตอร์ α ที่หาได้มีค่าที่คลอบคลุมกับรูปแบบการทดสอบมากที่สุด และหากนำค่าโมเมนต์ดัดที่เก็บวัดได้ซึ่งยังไม่ได้ทำการปรับแก้นี้ไปเข้าสู่ขั้นตอนการหาน้ำหนัก ค่าแรงที่ทายได้จะมีค่าดังรูปที่ 5.8 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแรงที่เกิดขึ้นจริงและมีความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมเท่ากับ -7.256%, -6.118% และ -4.317% ตามลำดับ



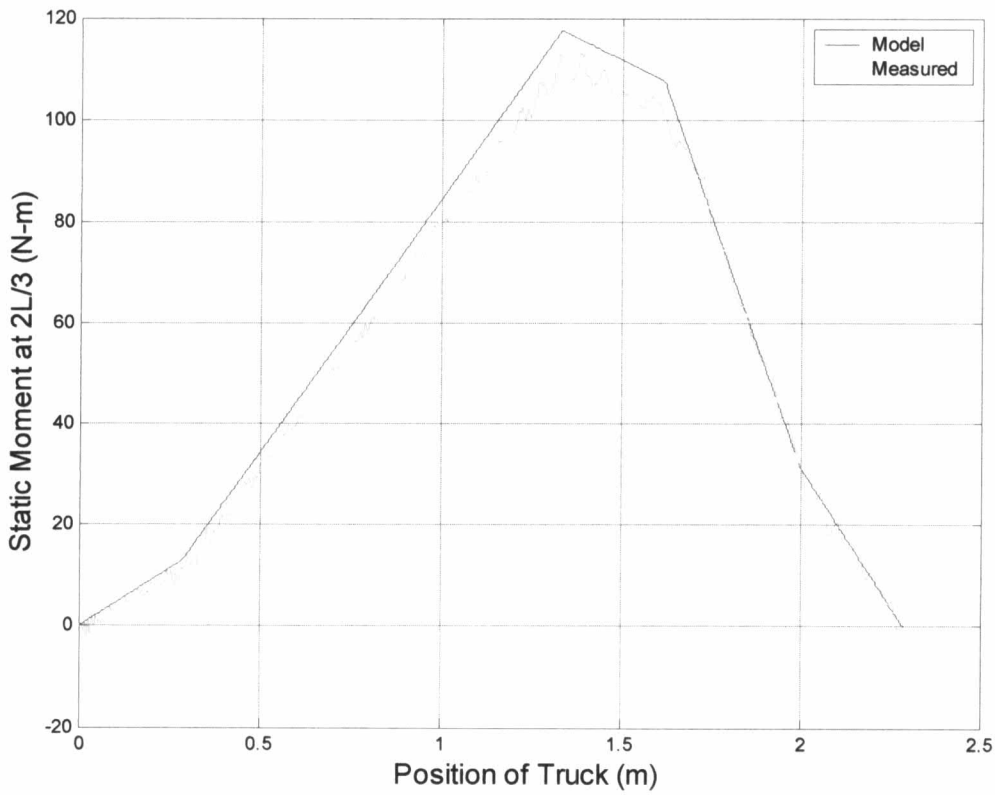
รูปที่ 5.4 ลักษณะของค่าแรงในเพลารถที่เก็บวัดได้จากการวิ่งรถด้วยความเร็วต่ำ



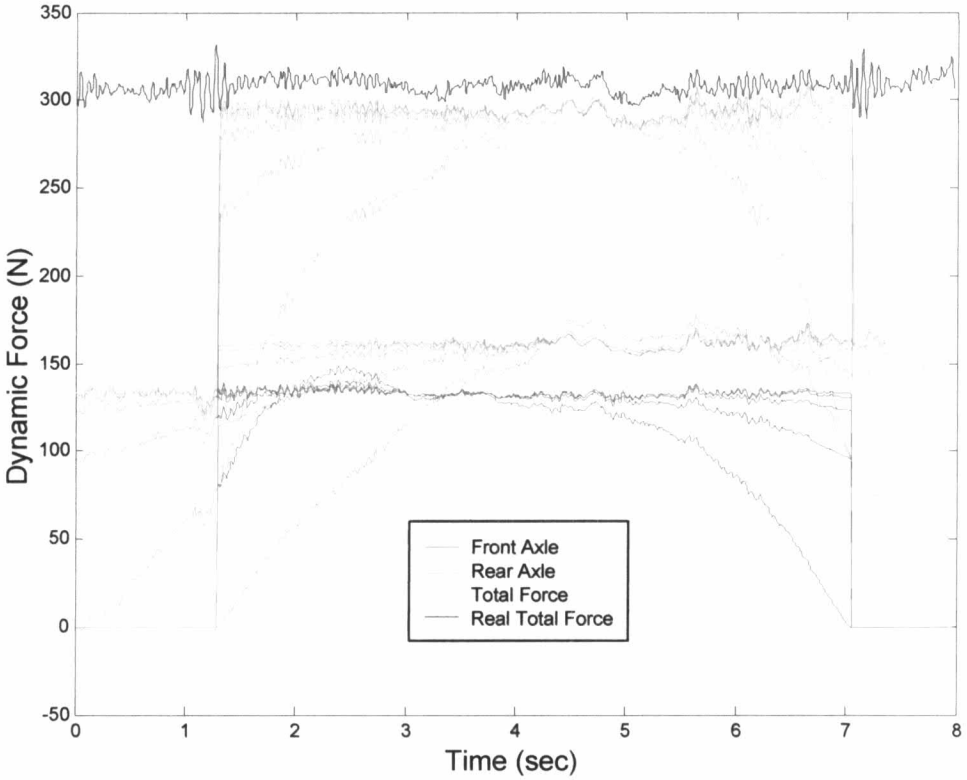
รูปที่ 5.5 ค่าโมเมนต์ที่ตำแหน่ง L/3 ของสะพานก่อนทำการปรับแก้



