บทที่ 4

การออกแบบและติดตั้งแบบจำลองย่อส่วน

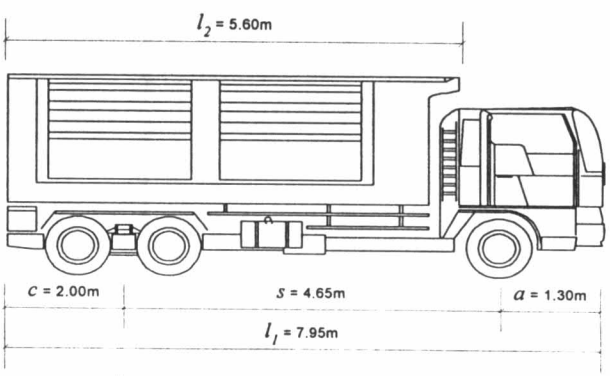
ในบทนี้จะได้อธิบายถึงหลักการออกแบบแบบจำลองที่จะนำมาใช้ในการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองสะพาน และแบบจำลองรถบรรทุก รวมทั้งรายละเอียดในการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณต่าง ๆ เช่น เกจวัดความเครียด และเซนเซอร์วัดความเข้มแสงซึ่งใช้สำหรับวัดตำแหน่งการวิ่งของรถเป็นต้น

4.1 แบบจำลองย่อส่วนสะพาน

แบบจำลองย่อส่วนสะพานที่จะนำมาใช้ทดสอบนั้น ได้ทำการย่อขนาดลงจากสะพานจริง โดยที่สะพานจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วงด้วยกัน สะพานช่วงแรกจะใช้สำหรับทำความเร็วก่อนเข้าสะพานช่วงหลัก สะพานช่วงกลางหรือสะพานช่วงหลักจะเป็นสะพานที่จะทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ซึ่งจะเป็นช่วงที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณหาน้ำหนัก และสะพานช่วงหลังจะใช้สำหรับชะลอความเร็วแบบจำลองรถบรรทุกหลังจากที่แบบจำลองรถบรรทุกออกจากสะพานช่วงหลัก

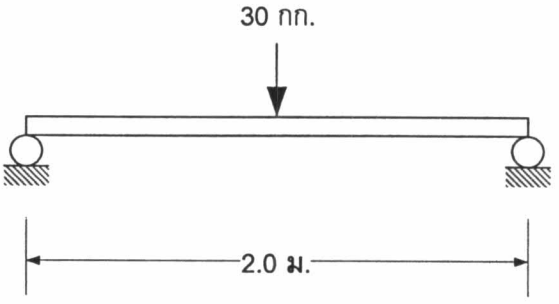
สำหรับวัสดุที่ใช้นั้น ในส่วนของสะพานสำหรับนำรถทั้งช่วงแรกและช่วงหลังได้ใช้ไม้อัดหนา 1 ซม. และสะพานช่วงหลักจะใช้เหล็กแผ่นหนา 1 ซม. กว้าง 50 ซม. และยาว 2 ม. ซึ่งมีหลักในการออกแบบดังนี้

1. ความยาวช่วงสะพาน (span length) จากรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงลักษณะและขนาดของรถบรรทุกจริงซึ่งมีระยะห่างเพลาเท่ากับ 4.65 เมตร และจากแบบจำลองย่อส่วนรถบรรทุกที่จำลองให้มีระยะห่างเพลาเท่ากับ 28 ซม. และมีน้ำหนักสูงสุดเท่ากับ 30 กก. ซึ่งเป็นน้ำหนักที่ค่อนข้างมากจึงทำให้แบบจำลองรถบรรทุกที่ใช้ทดสอบนั้นสามารถทำความเร็วได้สูงสุดประมาณ 1 เมตร/วินาที เพื่อที่จะจำลองให้เทียบเท่ากับระดับความเร็วสูงของรถที่วิ่งจริง และหากจำลองสะพานย่อส่วนให้มีความยาว 2 เมตร จะเทียบเท่ากับสะพานจริงที่มีความยาวเท่ากับ 33 เมตร ซึ่งจากแบบจำลองที่มีความยาว 2 เมตรเมื่อวิ่งรถด้วยความเร็ว 1 เมตร/วินาทีจะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านเท่ากับ 2 วินาที ซึ่งเมื่อย้อนกลับไปเทียบกับรถบรรทุกจริงที่สะพานยาว 33 เมตรนั้น จะเทียบเท่าความเร็วรถเท่ากับ 60 กม./ชม. ซึ่งถือเป็นระดับความเร็วที่กฎหมายควบคุมบนทางหลวงสำหรับรถบรรทุกหนัก ดังนั้นจึงเลือกใช้ความยาวของแบบจำลองสะพานย่อส่วนเท่ากับ 2 เมตร



รูปที่ 4.1 ลักษณะและขนาดของรถบรรทุกจริง

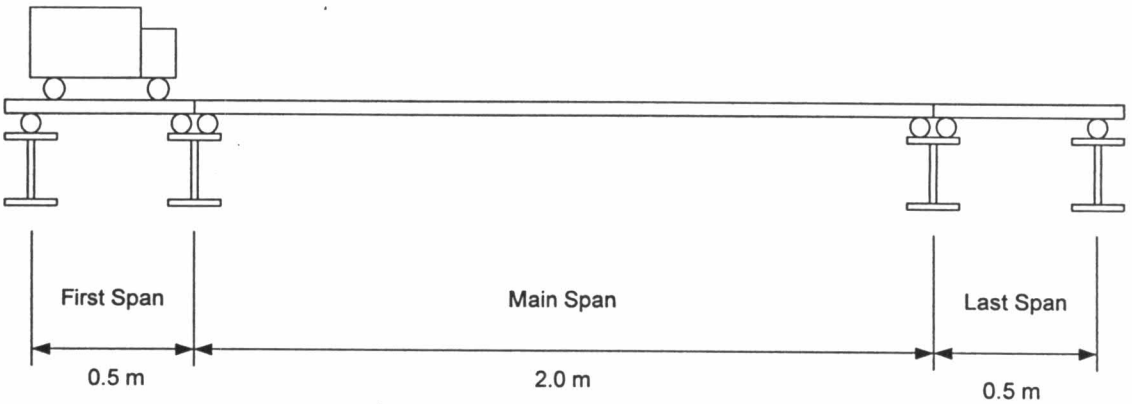
2. ขนาดหน้าตัด (section area) จะพิจารณามาจากค่าความเครียดของสะพานที่เกิดขึ้น ซึ่งสะพานโดยทั่วไปเมื่อมีรถบรรทุกหนักวิ่งผ่านเพียงหนึ่งคันนั้นจะมีค่าความเครียดในช่วง 70-100 ไมโครสเตรน โดยในที่นี้ได้สมมติสะพานเป็นคานช่วงเดียว (simple support) มีความหนา 1 ซม. ความกว้าง 50 ซม. และความยาว 2 ม. ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของสะพาน $2x10^6$ กก./ตร.ซม. และคิดว่ามีน้ำหนักกระทำแบบจุด 30 กก. กระทำที่กึ่งกลางสะพาน ดังรูปที่ 4.2 จะสามารถคำนวณค่าความเครียดได้เท่ากับ 90 ไมโครสเตรน



รูปที่ 4.2 ลักษณะน้ำหนักกระทำแบบจุดบนสะพาน

โดยที่แบบจำลองสะพานย่อส่วนที่ใช้ในการทดสอบนี้มีด้วยกัน 2 ประเภท ได้แก่

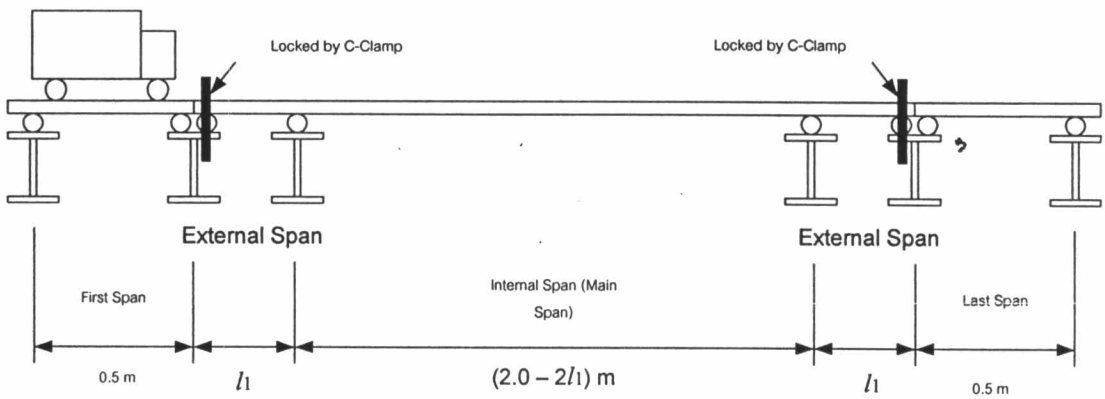
ก) แบบจำลองสะพานช่วงเดียว โดยออกแบบให้มีพฤติกรรมทางโครงสร้างให้มีลักษณะเช่นเดียวกับคานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบข้อหมุนซึ่งหมุนได้อย่างอิสระ (hinge support) โดยขนาดและระยะของสะพานแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แบบจำลองย่อส่วนสะพานช่วงเดียว

ข) แบบจำลองสะพานหลายช่วง โดยออกแบบให้มีพฤติกรรมทางโครงสร้างให้มีลักษณะเช่นเดียวกับคานต่อเนื่อง ซึ่งในการวิเคราะห์สามารถนำมาได้เสมือนกับแบบจำลองคานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบข้อหมุนสปริง (rotational spring support) ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยในงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาแบบจำลองสะพาน 3 ช่วง และจะทำการศึกษาผลของระดับค่าสติฟเนสที่ปลายสะพานที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถทำได้โดยการปรับตำแหน่งจุดรองรับของสะพานเดิมให้มีความยาวสะพานช่วงหลักที่แตกต่างกัน และทำการยึดปลายสะพานช่วงนอกของสะพานกับจุดรองรับทั้งสองข้างโดยใช้ตัวยึดรูปตัวซี (C-clamp) โดยสะพานที่มีระยะสะพาน

ช่วงหลักมากกว่านั้นจะมีค่าสติฟเนสที่จุดรองรับน้อยกว่าสะพานที่มีระยะสะพานช่วงหลักที่สั้นกว่า สามารถปรับค่าสติฟเนสของสะพานได้โดยการปรับระยะความยาวช่วงนอก (l_1) และจะมีสะพานช่วงสั้น ๆ สำหรับนำรถ ที่ปลายทั้งสองข้างเช่นเดียวกันกับแบบจำลองสะพานช่วงเดียว ขนาดและรูปแบบเบื้องต้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 รูปแบบของแบบจำลองสะพานหลายช่วง

โดยค่าสติฟเนสของการหมุนที่จะทำการปรับค่า ซึ่งทำได้โดยการปรับระยะของจุดรองรับของคานช่วงหลักนั้น ได้ทำการอ้างอิงจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีโครงสร้างโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. สร้างแบบจำลองคานช่วงเดียวโดยมีจุดรองรับทั้งสองข้างเป็นแบบข้อหมุนธรรมดา (simple support beam) โดยให้แรงกระทำแบบจุด 1 หน่วย (กก.) กระทำที่กึ่งกลางคาน แล้ววิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ดัด (หรือความเครียด) ที่กึ่งกลางคาน ซึ่งเมื่อความยาวคานเท่ากับ 2 เมตร จะได้ค่าโมเมนต์ดัดเท่ากับ 0.5 กก.-ม.

2. สร้างแบบจำลองคานช่วงเดียวโดยมีจุดรองรับทั้งสองข้างเป็นแบบยึดแน่น และให้แรงกระทำแบบจุด 1 กก. ที่กึ่งกลางคานเช่นเดียวกัน ซึ่งวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ดัดได้เท่ากับ 0.25 กก.-ม.

3. สร้างแบบจำลองคานต่อเนื่องซึ่งมีความยาวช่วงเท่ากัน 3 ช่วง (ช่วงละ 2 ม.) และให้แรงกระทำแบบจุด 1 กก. ที่กึ่งกลางคานเช่นเดียวกัน ซึ่งวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ดัดได้เท่ากับ 0.35 กก.-ม.

4. ทำการเทียบอัตราส่วนระหว่างค่าโมเมนต์ดัดที่ดระหว่างแบบจำลองสองแบบ โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างแบบจำลองคานที่วิเคราะห์ เทียบกับแบบจำลองคานแบบจุดรองรับธรรมดา ซึ่งในที่นี้ขอนิยามอัตราส่วนนี้เป็นค่าดัชนีความต่อเนื่อง (Continuity Index, CI) ซึ่งจะเป็นค่าที่บอกถึงระดับของสติฟเนสของคานที่จะนำมาวิเคราะห์เทียบกับคานที่มีพฤติกรรมแบบคานธรรมดา (simple beam) ดังนั้นค่าดัชนีความต่อเนื่องของคานแบบต่าง ๆ จะมีค่าดังนี้

- แบบจำลองคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่นทั้งสองข้างจะมีค่าดัชนีความต่อเนื่องเท่ากับ 0.25/0.5 = 0.5
- แบบจำลองคานต่อเนื่อง 3 ช่วง จะมีค่าดัชนีความต่อเนื่องเท่ากับ 0.35/0.5 = 0.70
- แบบจำลองคานที่มีจุดรองรับแบบข้อหมุนธรรมดา จะมีค่าดัชนีความต่อเนื่องเท่ากับ 0.5/0.5 = 1.0

ดังนั้น หากแบบจำลองคานใด ๆ ที่นำมาวิเคราะห์มีค่าดัชนีความต่อเนื่องมีค่าเข้าใกล้ 1.0 แสดงว่าแบบจำลองนั้นมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับคานที่มีจุดรองรับแบบธรรมดานั่นเอง และหากค่าดัชนีความต่อเนื่องมีค่าน้อยเข้าใกล้ 0.5 แสดงว่าแบบจำลองคานหรือสะพานนั้นมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น (fixed support)

5. ดังนั้นการปรับค่าสติฟเนสของการหมุนที่จุดรองรับของแบบจำลองสะพานย่อส่วนนั้น จะต้องทำการตรวจสอบว่าค่าดัชนีความต่อเนื่องให้อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 1.0 และสำหรับการจำลองให้ใกล้เคียงกับแบบจำลองคานต่อเนื่อง 3 ช่วง ค่าดัชนีความต่อเนื่องที่ได้ควรจะมีค่าใกล้เคียง 0.7 นั่นเอง

6. ทำการทดลองปรับระยะของจุดรองรับของสะพานจำลองย่อส่วน โดยที่ไม่ต้องยึดปลายสะพานทั้งสองข้าง เพื่อให้พฤติกรรมของสะพานช่วงกลางเป็นแบบ simple beam จากนั้นให้แรงกระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน แล้วทำการวัดค่าความเครียดที่กึ่งกลางสะพาน โดยในที่นี้ได้ทำการปรับระยะของจุดรองรับ 2 กรณีด้วยกันคือกรณีระยะสะพานช่วงกลางเท่ากับ 1.65 ม. และกรณีระยะสะพานช่วงกลางเท่ากับ 1.30 ม. โดยมีระยะ l_1 เท่ากับ 17.5 ซม. และ ระยะ l_1 เท่ากับ 35 ซม. ตามลำดับ และให้แรงกระทำด้วยการวางน้ำหนักด้วยแผ่นเหล็กซ้อนกันซึ่งมีมวลหนักเท่ากับ 23.31 กก. ที่กึ่งกลางคาน โดยได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบหาค่าความเครียดที่ตำแหน่งการวัดต่าง ๆ เมื่อทำการปรับระยะของจุดรองรับช่วงในที่แตกต่างกัน (กรณีสะพานจำลองไม่มีการยึดรั้งที่ปลาย)

กรณีระยะสะพานช่วงกลางเท่ากับ 1.65 ม. (l_1 = 17.5 ซม.)				กรณีระยะสะพานช่วงกลางเท่ากับ 1.30 ม. (l_1 = 35 ซม.)			
การทดลองครั้งที่	ค่าความเครียดที่ตำแหน่งวัด (ไมโครสเตรน)			การทดลองครั้งที่	ค่าความเครียดที่ตำแหน่งวัด (ไมโครสเตรน)		
	L/3	L/2	2L/3		L/3	L/2	2L/3
1	34.1	57.7	34.1	1	21.8	45.1	21.7
2	34.2	57.5	33.9	2	21.8	45.4	22.7
3	34.5	57.8	35.0	3	22.3	45.6	21.9
ค่าเฉลี่ย	**34.3**	**57.7**	**34.3**	ค่าเฉลี่ย	**22.0**	**45.4**	**22.1**

7. ทำการยึดปลายทั้งสองข้างของแบบจำลองสะพานย่อส่วนด้วยตัวยึดรูปตัวซี (C-clamp) เพื่อให้สะพานหลักมีการยึดรั้งและมีค่าสติฟเนสที่จุดรองรับด้านใน จากนั้นให้แรงกระทำด้วยน้ำหนักเท่ากันดังขั้นตอนที่ 6 และเก็บวัดค่าความเครียดที่กึ่งกลางสะพาน ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบหาค่าความเครียดที่ตำแหน่งการวัดต่าง ๆ เมื่อทำการปรับระยะของจุดรองรับช่วงในที่แตกต่างกัน (กรณีสะพานจำลองมีการยึดรั้งที่ปลาย)

กรณีระยะสะพานช่วงกลางเท่ากับ 1.65 ม. (l_1 = 17.5 ซม.)				กรณีระยะสะพานช่วงกลางเท่ากับ 1.30 ม. (l_1 = 35 ซม.)			
การทดลองครั้งที่	ค่าความเครียดที่ตำแหน่งวัด (ไมโครสเตรน)			การทดลองครั้งที่	ค่าความเครียดที่ตำแหน่งวัด (ไมโครสเตรน)		
	L/3	L/2	2L/3		L/3	L/2	2L/3
1	25.8	45.9	17.3	1	5.9	31.3	10.7
2	26.7	45.6	17.0	2	6.2	31.5	10.5
3	26.4	45.4	16.7	3	6.0	31.2	9.5
ค่าเฉลี่ย	**26.3**	**45.7**	**17.0**	ค่าเฉลี่ย	**6.0**	**31.3**	**10.3**

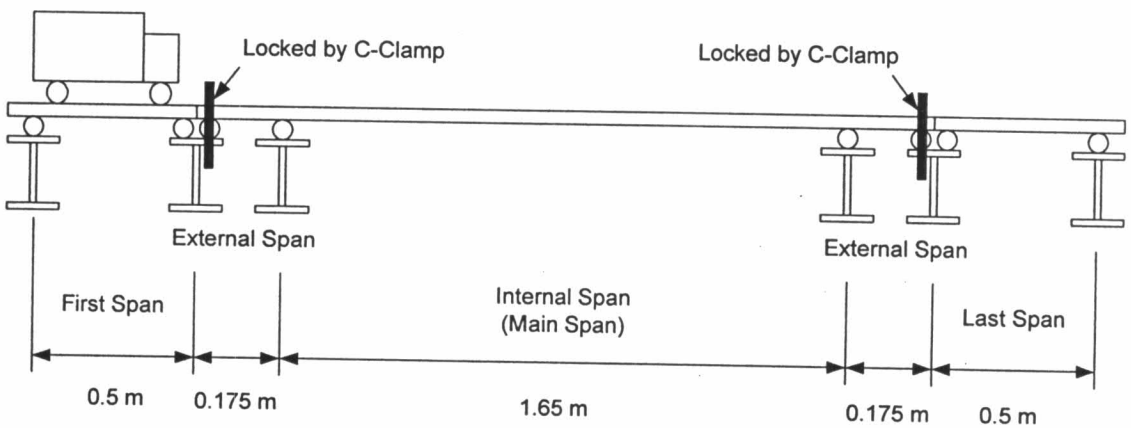
หมายเหตุ: ค่าความเครียดที่ตำแหน่ง L/3 และ 2L/3 อาจมีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากการยึดปลายคานต่อเนื่องด้วยตัวยึดไม่สามารถควบคุมให้มีความแน่นหนาเท่ากันได้

8. จากนั้นทำการหาค่าดัชนีความต่อเนื่องของสะพานทั้งสองกรณี จะได้ว่า

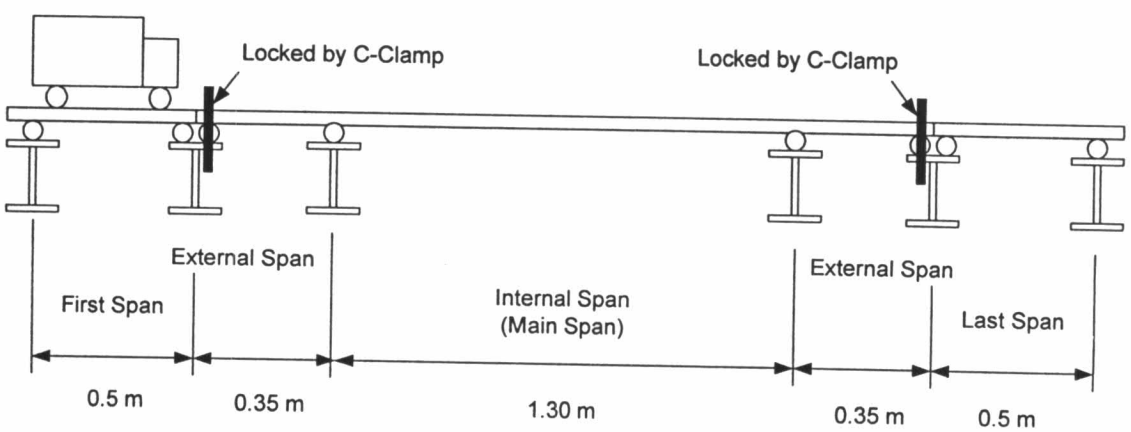
- กรณีระยะสะพานช่วงกลางเท่ากับ 1.65 ม. ค่าดัชนีความต่อเนื่องเท่ากับ 45.7/57.7 = 0.79
- กรณีระยะสะพานช่วงกลางเท่ากับ 1.30 ม. ค่าดัชนีความต่อเนื่องเท่ากับ 31.3/45.4 = 0.69