รูปที่ 5.6 ค่าโมเมนต์ที่ตำแหน่ง L/2 ของสะพานก่อนทำการปรับแก้



รูปที่ 5.7 ค่าโมเมนต์ที่ตำแหน่ง 2L/3 ของสะพานก่อนทำการปรับแก้



รูปที่ 5.8 น้ำหนักเพลาหน้า, เพลาหลังและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ทายได้ก่อนทำการปรับแก้

วิธีที่นำมาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ α นั้นได้เลือกใช้วิธีกาหาค่ายกกำลังสองน้อยที่สุด (Least squares) โดยทำหาค่าผลต่างยกกำลังสองระหว่างค่าเก็บวัดที่ทำการคูณด้วยพารามิเตอร์ α กับค่าเก็บวัดที่ได้จากการสร้างเส้นอินฟลูเอนซ์ไลน์ของแรงทางสถิตจาก Dynamics Axle Force Detector ดังสมการที่ (5.2) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ α ที่ทำให้ได้ค่าผลต่างยกกำลังสองนี้มีค่าน้อยที่สุดก็จะเป็นค่า α ที่เราจะนำไปใช้งาน โดยค่า α นี้จะสามารถหาได้โดยใช้ฟังก์ชันในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) ทั่วไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ฟังก์ชัน "fmins" ของโปรแกรม MATLAB โดยฟังก์ชันนี้จะใช้ระเบียบวิธีเนลเดอร์-มีดซิมเพลกซ์ (Nelder-Mead simplex) ซึ่งเป็นวิธีค้นหาคำตอบโดยตรง (Direct Search) ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด (optimization parameter) จากสมการที่ (5.2) นี้จะเห็นค่ามีเครื่องหมาย Σ เนื่องจากได้ทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) เพื่อหาค่า α จากค่าผลต่างยกกำลังสองของค่าเก็บวัดในแต่ละตำแหน่งที่รถได้เคลื่อนที่บนสะพานรวมกัน

$$E(\alpha)=\sum_{j}\left[\sum_{i=1}^{n}\left(d^{i}_{model}-\alpha d^{i}_{measured}\right)^{2}\right]_{j} \qquad (5.2)$$

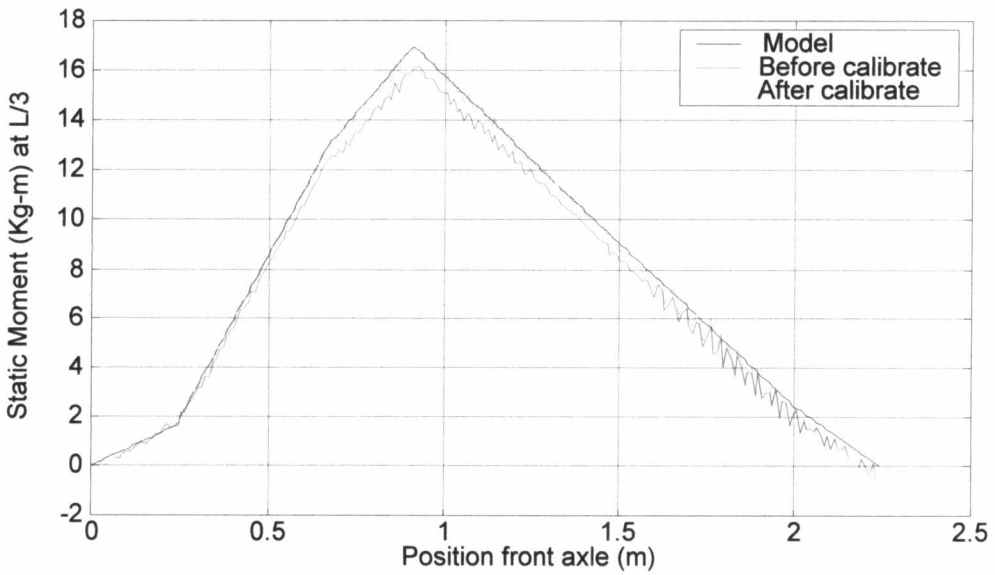
โดยที่ $E(\alpha)$ คือฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function) ของการหาค่าพารามิเตอร์ α

j คือรูปแบบการทดสอบการวิ่งรถบรรทุกด้วยความเร็วช้ามาก ๆ ด้วยน้ำหนักที่แตกต่างกัน (10 กก., 20 กก. และ 30 กก.)