ซึ่งหากต้องการเพิ่มค่าสติฟเนสที่จุดรองรับของสะพาน จะต้องทำการปรับระยะและทำการทดสอบหาค่าดัชนีความต่อเนื่องใหม่ ซึ่งแบบจำลองสะพานย่อส่วนได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดสัญญาณความเครียดที่ใต้ท้องสะพาน จึงทำให้ไม่สามารถเลื่อนระยะจุดรองรับให้มากกว่า 35 ซม.ได้

สำหรับสะพานจริงซึ่งจะนำระบบการหาน้ำหนักไปติดตั้งนั้น ควรจะเป็นสะพานช่วงเดียว ซึ่งไม่ได้มีลักษณะและพฤติกรรมทางโครงสร้างเป็นแบบคานต่อเนื่อง เนื่องจากบริเวณจุดรองรับกับตัวสะพานถูกแยกออกเป็นคนละส่วนกัน ทำให้พฤติกรรมทางโครงสร้างจะใกล้เคียงกับคานช่วงเดียวธรรมดามากกว่า ดังนั้นในงานวิจัยนี้ การศึกษาผลของความต่อเนื่องที่บริเวณจุดรองรับของสะพานหลักด้วยแบบจำลองสะพานที่มีค่าดัชนีความต่อเนื่องดังที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 8 ทั้งสองค่านั้น จึงน่าจะเพียงพอต่อการศึกษาเพื่อความเตรียมพร้อมสำหรับการนำไปใช้กับสะพานจริง โดยรูปแบบและขนาดของแบบจำลองสะพานย่อส่วนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 และ 4.6



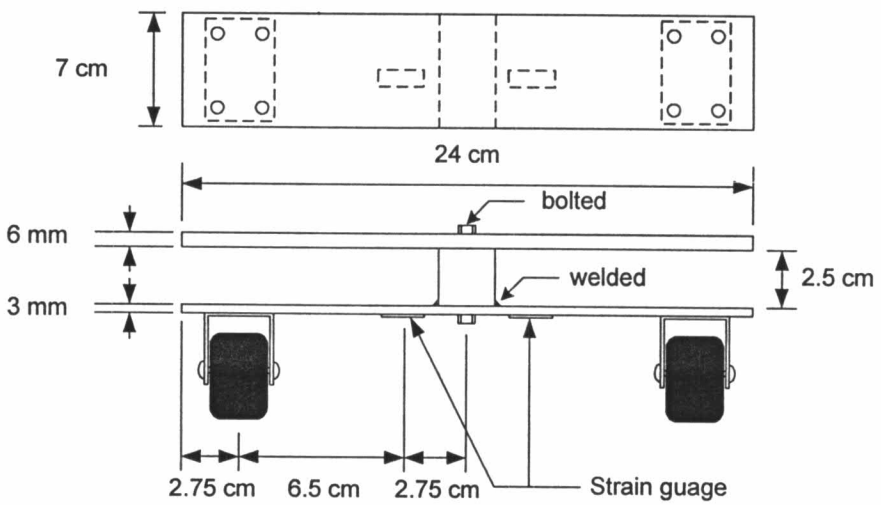
รูปที่ 4.5 แบบจำลองย่อส่วนสะพานหลายช่วง กรณีจุดรองรับมีสติฟเนสน้อย (Continuity Index = 0.79)



รูปที่ 4.6 แบบจำลองย่อส่วนสะพานหลายช่วง กรณีจุดรองรับมีสติฟเนสมาก (Continuity Index = 0.69)

4.2 แบบจำลองย่อส่วนของรถบรรทุก

ในส่วนของรถบรรทุกนั้น ได้ทำการย่อขนาดจากรถบรรทุกจริง และได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดแรงทางพลศาสตร์ที่เพลารถขณะที่รถมีการเคลื่อนที่ (Dynamics Axle Force Detector) ซึ่งสามารถวัดแรงในล้อได้อย่างอิสระซึ่งกันและกันทั้ง 4 ล้อ และเมื่อนำแรงที่วัดได้ในล้อแต่ละคู่มารวมกันก็จะได้เป็นแรงทางพลศาสตร์ในเพลานั้น ๆ โดยที่รูปร่างและขนาดของ Dynamics Axle Force Detector นี้ได้แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 อุปกรณ์วัดแรงทางพลศาสตร์ที่เพลารถ (Dynamics Axle Force Detector)

ซึ่งรูปร่างและขนาดของ Dynamics Axle Force Detector มีหลักการในการออกแบบดังนี้

1. การวัดแรงในแต่ละล้อจะใช้การเก็บวัดสัญญาณความเครียด โดยใช้รูปแบบของคานยื่น (Cantilever beam) แยกกันอิสระในแต่ละล้อ ซึ่งความเครียดที่เกิดขึ้นนั้นได้มาจากการแปลงค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำผ่านล้อรถ และแกนกลางของ Detector จะต้องมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดมากกว่าส่วนที่เป็นคานยื่นหลายเท่า จึงจะมีพฤติกรรมเป็นแบบ Cantilever อิสระซึ่งกันและกันได้ จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าตัว Detector นั้น ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนบนและส่วนล่างซึ่งถูกยึดติดกันด้วยแกนเหล็กที่บริเวณกึ่งกลาง โดยส่วนล่างจะทำหน้าที่เป็นคานยื่น มีลักษณะเป็นปีก 2 ข้าง ที่ปลายแต่ละข้างจะยึดติดกับล้อรถ และส่วนบนจะเป็นส่วนที่ยึดกับตัวถังรถ

2. ขนาดของปีกล่างที่จะทำหน้าที่เป็นคานยื่นนั้น จะต้องมีขนาดที่ไม่ทำให้มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยมากเกินไป เพราะจะทำให้ค่าโมเมนต์ดัดหรือความเครียดที่วัดได้มีค่าน้อยจนเกินไป ซึ่งจะทำให้ค่าแรงที่วัดได้มีความละเอียดไม่เพียงพอ และต้องมีขนาดที่ไม่เล็กหรือบางจนเกินไปเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการคราก(ของเหล็กเมื่อตัวปีกได้รับแรง ซึ่งความกว้างของปีกล่างนั้นใช้เท่ากับ 7 ซม. เนื่องจากล้อรถที่นำมาใช้นั้นมีฐานซึ่งมีความยาว 6 ซม. โดยที่น้ำหนักรถสูงสุดที่จะนำมาทดสอบนั้นหนักประมาณ 30 กก. เพื่อหลีกเลี่ยงการครากของตัวปีกคานเนื่องจากการถ่ายเทน้ำหนักของรถขณะวิ่งอาจมีการถ่ายเทมาที่ล้อใดล้อหนึ่งมากเป็นพิเศษ จึงกำหนดค่าแรงสูงสุดที่ใช้งานได้ในแต่ละล้อเท่ากับ 15 กก. ซึ่งเมื่อใช้ขนาดของปีกเท่ากับ 10.5 ซม. และหนา 3 มม. ค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ 1500 กก./ตร.ซม. ซึ่งมีค่าประมาณ 0.6 เท่าของค่าความเค้นครากของเหล็ก $(0.6f_y)$ ตามมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็ก และเมื่อใช้แกนกลางเป็นเหล็กขนาดกว้าง 2.5 ซม.

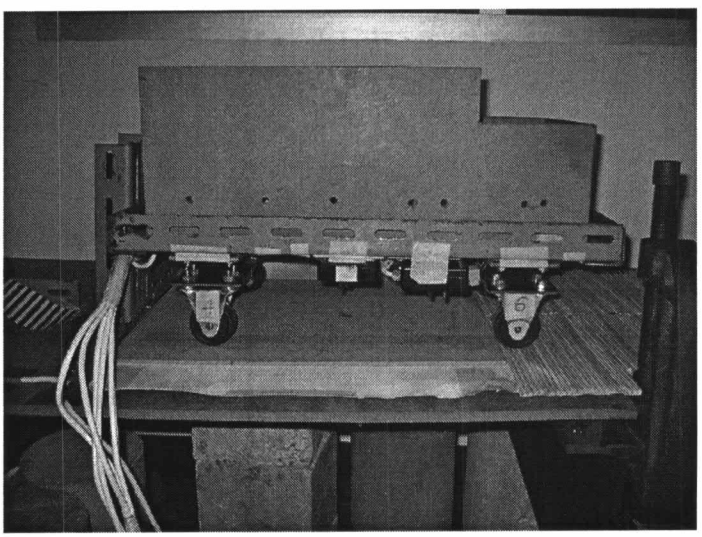
ยาว 7 ซม. หนา 2.5 ซม. จะได้ขนาดของ Axle Force Detector ยาว 24 ซม. กว้าง 7 ซม. และหนา 3 ซม. ส่วนปีกบนของ Detector นั้นใช้ขนาดกว้างและยาวเช่นเดียวกับปีกล่าง แต่ความหนานั้นใช้เท่ากับ 6 มม. เพราะทำหน้าที่ยึดกับตัวถังรถ จึงจะต้องมีขนาดหน้าตัดที่แข็งแรงและไม่โก่งตัวเหมือนส่วนปีกล่าง

3. ตำแหน่งของเกจวัดความเครียดที่ติดตั้งบนปีกของ Detector ควรจะอยู่ใกล้แกนกลางมากที่สุด เพราะจะสามารถอ่านค่าความเครียดได้สูงสุด แต่หากตำแหน่งที่ติดตั้งเหลื่อมเข้าไปอยู่ในส่วนที่เป็นแกนกลางก็จะอ่านค่าความเครียดไม่ได้เลย ดังนั้นจึงทำการติดตั้งที่ระยะห่างจากขอบของแกนกลางประมาณ 1.5 ซม. ดังนั้นความเครียดสูงสุดที่วัดได้จะมีค่าประมาณ 640 ไมโครสเตรน ซึ่งจะเทียบความละเอียดของการวัดได้ประมาณ 1 โมโครสเตรนต่อน้ำหนัก 25 กรัม ซึ่งจัดว่ามีความละเอียดที่เพียงพอต่อการนำไปวัดแรงพลศาสตร์ในเพลารถขณะเคลื่อนที่

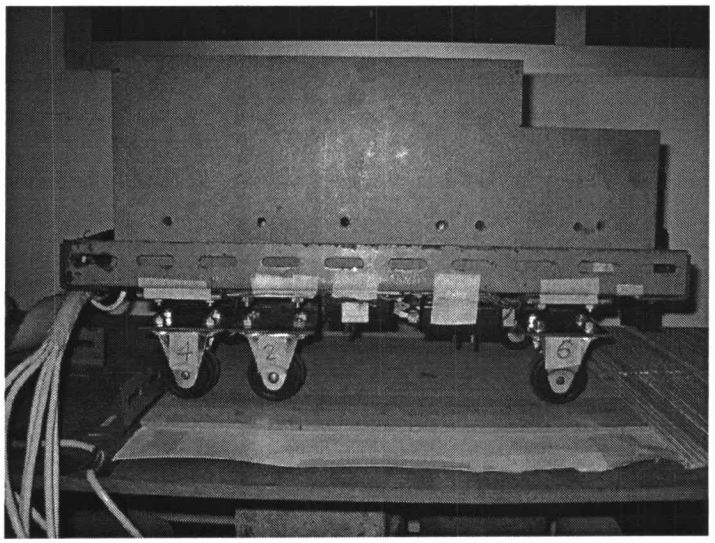
หลักการที่ออกแบบให้รถบรรทุกจำลองมีน้ำหนัก 10 กก. 20 กก. และ 30 กก. นั้น เนื่องจากสะพานจริงเมื่อมีรถบรรทุกหนักเคลื่อนที่ผ่านนั้นจะเกิดความเครียดอยู่ในช่วง 70 – 100 ไมโครสเตรน ซึ่งจากหัวข้อที่ 4.1 รูปที่ 4.2 เมื่อมีแรงกระทำแบบจุดเท่ากับ 30 กก. กระทำต่อสะพานที่มีความยาวช่วงเท่ากับ 2 เมตรจะเกิดความเครียดประมาณ 90 ไมโครสเตรนนั้น เพื่อทำการศึกษาผลกระทบของมวลของรถบรรทุกให้มีความชัดเจน จึงได้ทำการแปรระดับน้ำหนักรถให้มีความแตกต่างกันชัดเจน จึงเลือกใช้น้ำหนักรถบรรทุกเท่ากับ 10 กก. 20 กก. และ 30 กก. ซึ่งจะเกิดความเครียดสูงสุดในสะพานประมาณ 30, 60 และ 90 ไมโครสเตรนตามลำดับ

และการทดสอบจะทำการเคลื่อนที่แบบจำลองรถบรรทุกด้วยความเร็ว 3 ระดับด้วยกันได้แก่ความเร็วต่ำ (0.1 ถึง 0.4 ม./วิ หรือเทียบเท่ากับ 6 ถึง 24 กม./ชม.) ความเร็วระดับปานกลาง (0.4 ถึง 0.8 ม./วิ หรือเทียบเท่ากับ 24 ถึง 48 กม./ชม.) และความเร็วระดับสูง (0.8 ถึง 1.2 ม./วิ. หรือเทียบเท่ากับ 48 ถึง 60 กม./ชม.)

ซึ่งแบบจำลองย่อส่วนของรถบรรทุกนั้นแบ่งออกเป็นรถบรรทุกแบบ 2 เพลาและ 3 เพลาแสดงดังในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ โดยระยะห่างเพลาและขนาดของแบบจำลองย่อส่วนรถบรรทุกนั้นได้แสดงในรูปที่ 4.10

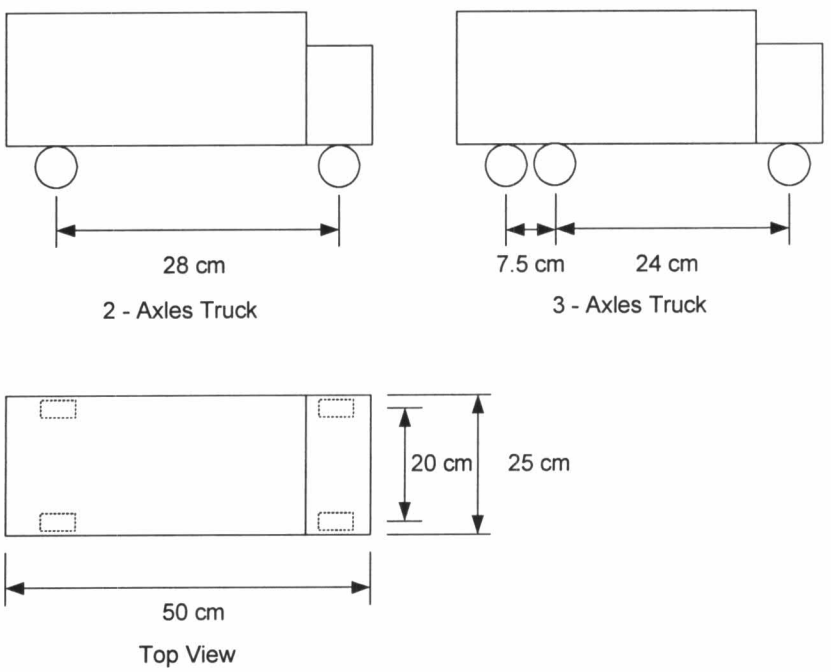


รูปที่ 4.8 แบบจำลองย่อส่วนรถบรรทุกแบบ 2 เพลา



รูปที่ 4.9 แบบจำลองย่อส่วนรถบรรทุกแบบ 3 เพลา

ตัวทำน้ำหนักนั้นใช้เหล็กแผ่นวางซ้อนๆกันไว้ในตัวแบบจำลองย่อส่วนรถบรรทุก ซึ่งจะทำน้ำหนักรวมของแบบจำลองย่อส่วนรถบรรทุกได้ในช่วง 10 - 30 กก. ส่วนการชั่งน้ำหนักรถในแต่ละเพลานั้นนอกจากจะใช้อุปกรณ์วัดแรงพลศาสตร์ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้นแล้ว จะใช้เครื่องชั่งแบบดิจิตอลซึ่งมีความละเอียด 1 ก. หรือ 0.001 กก. ชั่งน้ำหนักรถขณะจอดนิ่งด้วย



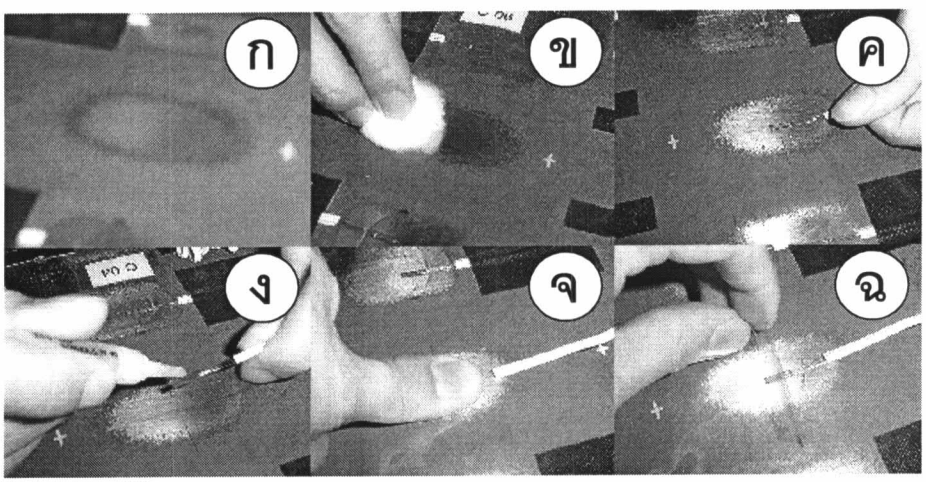
รูปที่ 4.10 ขนาดของแบบจำลองย่อส่วนของรถบรรทุก

4.3 ตำแหน่งและขั้นตอนการติดตั้งเกจวัดความเครียด

ในการที่จะคำนวณน้ำหนักของรถบรรทุก จะต้องทำการตรวจวัดผลตอบสนองของตัวสะพานภายใต้การเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุกซึ่งอาจจะเป็นความเร่ง หรือ ความเครียดก็ได้ แต่ในการศึกษานี้ได้ใช้การตรวจวัดค่าความเครียดในส่วนต่างๆในสะพานโดยการติดตั้งเกจวัดความเครียดเป็นตัวเก็บสัญญาณ ซึ่งวิธีการติดตั้งและตำแหน่งที่ทำการติดตั้งจะได้กล่าวดังนี้

4.3.1 ขั้นตอนการติดตั้งเกจวัดความเครียด

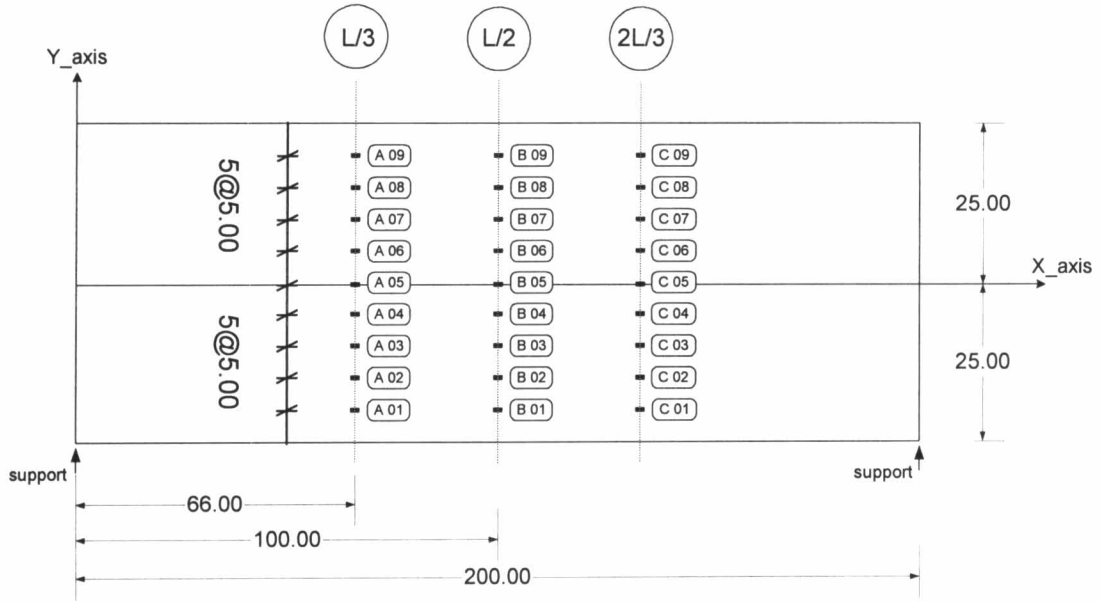
1. ใช้กระดาษทรายน้ำขัดจนพื้นผิวที่จะติดตั้งเกจวัดความเครียดให้เรียบ ดังรูปที่ 4.11ก
2. ใช้อะซีโตนทำความสะอาดพื้นผิว ดังรูปที่ 4.11ข
3. ทำการระบุตำแหน่งที่จะทำการติดตั้ง ดังรูปที่ 4.11ค
4. ทากาวที่ใต้เกจวัดความเครียด แล้วติดตั้งให้ตรงตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.11ง
5. ใช้แผ่นพลาสติกที่ไม่ติดกาว วางทับไว้แล้วกดประมาณ 1 นาที ดังรูปที่ 4.11จ
6. ดึงพลาสติกออก ดังรูป 4.11ฉ