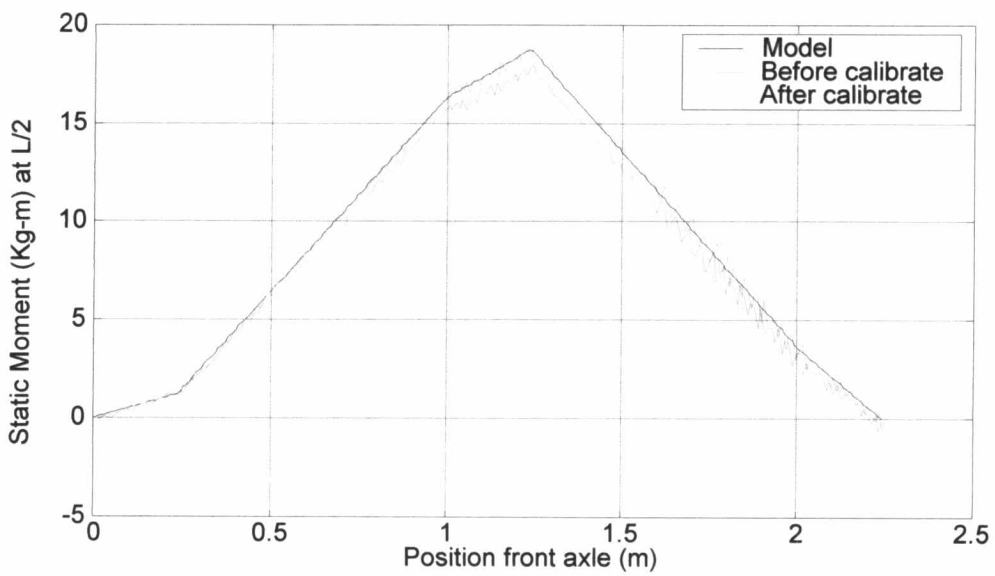
d^i_{model} คือค่าความเครียดหรือโมเมนต์ดัดที่สร้างขึ้น จากค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดแรงทางพลศาสตร์ในเพลารถที่เมื่อรถเคลื่อนที่บนสะพาน ณ ตำแหน่งที่ i

$d^i_{measured}$ คือค่าความเครียดหรือโมเมนต์ดัดที่เก็บวัดได้โดยตรงจากการสะพาน เมื่อรถเคลื่อนที่บนสะพาน ณ ตำแหน่งที่ i

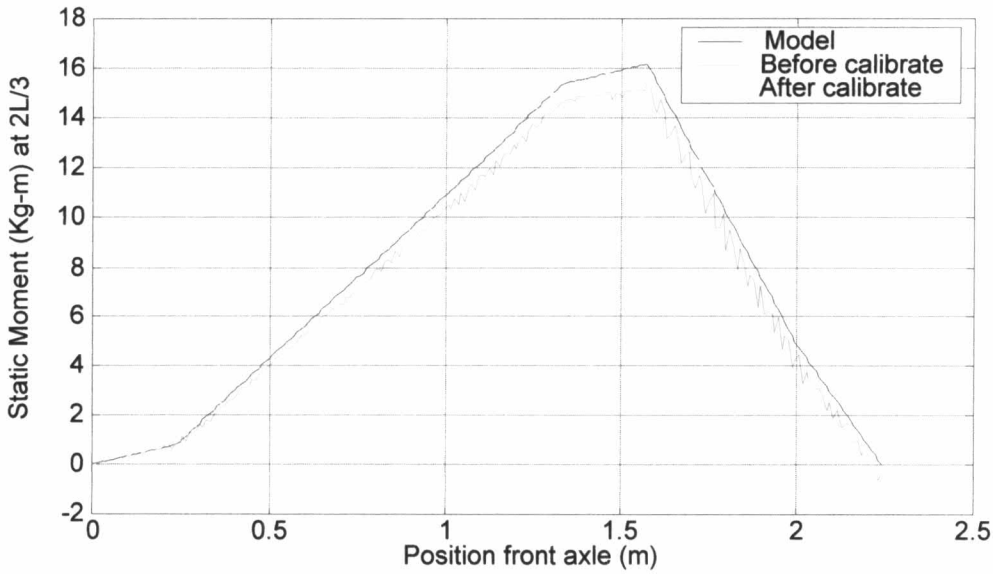
ซึ่งในกรณีนี้เป็นการหาค่าพารามิเตอร์ปรับเทียบของสะพานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบธรรมดา และสามารถหาค่าพารามิเตอร์ปรับเทียบ α ได้เท่ากับ 1.053 และเมื่อนำค่าโมเมนต์ที่เก็บวัดได้มาทำการปรับแก้ จะได้ลักษณะของเส้นอินฟลูเอนซ์ไลน์ของโมเมนต์ดัดที่ปรับแก้แล้วในแต่ละหน้าตัดสะพานดังรูปที่ 5.9 ถึง 5.11