รูปที่ 4.11 ขั้นตอนการติดตั้งเกจวัดความเครียด

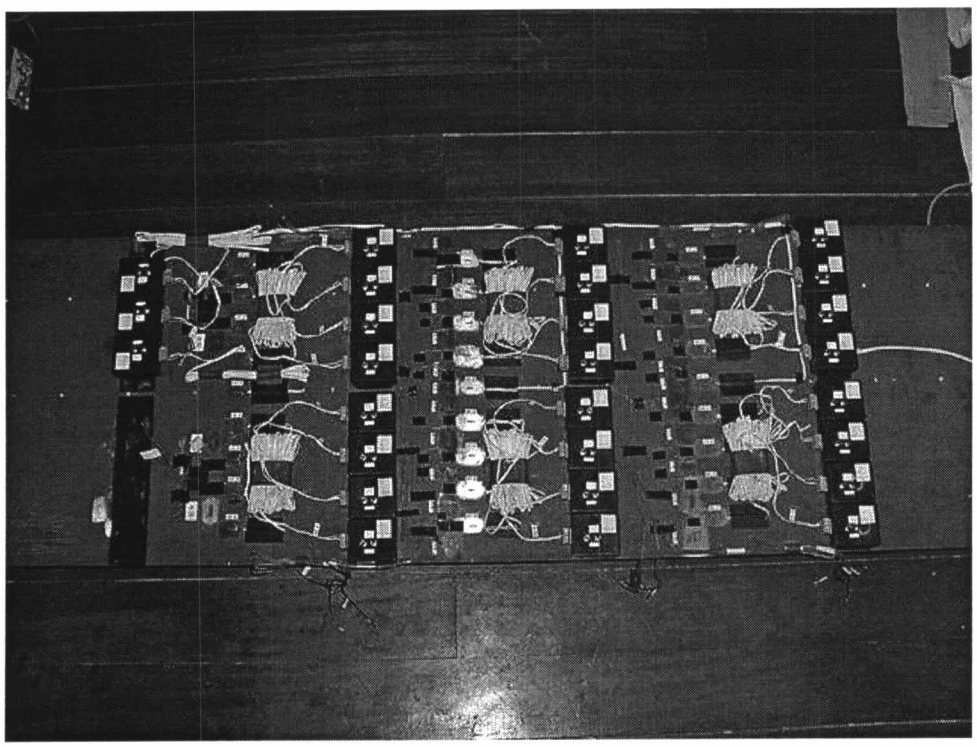
4.3.2 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด

ในที่นี้ได้ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียดอยู่ใต้สะพานตามแนวยาวของสะพานเป็นจำนวน 3 หน้าตัด แต่ละหน้าตัดมีเกจวัดความเครียดทั้งหมด 9 ตัว ซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 4.12ก และ 4.12ข การที่ติดตั้งเกจวัดความเครียดหลายตัวในแต่ละหน้าตัด เพื่อควบคุมผลของตำแหน่งในการวิ่งของรถบรรทุก ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.5



หน่วย ซม.

รูปที่ 4.12ก ตำแหน่งในการติดตั้งเกจวัดความเครียดใต้สะพาน

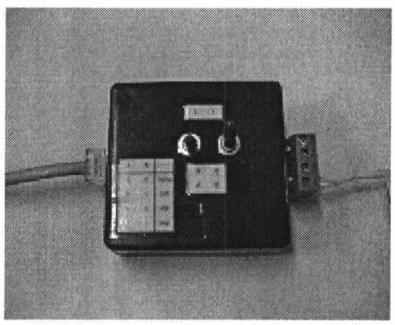


รูปที่ 4.12ข ตำแหน่งในการติดตั้งเกจวัดความเครียดใต้สะพาน

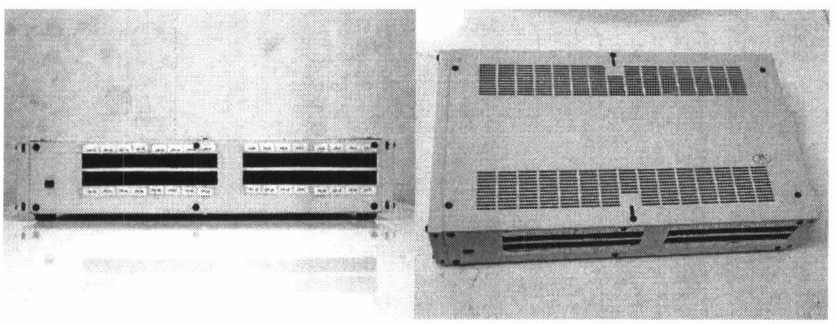
4.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

4.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บสัญญาณ

จะมีตัวกล่องบริจคอมพลีทชั่น (bridge completion) ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งในกล่องจะมีวงจร (bridge) อยู่ และทำหน้าที่รับสัญญาณอนาลอค (analog signal) จากเกจวัดความเครียดทั้งที่ติดตั้งที่ใต้สะพานและที่ติดตั้งที่อุปกรณ์วัดแรงทางพลศาสตร์ในเพลารถ (Dynamics Axle Force Detector) จากนั้นจะส่งผ่านสายแลนไปยังดาต้าลอคเกอร์ (data logger) ดังรูปที่ 4.14 เพื่อทำการแปลงสัญญาณให้เป็นสัญญาณดิจิตอล (digital signal) แล้วดาต้าลอคเกอร์ก็จะส่งสัญญาณดังกล่าวเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางยูเอสบีพอร์ต (USB port) เพื่อนำข้อมูลเข้าสู่โปรแกรมทายน้ำหนักต่อไป



รูปที่ 4.13 ลักษณะของกล่องบริดจ์คอมพลีทชั่น

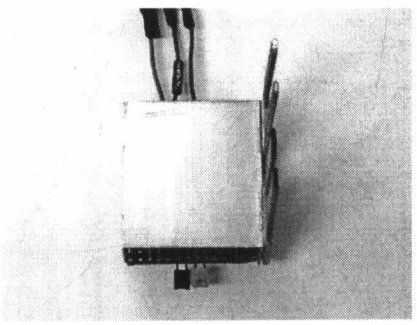


รูปที่ 4.14 ลักษณะของดาต้าลอคเกอร์

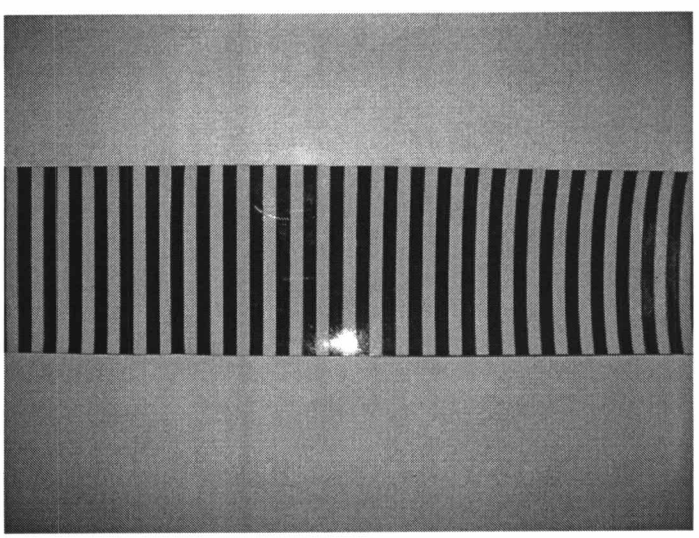
4.4.2 ตัวเซนเซอร์ที่ใช้หาตำแหน่งของรถ

ในวิธีการหาน้ำหนักนั้น จำเป็นต้องทำการตรวจสอบตำแหน่งของรถขณะที่วิ่งอยู่บนสะพานอย่างละเอียด เพื่อนำไปใช้ในการวัดความเร็วและระบุตำแหน่งของรถและนำไปเทียบกับสัญญาณความเครียดที่เก็บวัดมาได้ให้ถูกต้องตรงกัน ซึ่งการเก็บตำแหน่งของรถนั้นสามารถทำได้โดยการใช้เซนเซอร์ (sensor) นำแสง โดยมีหลักการคือตัวเซนเซอร์จะมีหัวอ่านอินฟราเรด 2 หัว ดังรูปที่ 4.15 โดยหัวหนึ่งส่งสัญญาณออกและอีกหัวหนึ่งทำการรับสัญญาณ ซึ่งจะให้รถวิ่งผ่านแถบกระดาษสีขาวสลับดำ ดังรูปที่ 4.16 โดยเมื่อเซนเซอร์วิ่งผ่านแถบสี

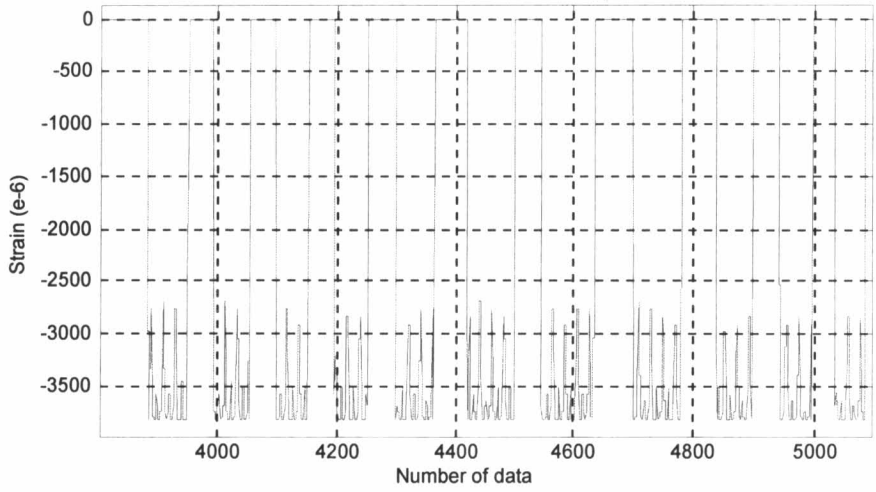
ขาวนั่นคือมีการสะท้อนของแสงกลับมาที่หัวอ่านอินฟราเรด โดยจะอ่านค่าเป็น 0 และเมื่อวิ่งผ่านแถบสีดำซึ่งแสงจะถูกดูดและไม่มีการสะท้อนกลับมายังหัวอ่านอินฟราเรด ซึ่งจะอ่านค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งจากสัญญาณที่เก็บได้นี้อ่านได้ประมาณ 3800 ไมโครสเตรน ทำให้สามารถคำนวณหาความเร็วและตำแหน่งของรถ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 โดยที่ตัวเซนเซอร์นั้นมีความถี่ในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 1024 Hz หรืออธิบายได้อีกนัยหนึ่งว่า ภายใน 1 วินาทีจะทำการเก็บข้อมูลได้ 1024 ข้อมูล ซึ่งจากกราฟจะทำให้รู้ตำแหน่งของแบบจำลองรถบรรทุกบนสะพานทดสอบ โดยความละเอียดของการกำหนดตำแหน่งนี้ จะขึ้นอยู่กับความกว้างของแถบขาว-ดำที่ติดไว้บนสะพานทดสอบ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ใช้ความกว้างของแถบขาว-ดำ แถบสีละเท่ากับ 0.5 ซม. หรือคิดเป็นค่าประมาณ 1 ส่วน 200 ของความยาวของช่วงสะพานทดสอบ



รูปที่ 4.15 ตัวเซนเซอร์วัดตำแหน่ง

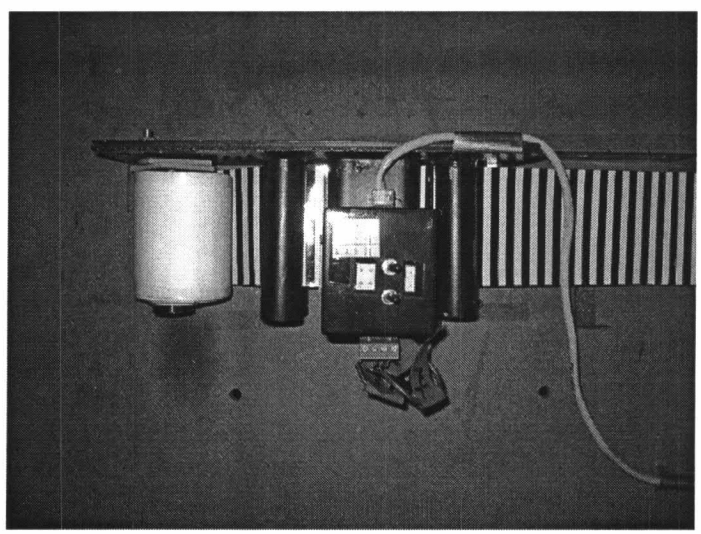


รูปที่ 4.16 แถบขาว-ดำ ความกว้าง 0.5 ซม.



รูปที่ 4.17 สัญญาณที่ตัวเซนเซอร์เก็บข้อมูล

จากงานวิจัยของธวัช ได้มีการนำเซนเซอร์ไปติดตั้งไว้ใต้แบบจำลองรถบรรทุก ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลของความขรุขระของพื้นผิวสะพานด้วย ดังนั้นการติดตั้งแถบกระดาษขาว-ดำ ที่ผิวสะพานจำลองและการติดตั้งเซนเซอร์ที่ใต้ตัวถังรถจึงไม่สามารถทำได้ ดังนั้นเซนเซอร์ที่จะใช้ในการหาตำแหน่งรถจึงได้นำไปติดตั้งนอกตัวรถ โดยนำไปติดตั้งที่สะพานนำรถเข้าแทน แล้วให้แถบกระดาษขาว-ดำม้วนติดที่ส่วนท้ายของรถจำลอง ซึ่งเมื่อรถทำการเคลื่อนที่ก็จะทำการลากแถบขาว-ดำไปด้วย และเซนเซอร์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ ณ สะพานนำรถก็สามารถเก็บสัญญาณได้เช่นกัน โดยลักษณะการติดตั้งเซนเซอร์และแถบขาว-ดำ แสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 การติดตั้งเซนเซอร์วัดตำแหน่งและแถบขาว-ดำ กับแบบจำลองสะพาน

4.5 รูปแบบการทดสอบการหาน้ำหนัก

จากแบบจำลองย่อส่วนที่ประดิษฐ์ขึ้น จะถูกนำมาทำการทดสอบเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพและความเชื่อถือได้ของวิธีการหาน้ำหนัก ซึ่งตัวแปรหลักที่จะทำการศึกษาในทุก ๆ กรณีนี้ได้แก่ ผลของความเร็วของรถบรรทุก ซึ่งจะทำการแปรค่า 3 ค่าตั้งแต่ 0.1 เมตร/วินาที ไปจนถึง 1.0 เมตร/วินาที และผลของน้ำหนักรถบรรทุก ซึ่งจะแปรค่า 3 ค่าเช่นกันตั้งแต่ 10 กก. ถึง 30 กก. และทุก ๆ กรณีจะทำการทดสอบเป็นจำนวน 5 ครั้งด้วยกัน ดังนั้นในแต่รูปแบบการทดสอบจะทำการทดสอบผลของน้ำหนักรถและผลของความเร็วรถรวมกันทั้งหมด 9 กรณีเป็นการทดสอบทั้งสิ้น 45 ครั้ง โดยมีรูปแบบหลักที่จะทำการทดสอบดังต่อไปนี้

4.5.1 การศึกษาผลของตำแหน่งการวิ่งของรถในช่องจราจร

จากงานวิจัยของพลกฤษณ์ (2003) ซึ่งได้ทำการหาน้ำหนักโดยการจำลองรูปแบบการวิ่งของรถและผลตอบสนองระหว่างรถกับสะพาน ได้ทำการศึกษาผลของการบิดจากตำแหน่งการวิ่งของรถที่เยื้องจากศูนย์กลางของสะพานด้วยการใช้แบบจำลองของแผ่นบาง พบว่าผลของการบิดต่อประสิทธิภาพในการหาน้ำหนักมีน้อยมากและสามารถละทิ้งได้ ต่อมางานวิจัยของธวัช (2003) ได้ทำการทดลองด้วยแบบจำลองย่อส่วนและใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์ด้วยชิ้นส่วนคาน โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดหลายตัวตามหน้าตัดสะพาน แต่ได้ทดสอบเพียงการวิ่งของรถที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพานเท่านั้น ยังขาดการทดสอบผลของการบิดจากตำแหน่งการวิ่งในช่องจราจรอยู่ และเนื่องจากในสภาพจริง การวิ่งของรถจะไม่ได้อยู่ที่กึ่งกลางของสะพาน โดยจะถูกแยกออกเป็นช่องจราจร และการวิ่งก็ไม่ได้เป็นเส้นตรงตั้งแต่เข้าสะพานเสมอจนออกสะพาน และอาจเกิดการเปลี่ยนช่องจราจรในขณะขับขี่จากการแซงหรือให้ทาง ดังนั้นการทดสอบประสิทธิภาพของการหาน้ำหนักจากผลของการบิดจากตำแหน่งของการวิ่งของรถในช่องจราจรจึงเป็นเรื่องสำคัญและไม่สามารถละทิ้งได้ เพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้งานจริง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะได้ทำการศึกษา โดยอุปกรณ์วัดความเครียดที่ถูกติดตั้ง จะทำการติดตั้งหลายตัวในช่วงหน้าตัด และสัญญาณที่ใช้ที่ตำแหน่งนั้นก็จะได้จากค่าเฉลี่ยของความเครียดทั้งหมดในหน้าตัดนั้น ดังนั้นการทดสอบในส่วนนี้จะทำการทดสอบการวิ่งรถที่ตำแหน่งตามแนวขวางของสะพานที่แตกต่าง กันได้แก่

1. การทดสอบการหาน้ำหนักรถขณะเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน
2. การทดสอบการหาน้ำหนักรถขณะเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งของช่องจราจรด้านซ้าย
3. การทดสอบการหาน้ำหนักรถขณะเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งของช่องจราจรด้านขวา

รวมจำนวนการทดสอบทั้งหมดในขั้นตอนนี้ 3 รูปแบบ เป็นจำนวน 27 กรณี หรือเท่ากับการทดสอบ 135 การทดสอบ

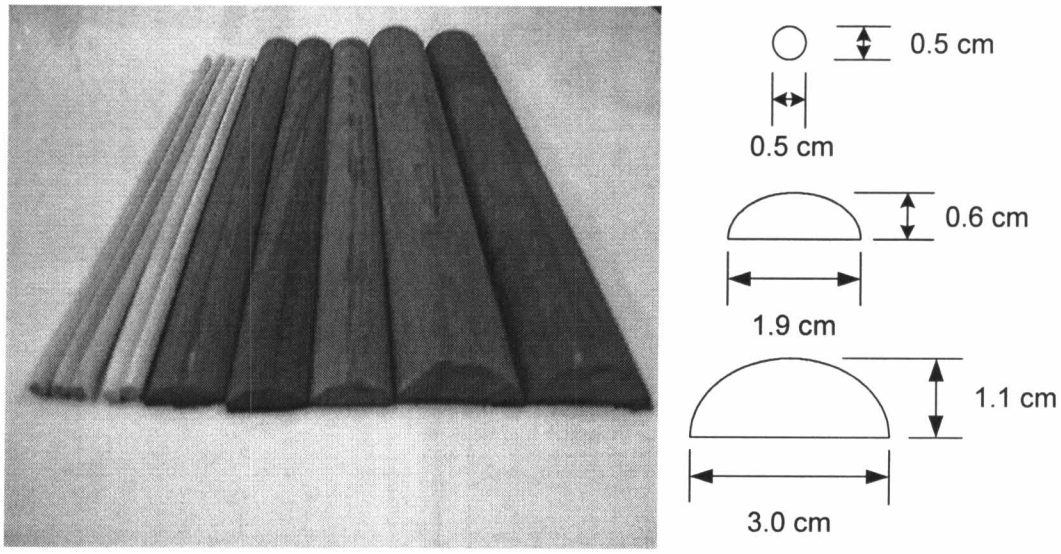
4.5.2 การศึกษาผลของความขรุขระของพื้นผิวสะพานที่มีต่อการหาน้ำหนัก

ในงานวิจัยที่ผ่านมาของพลกฤษณ์และธวัช พบว่าการศึกษาผลของความขรุขระของผิวทางต่อประสิทธิภาพในการหาน้ำหนักรถขณะเคลื่อนที่มีการศึกษาเฉพาะการศึกษาผลตอบสนองระหว่างรถและสะพาน

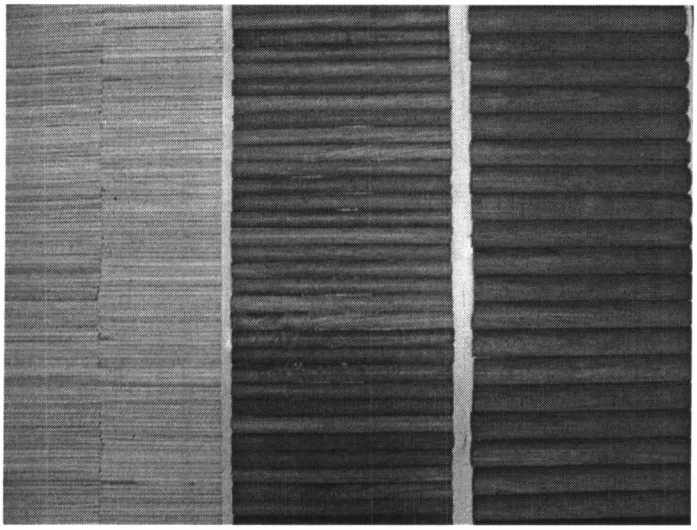
ซึ่งถูกจำลองในคอมพิวเตอร์เท่านั้น ยังไม่มีการศึกษาด้วยการทดลองในสนามจริงหรือจากแบบจำลองย่อส่วน ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลของความขรุขระที่ผ่านมา พบว่าความขรุขระมีผลต่อการหาน้ำหนักและจะทำให้ประสิทธิภาพลดลงเมื่อความขรุขระมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วนเพื่อศึกษาและตรวจสอบผลของงานวิจัยอื่น ๆ ที่ได้ทำการวิเคราะห์มาก่อน และเพื่อตรวจสอบว่าสะพานที่จะนำระบบการหาน้ำหนักรถไปติดตั้งจะต้องมีความขรุขระได้ในระดับใด จึงจะให้ผลการทายน้ำหนักยังมีความถูกต้องแม่นยำที่สูงพอและเชื่อถือได้ ดังนั้นการทดสอบในส่วนนี้จะทำการทดสอบผลของความขรุขระที่มีต่อการทายน้ำหนักด้วยระดับความขรุขระที่แตกต่าง กันได้แก่

1. การทดสอบการหาน้ำหนักรถขณะเคลื่อนที่บนสะพานที่มีพื้นผิวเรียบ
2. การทดสอบการหาน้ำหนักรถขณะเคลื่อนที่บนสะพานที่มีพื้นผิวขรุขระน้อย
3. การทดสอบการหาน้ำหนักรถขณะเคลื่อนที่บนสะพานที่มีพื้นผิวขรุขระปานกลาง
4. การทดสอบการหาน้ำหนักรถขณะเคลื่อนที่บนสะพานที่มีพื้นผิวขรุขระมาก