รูปที่ 5.9 ค่าโมเมนต์หลังจากปรับแก้ที่ตำแหน่ง L/3 ของสะพาน

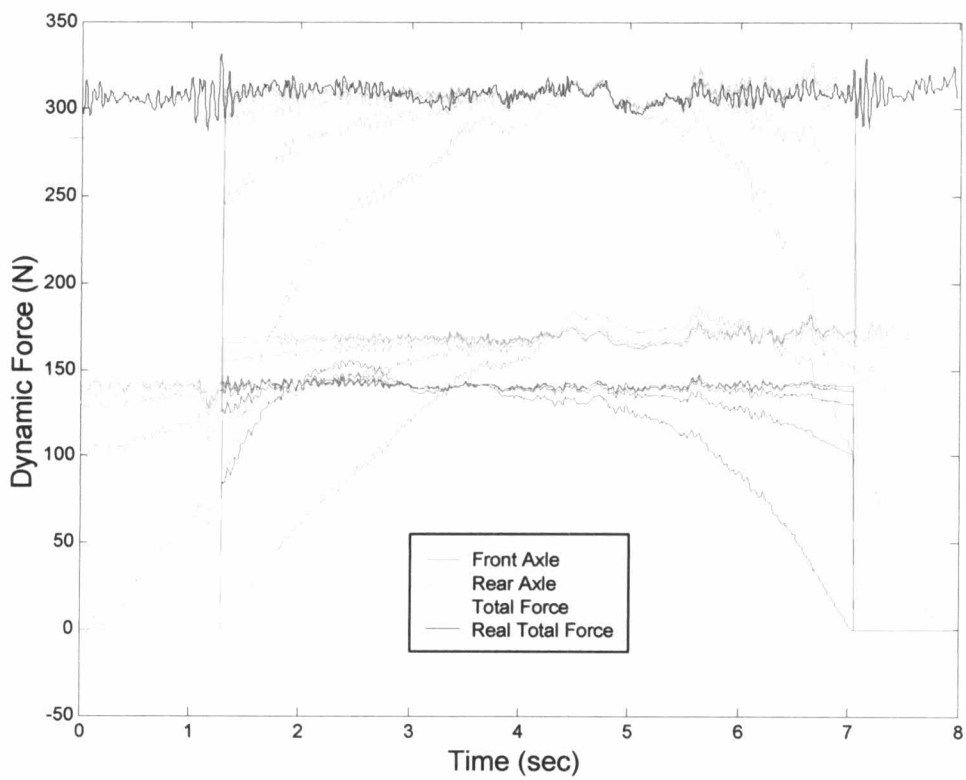


รูปที่ 5.10 ค่าโมเมนต์หลังจากปรับแก้ที่ตำแหน่ง L/2 ของสะพาน



รูปที่ 5.11 ค่าโมเมนต์หลังจากปรับแก้ที่ตำแหน่ง 2L/3 ของสะพาน

และเมื่อนำค่าความเครียดหรือโมเมนต์ดัดที่ทำการปรับแก้แล้วไปเข้าสู่ขั้นตอนการหาน้ำหนัก ค่าแรงที่ทายได้จะมีค่าดังรูปที่ 5.12 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมสำหรับกรณีที่รถมีน้ำหนักเท่ากับ 10 กก., 20 กก. และ 30กก. เท่ากับ 1.531 %, -1.587% และ -0.295% ตามลำดับ



รูปที่ 5.12 น้ำหนักเพลาหน้า เพลาหลังและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกทางพลศาสตร์หลังจากทำการปรับแก้

5.2.2 การปรับเทียบแบบจำลองสะพานต่อเนื่อง

สำหรับการปรับเทียบสำหรับแบบจำลองสะพานแบบต่อเนื่อง มีหลักการเช่นเดียวกันกับการปรับเทียบสำหรับแบบจำลองสะพานช่วงเดียว เพียงแต่จะมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเพิ่มขึ้นคือ ค่าสติฟเนสของข้อหมุนสปริงทั้งสองข้างที่ได้จำลองขึ้นในการวิเคราะห์ ทำให้มีตัวแปรที่จะต้องทำการปรับเทียบเพิ่มขึ้นเป็น 3 ค่านั่นคือ ค่าพารามิเตอร์ปรับเทียบจากผลของคุณสมบัติสะพาน α , ค่าสติฟเนสของข้อหมุนสปริงทั้งสองข้าง k_1 , k_2 แต่จุดสำคัญของการปรับเทียบในกรณีนี้คือตำแหน่งของรถบนสะพานที่สามารถนำมาปรับเทียบจะพิจารณาเฉพาะช่วงที่ทั้งเพลาหน้าและเพลาหลังของรถบรรทุกอยู่บนช่วงสะพานหลักเท่านั้น ฟังก์ชันเป้าหมายของการปรับเทียบในกรณีนี้จะอยู่ในเทอมของทั้ง α , k_1 และ k_2 ดังสมการที่ (5.3) และเมื่อทำการปรับเทียบแล้วจะได้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.1 ซึ่งเมื่อนำค่าปรับเทียบไปสร้างเส้นอินฟลูเอนซ์ไลน์จะได้ลักษณะดังรูปที่ 5.13 ถึง 5.14

$$E(\alpha,k_1,k_2)=\sum_{j}\left[\sum_{i=n_S}^{n_L}\left(d^i_{model}-\alpha d^i_{measured}\right)^2\right]_j \qquad (5.3)$$