ซึ่งในการทดสอบทั้งหมดจะทำการทดสอบด้วยการเคลื่อนที่รถที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพาน และในการจำลองความขรุขระของพื้นผิวสะพานนั้น สามารถทำได้โดยการใช้ท่อนไม้ที่มีลักษณะมนมาวางเรียงต่อกันบนแผ่นกระดาษซึ่งมีขนาดเท่ากับสะพานจำลอง แล้วนำแผ่นกระดาษนี้ไปวางบนพื้นผิวสะพานจำลองอีกขั้นหนึ่ง โดยระดับของความขรุขระนั้นก็ขึ้นกับขนาดและรูปร่างของท่อนไม้ที่นำมาเรียงกันนั่นเอง ท่อนไม้ที่มีขนาดเล็กและมีความโค้งน้อยก็จะแทนระดับความขรุขระที่ต่ำ ท่อนไม้ที่มีขนาดใหญ่และมีความโค้งมากก็จะแทนระดับความขรุขระที่มาก โดยขนาดและรูปร่างของท่อนไม้ทั้ง 3 ระดับที่นำมาใช้ แสดงไว้ในรูปที่ 4.19ก และ 4.19ข โดยสาเหตุที่เลือกใช้ไม้ลักษณะดังรูปเนื่องจากเป็นขนาดมาตรฐานที่มีขายตามท้องตลาดจึงง่ายต่อการนำมาใช้



รูปที่ 4.19ก ขนาดและรูปร่างของท่อนไม้ 3 รูปแบบที่นำมาใช้ทำพื้นผิวขรุขระของแบบจำลองสะพาน



รูปที่ 4.19ข พื้นผิวความขรุขระทั้ง 3 ระดับที่จะนำไปติดตั้งบนแบบจำลองสะพาน

ซึ่งในรูปแบบที่ 1 นั้นจะอ้างอิงจากข้อมูลที่ได้จากผลการทดสอบของตำแหน่งการวิ่งของรถข้างต้นแล้ว รวมจำนวนการทดสอบทั้งหมดในขั้นตอนนี้ 3 รูปแบบ เป็นจำนวน 27 กรณี หรือเท่ากับการทดสอบ 135 การทดสอบ

4.5.3 <u>การทดสอบผลการหาน้ำหนักรถจากผลของสภาพเงื่อนไขบริเวณจุดรองรับของสะพาน</u>

ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.5 การศึกษาผลของสภาพเงื่อนไขที่บริเวณจุดรองรับนั้นมีความจำเป็น ดังนั้นจะได้ทำการทดสอบการหาน้ำหนักด้วยแบบจำลองสะพานที่มีพฤติกรรมเป็นแบบคานต่อเนื่อง ซึ่งมีค่าสติฟเนสของการหมุนที่จุดรองรับที่แตกต่างกัน 2 ระดับดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.1 และจะทำการศึกษาผลของความขรุขระควบคู่กันไปด้วย โดยมีรูปแบบการทดสอบดังนี้

1. การทดสอบการหาน้ำหนักรถด้วยแบบจำลองสะพานที่มีสติฟเนสของการหมุนที่จุดรองรับน้อย และพื้นผิวของสะพานไม่มีความขรุขระ
2. การทดสอบการหาน้ำหนักรถด้วยแบบจำลองสะพานที่มีสติฟเนสของการหมุนที่จุดรองรับน้อย และพื้นผิวของสะพานมีความขรุขระเล็กน้อย
3. การทดสอบการหาน้ำหนักรถด้วยแบบจำลองสะพานที่มีสติฟเนสของการหมุนที่จุดรองรับมาก และพื้นผิวของสะพานไม่มีความขรุขระ
4. การทดสอบการหาน้ำหนักรถด้วยแบบจำลองสะพานที่มีสติฟเนสของการหมุนที่จุดรองรับมาก และพื้นผิวของสะพานมีความขรุขระเล็กน้อย

รวมจำนวนการทดสอบทั้งหมดในขั้นตอนนี้ 4 รูปแบบ เป็นจำนวน 36 กรณี หรือเท่ากับการทดสอบ 180 การทดสอบ

4.5.4 การศึกษาการหาน้ำหนักรถบรรทุกที่มีจำนวนเพลา 3 เพลา

ในการย่อส่วนรถบรรทุกจริงมาเป็นแบบจำลองที่จะใช้ในการศึกษานั้น การทดสอบด้วยการใช้รถบรรทุกจำลองแบบ 2 เพลา สามารถเทียบได้กับรถบรรทุกแบบ 6 ล้อ สำหรับกรณีรถบรรทุก 10 ล้อ การสมมติให้เพลาหลัง 2 เพลารวมกันเป็นเพลาเดียวนั้นอาจทำได้ แต่เพื่อตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของระบบการทายน้ำหนักแล้ว การทดสอบด้วยรถจำลองแบบ 3 เพลานั้นจึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เพื่อศึกษาความแตกต่างของการทายน้ำหนักจากแบบจำลองทั้งสอง รวมทั้งเพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าการหาน้ำหนักของรถบรรทุก 10 ล้อด้วยการจำลองรถบรรทุกเป็นแบบ 2 เพลาสามารถนำไปอ้างอิงว่าสามารถจะนำไปใช้งานจริงได้หรือไม่ ดังนั้นแบบจำลองรถบรรทุกแบบ 3 เพลาจึงได้ถูกสร้างและนำมาทดสอบ ซึ่งในการทดสอบนี้จะทำการศึกษาผลของความขรุขระด้วยเช่นกัน โดยมีรูปแบบการทดสอบดังนี้

1. การทดสอบการหาน้ำหนักจากแบบจำลองรถบรรทุกแบบ 3 เพลา บนสภาพพื้นผิวสะพานที่ไม่มีความขรุขระ
2. การทดสอบการหาน้ำหนักจากแบบจำลองรถบรรทุกแบบ 3 เพลา บนสภาพพื้นผิวสะพานที่มีความขรุขระเล็กน้อย

รวมจำนวนการทดสอบทั้งหมดในขั้นตอนนี้ 2 รูปแบบ เป็นจำนวน 18 กรณี หรือเท่ากับการทดสอบ 90 ครั้ง ดังนั้นจำนวนการทดสอบทุก ๆ ขั้นตอนเท่ากับ 12 รูปแบบ 108 กรณี หรือเท่ากับจำนวนการทดสอบ 540 การทดสอบ

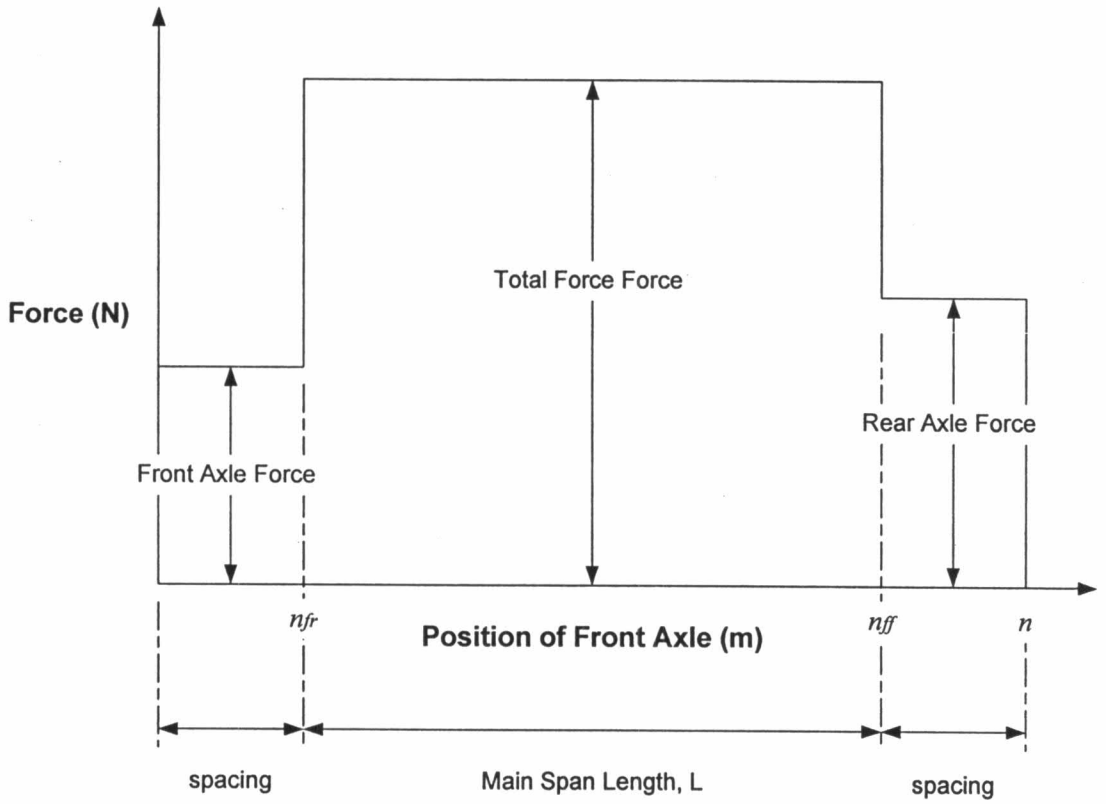
4.6 หลักการวิเคราะห์ระบบการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก

ในการหาน้ำหนักด้วยเทคนิคการคำนวณซ้ำนั้น จะต้องทำการสร้างเส้นอินฟลูเอนซ์ไลน์จากน้ำหนักที่หาได้ และอ้างอิงเป็นค่าโมเมนต์ดัดจากผลของแรงทางสถิตและนำไปหักลบกับโมเมนต์ดัดที่เก็บวัดได้ให้เหลือผลของโมเมนต์ดัดจากแรงทางพลศาสตร์ เพื่อเข้าไปสู่การคำนวณซ้ำต่อไป ซึ่งการสร้างเส้นอินฟลูเอนซ์ไลน์นั้นจะได้จากการเฉลี่ยแรงที่ทายได้ ซึ่งในการเฉลี่ยแรงที่หาได้ในแต่ละรอบนั้น จะต้องอ้างอิงกับระบบการเคลื่อนที่ของรถให้มีช่วงเวลา ตำแหน่งและจำนวนข้อมูลที่สอดคล้องกัน การหาน้ำหนักรถจึงจะได้ความถูกต้องแม่นยำสูงสุด

4.6.1 กรณีรถบรรทุกแบบ 2 เพลาเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบธรรมดา

ระบบการเคลื่อนที่ของรถในกรณีนี้ แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงด้วยกันดังรูปที่ 4.20 โดยช่วงแรกจะเป็นช่วงที่เพลาหน้าของรถบรรทุกเคลื่อนที่เข้าสู่สะพาน ซึ่งค่าความเครียดและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลานี้จะเกิดจากผลของเพลาหน้าของรถบรรทุกกระทำต่อสะพานเท่านั้น ช่วงที่สองจะเป็นช่วงที่เพลาหลังของรถเคลื่อนที่เข้าสู่สะพาน เป็นช่วงที่ทั้งเพลาหน้าและเพลาหลังอยู่บนสะพานทั้ง 2 เพลา ซึ่งค่าความเครียดและโมเมนต์ดัดที่

เกิดขึ้นในช่วงนี้จะเป็นผลของน้ำหนักรวมของรถบรรทุก และช่วงสุดท้ายจะเป็นช่วงที่เพลาหน้าของรถบรรทุกได้เคลื่อนที่ออกจากสะพานช่วงหลักไปแล้ว คงเหลือเพียงแค่น้ำหนักกระทำจากเพลาหลังเท่านั้น