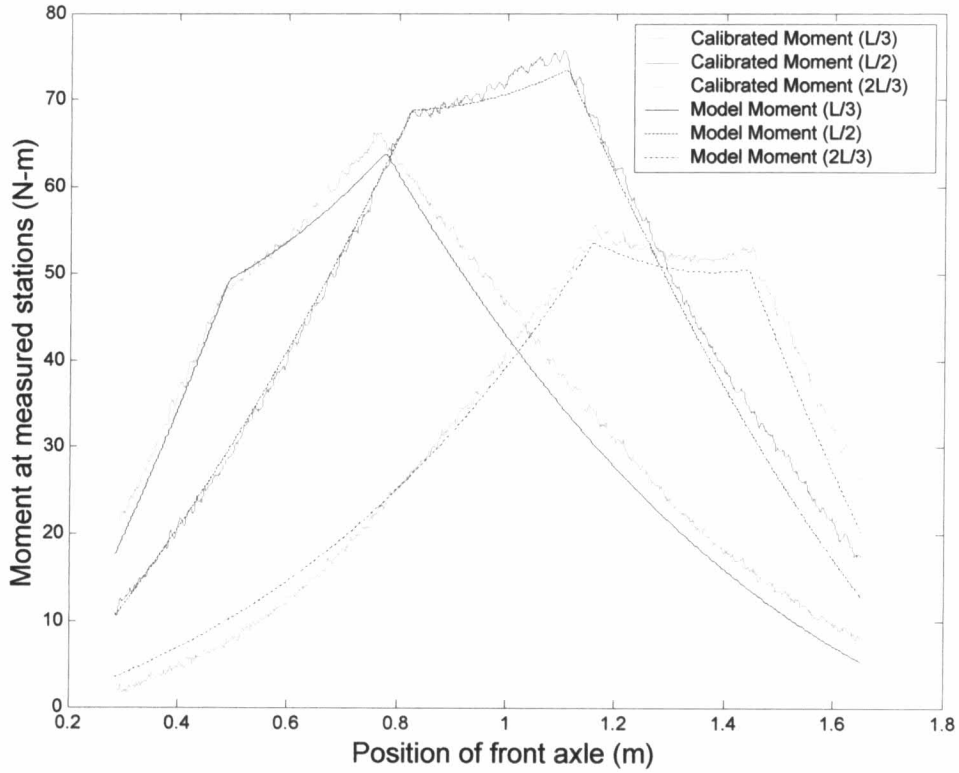
โดยที่ $E(\alpha,k_1,k_2)$ คือฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function) ของการหาค่าปรับเทียบ

n_s คือตำแหน่งข้อมูลของค่าเก็บวัดเมื่อเพลาหลังของรถเคลื่อนที่เข้าสู่สะพานช่วงหลัก

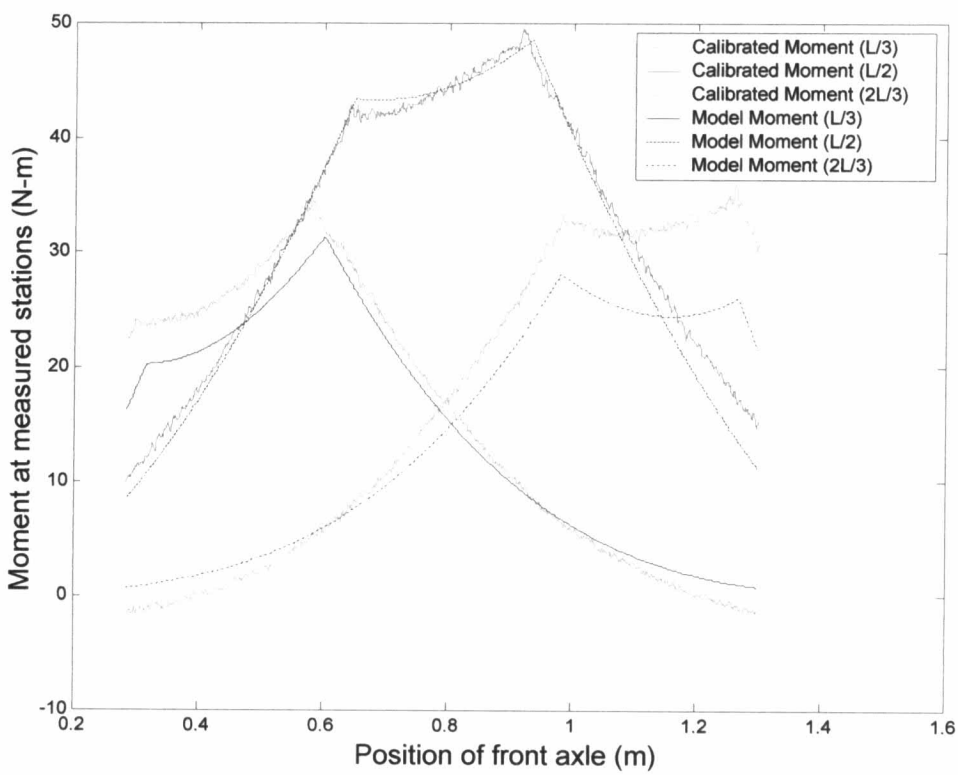
n_L คือตำแหน่งข้อมูลของค่าเก็บวัดเมื่อเพลาหน้าของรถกำลังเคลื่อนที่ออกจากสะพานช่วงหลัก

ตารางที่ 5.1 ค่าปรับเทียบของแบบจำลองสะพานต่อเนื่อง

รูปแบบของสะพานต่อเนื่อง	α	k_1 (N-m/rad)	k_2 (N-m/rad)
กรณี Continuity index = 0.79	0.926	9309	16657
กรณี Continuity index = 0.69	0.955	31747	30448



รูปที่ 5.13 ค่าโมเมนต์ของหน้าตัดสะพานหลังจากปรับแก้ กรณีสะพานมีค่า Continuity index เท่ากับ 0.8

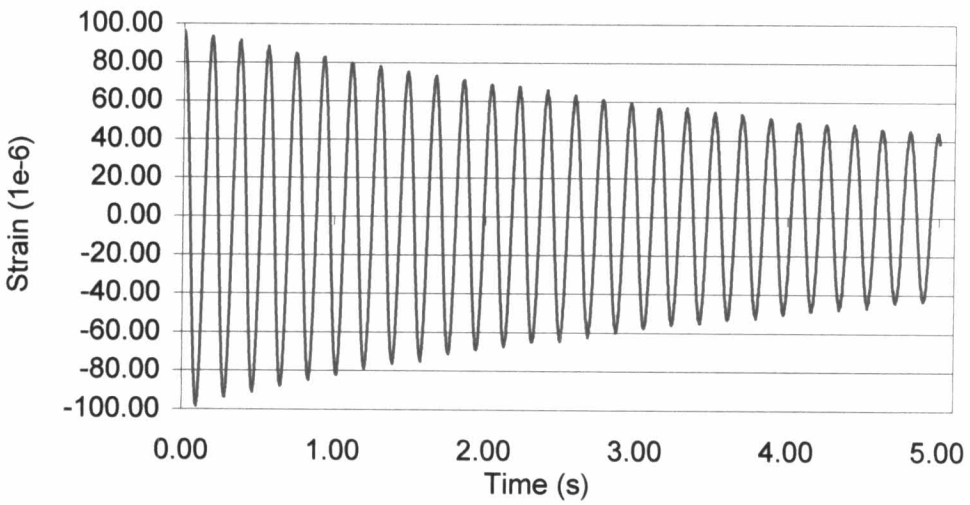


รูปที่ 5.14 ค่าโมเมนต์ของหน้าตัดสะพานหลังจากปรับแก้ กรณีสะพานมีค่า Continuity index เท่ากับ 0.7

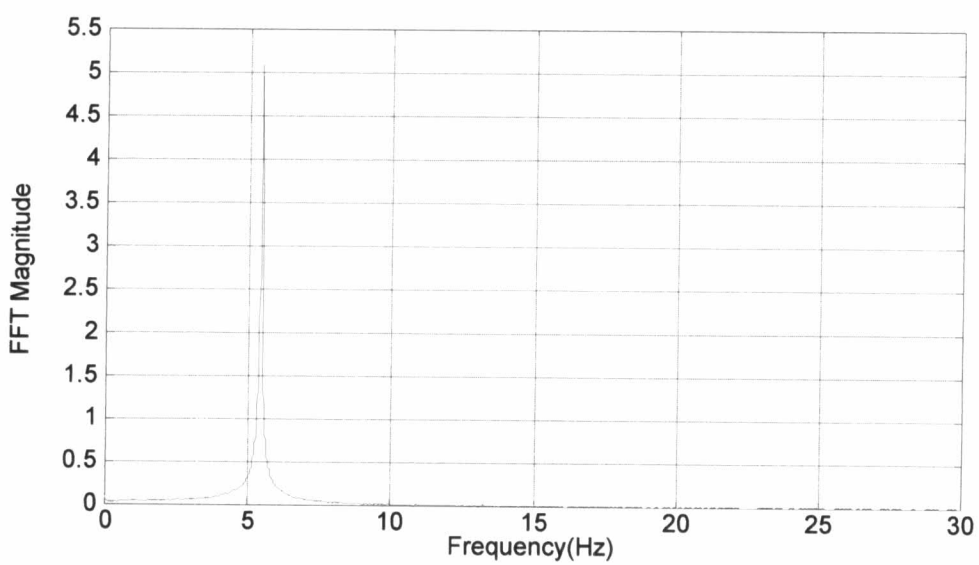
5.3 การหาคุณสมบัติพื้นฐานของสะพาน

คุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของสะพานได้แก่ ความถี่ธรรมชาติของสะพาน (natural frequency) และความหน่วงของสะพาน (damping ratio) ซึ่งสามารถหาได้โดยการทดสอบแบบการสั่นไหวอิสระ (free vibration) โดยการให้ระยะขจัดเริ่มต้น โดยจะขอยกตัวอย่างในกรณีสะพานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาจะได้สัญญาณมาดังรูปที่ 5.15 และจากสัญญาณนี้ก็จะทำการแปลงให้อยู่บนโดเมนของความถี่ (frequency domain) โดยวิธีการฟาสฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม (Fast Fourier Transform, FFT) ซึ่งจะหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานได้จากรูปที่ 5.15 ส่วนค่าความหน่วงของสะพานก็จะหาได้จากรูปที่ 5.15 เช่นกัน ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (5.4)

$$\ln\left(\frac{x_n}{x_{n+1}}\right) = 2\pi\xi \tag{5.4}$$



รูปที่ 5.15 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นไหวแบบอิสระ



รูปที่ 5.16 สัญญาณบนโดเมนของความถี่ (frequency domain)

ซึ่งจากรูปที่ 5.16 จะเห็นว่าขนาดของสัญญาณจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อความถี่มีค่าเท่ากับ 5.4 Hz ดังนั้นความถี่ธรรมชาติโหมดที่หนึ่งของสะพานมีค่าเท่ากับ 5.4 Hz และจากสมการที่ (5.4) จะสามารถคำนวณหาค่าความหน่วงของสะพานได้มีค่าเท่ากับ 0.51%

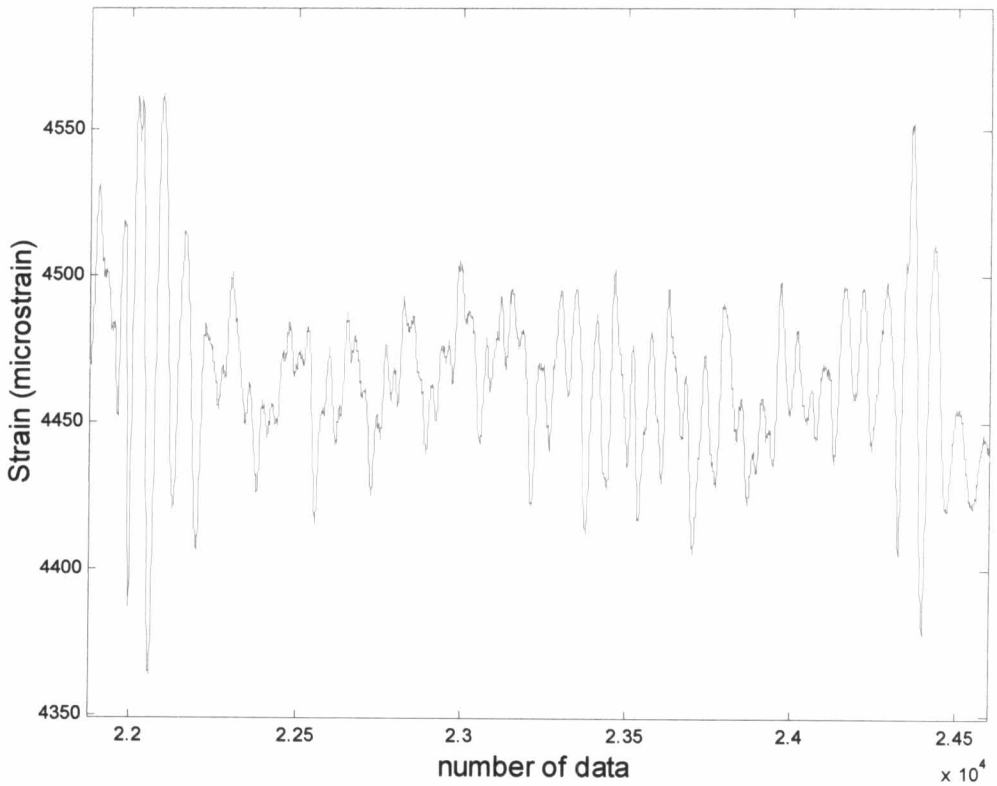
เช่นเดียวกันในแบบจำลองสะพานต่อเนื่อง ค่าความถี่ธรรมชาติและค่าความหน่วงของสะพานมีค่าดังนี้

- แบบจำลองสะพานต่อเนื่อง แบบที่ 1 (ความยาวสะพานช่วงหลัก 1.65 เมตร และมีค่า Continuity index เท่ากับ 0.79) มีค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 10.0 Hz และมีค่าความหน่วงเท่ากับ 1.03%
- แบบจำลองสะพานต่อเนื่อง แบบที่ 2 (ความยาวสะพานช่วงหลัก 1.30 เมตร และมีค่า Continuity index เท่ากับ 0.69) มีค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 10.25 Hz และมีค่าความหน่วงเท่ากับ 1.68%

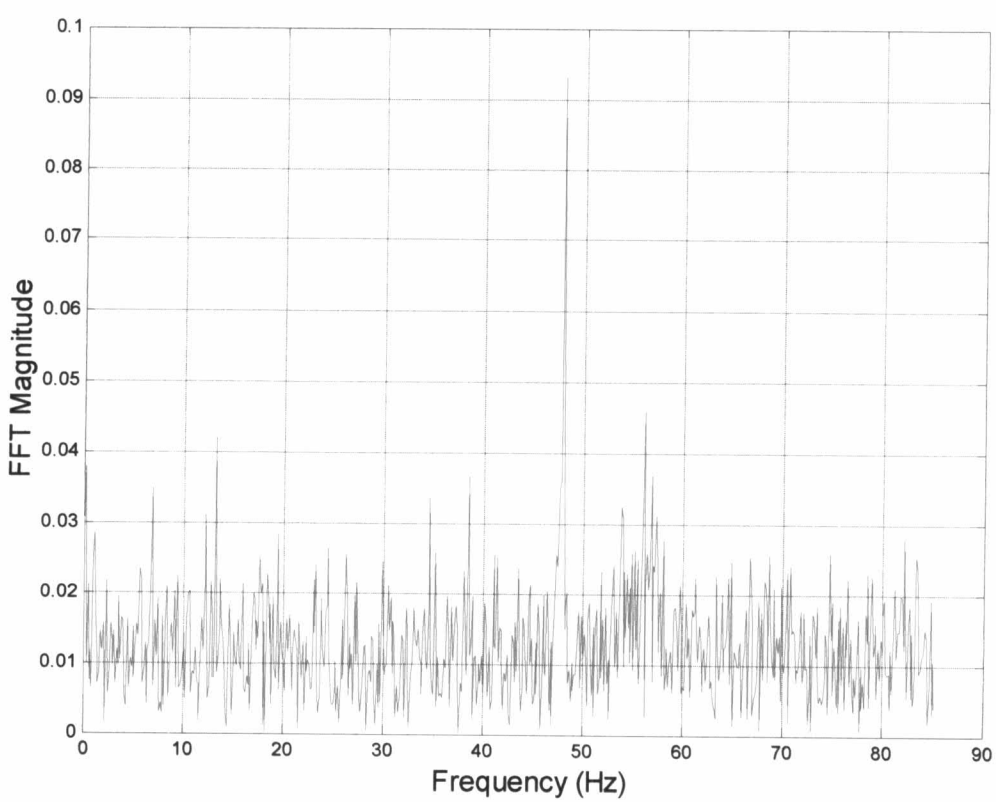
5.4 ระเบียบวิธีการเก็บวัดข้อมูล

เนื่องจากเครื่องมือที่ทำการเก็บวัดข้อมูลนั้น มีความถี่ในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 1024 Hz ซึ่งถือว่ามีความละเอียดค่อนข้างมาก ซึ่งข้อมูลเก็บวัดที่จะนำไปเข้าสู่โปรแกรมการหาน้ำหนักนั้น ไม่จำเป็นที่จะต้องใช้ข้อมูลที่มีความละเอียดสูงถึงขนาดนั้น ดังนั้นจึงได้ทำการกรองจำนวนข้อมูลที่ไม่จำเป็นออก รวมทั้งสัญญาณรบกวน (noise) ที่เกิดขึ้น

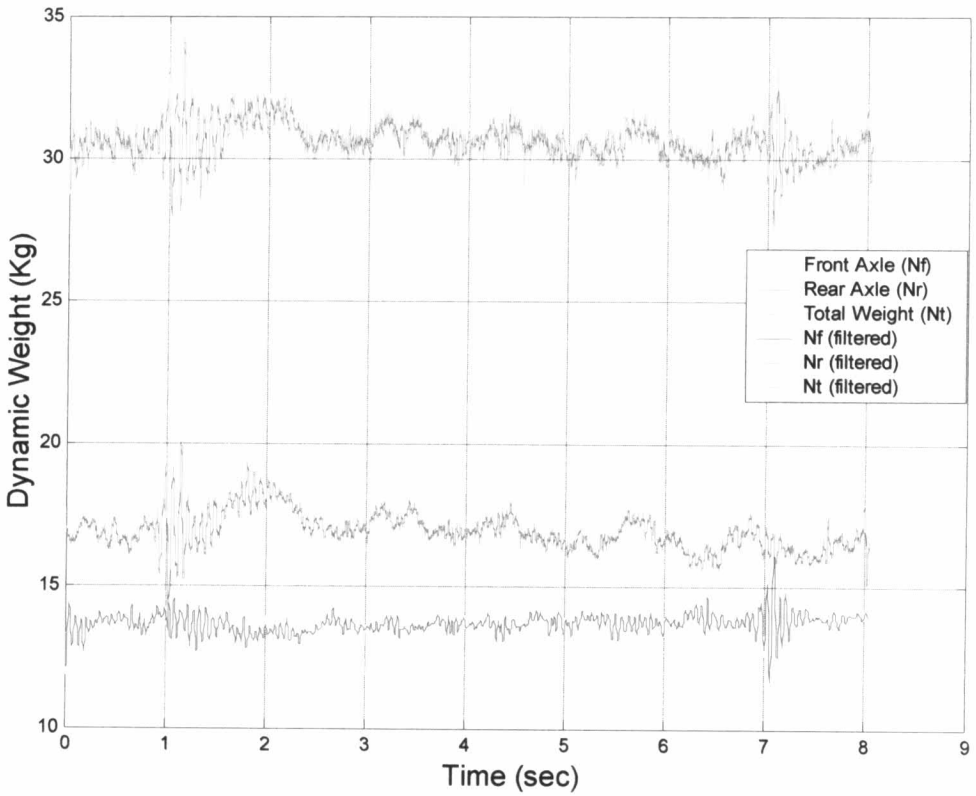
เริ่มจากทำการพิจารณาสัญญาณที่ได้จากแรงทางพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นในเพลารถ ซึ่งเมื่อทดลองวิ่งรถด้วยความเร็วสูง (ประมาณ 1.0 เมตร/วินาที) ดังรูปที่ 5.17 เมื่อทำฟาสฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม (fast fourier transform) พบว่าความถี่ของแรงทางพลศาสตร์ที่วัดได้นั้นมีค่าประมาณ 20 Hz ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกทำการเก็บข้อมูลที่จะนำไปใช้ที่ความถี่ 256 Hz ซึ่งเป็นการกรองจากสัญญาณเดิมให้มีจำนวนน้อยลง 4 เท่า สำหรับผลของสัญญาณรบกวนนั้น พบว่าขนาด (Amplitude) ของสัญญาณรบกวนนั้นมีค่าประมาณ 2 ไมโครสเตรน และเมื่อทำฟาสฟูเรียร์ทรานสฟอร์มแล้วพบว่าสัญญาณรบกวนนี้มีความถี่ประมาณ 48 Hz ดังรูปที่ 5.18 ดังนั้นจึงเลือกทำการกรองสัญญาณด้วยวิธีที่เรียกว่า "Moving average" ซึ่งเป็นการกรองสัญญาณด้วยการเฉลี่ยข้อมูลแต่ละตัวด้วยข้อมูลที่อยู่รอบข้อมูลนั้นด้วยจำนวนที่มีความถี่ไม่ต่ำกว่าความถี่ของสัญญาณรบกวนที่จะทำการกรองออก โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ความถี่ในการเฉลี่ยเท่ากับ 15 Hz ซึ่งหมายความว่า จะทำการเก็บค่าของข้อมูลตำแหน่งที่จะเก็บวัดด้วยการหาค่าเฉลี่ยข้อมูลรอบตำแหน่งนั้นด้วยจำนวนข้อมูลเท่ากับ 15 ข้อมูล ซึ่งลักษณะของสัญญาณที่ทำการกรองค่าแล้วแสดงดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.17 ลักษณะสัญญาณของแรงทางพลศาสตร์ในเพลารถที่เก็บวัดได้จาก Dynamics Axle Force Detector



รูปที่ 5.18 ฟาสฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม (FFT) ของความถี่ของที่มีสัญญาณรบกวน



รูปที่ 5.19 ลักษณะสัญญาณที่ทำการกรองข้อมูลและกรองสัญญาณรบกวน