รูปที่ 4.20 ระบบการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก 2 เพลาบนสะพานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบข้อหมุนธรรมดา

ดังนั้นจากแรงที่หาได้ จะสามารถแยกและนำมาเฉลี่ยเป็นแรงหรือน้ำหนักทางสถิตในเพลาหน้า เพลาหลัง และน้ำหนักรวมของรถได้ดังนี้

น้ำหนักทางสถิตของเพลาหน้า : $$\mathbf{f}_{front} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{ff}} \left(\mathbf{f}_{front}^{iden} \right)}{n_{ff}}$$

น้ำหนักทางสถิตของเพลาหลัง : $$\mathbf{f}_{rear} = \frac{\sum_{i=n_{fr}}^{n} \left(\mathbf{f}_{rear}^{iden} \right)}{\left(n - n_{fr} \right)}$$

น้ำหนักทางสถิตของน้ำหนักรวม : $$\mathbf{f}_{total} = \frac{\sum_{i=n_{fr}}^{n_{ff}} \left(\mathbf{f}_{front}^{iden} + \mathbf{f}_{rear}^{iden} \right)}{\left(n_{ff} - n_{fr} \right)}$$

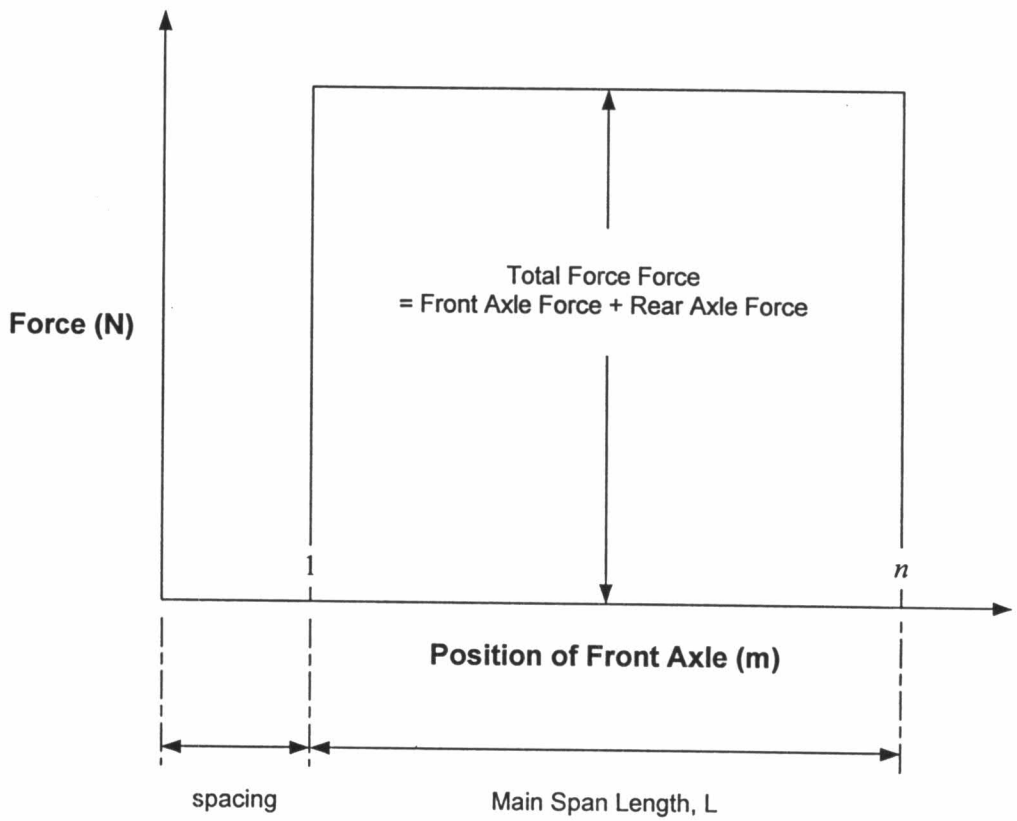
โดยที่ n_{fr} คือตำแหน่งของข้อมูลที่เก็บวัด เมื่อเพลาหน้าของรถบรรทุกเคลื่อนที่ออกจากสะพาน

n_{fr} คือตำแหน่งของข้อมูลที่เก็บวัด เมื่อเพลาหลังของรถบรรทุกเคลื่อนที่เข้าสู่สะพาน

n คือตำแหน่งของข้อมูลที่เก็บวัด เมื่อเพลาหลังของรถบรรทุกเคลื่อนที่ออกจากสะพาน

4.6.2 <u>กรณีรถบรรทุกแบบ 2 เพลาเคลื่อนที่บนสะพานต่อเนื่อง</u>

สำหรับระบบการเคลื่อนที่ในกรณีนี้ จะแตกต่างกับในกรณีที่เคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียวแบบธรรมดา เนื่องจากในการจำลองคานต่อเนื่อง ด้วยการใช้คานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบข้อหมุนสปริงในการวิเคราะห์นั้น จะใช้ได้ในกรณีที่แรงกระทำบนชิ้นส่วนคานกระทำอยู่ในช่วงคานหลักเท่านั้น ดังนั้นในการหาน้ำหนักสำหรับกรณีนี้จะวิเคราะห์ระบบการเคลื่อนที่ของรถเมื่อเพลารถทุกเพลาเคลื่อนที่อยู่บนช่วงสะพานหลักเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งการวิเคราะห์ระบบการเคลื่อนที่ในลักษณะนี้นั้นจะต้องทำการพิจารณาผลของค่าเริ่มต้นของผลตอบสนองของสะพาน (เวคเตอร์ $\mathbf{X}$) ที่แตกต่างกับกรณีรถเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียวแบบธรรมดา เพราะของผลตอบสนองของสะพานที่จะนำไปใช้ในขั้นตอนการหาน้ำหนักนั้น ไม่ได้เริ่มต้นด้วยจากสภาพหยุดนิ่ง เนื่องจากสะพานจะเริ่มมีการสั่นไหวตั้งแต่ที่รถได้เคลื่อนที่เข้าสู่สะพานช่วงนอกก่อนแล้ว ทำให้ต้องทำการพิจารณาผลของค่าเริ่มต้นของผลตอบสนองของสะพาน (เวคเตอร์ $\mathbf{X}$) ก่อนที่จะนำไปเข้าสู่ขั้นตอนการหาน้ำหนัก



รูปที่ 4.21 ระบบการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก 2 เพลาบนสะพานต่อเนื่อง

ดังนั้นจากแรงที่หาได้ จะสามารถแยกและนำมาเฉลี่ยเป็นแรงทางสถิตในเพลาหน้า เพลาหลัง และแรงจากน้ำหนักรวมของรถได้ดังนี้

แรงทางสถิตของเพลาหน้า : $$\mathbf{f}_{front} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\mathbf{f}_{front}^{iden}\right)}{n}$$

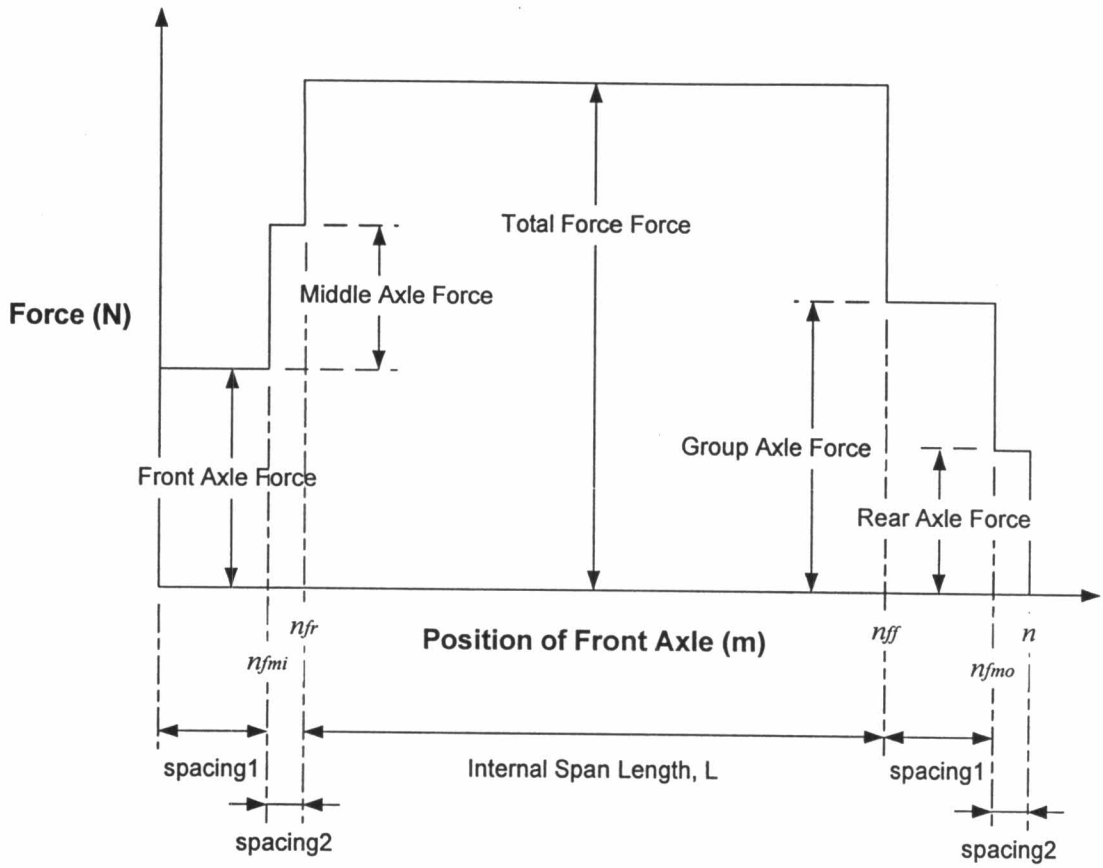
แรงทางสถิตของเพลาหลัง : $$\mathbf{f}_{rear} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\mathbf{f}_{rear}^{iden}\right)}{n}$$

แรงทางสถิตของน้ำหนักรวม : $$\mathbf{f}_{total} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\mathbf{f}_{front}^{iden} + \mathbf{f}_{rear}^{iden}\right)}{n}$$

โดยที่ n คือตำแหน่งของข้อมูลที่เก็บวัด เมื่อเพลาหน้าของรถบรรทุกเคลื่อนที่ออกจากสะพาน

4.6.3 <u>กรณีรถบรรทุกแบบ 3 เพลาเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบธรรมดา</u>

ระบบการเคลื่อนที่ของรถในกรณีนี้จะคล้ายคลึงกับกรณีที่รถบรรทุก 2 เพลาเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียวแบบธรรมดา เพียงแต่จำนวนของเพลารถได้ถูกเพิ่มขึ้นมาอีกเพลาหนึ่ง ทำให้ระบบการเคลื่อนที่ถูกแบ่งออกได้เป็น 5 ช่วงด้วยกัน ดังรูปที่ 4.22 โดยช่วงแรกจะเป็นช่วงที่เพลาหน้าของรถบรรทุกเคลื่อนที่เข้าสู่สะพาน ซึ่งค่าความเครียดและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลานี้ จะเกิดจากผลของเพลาหน้าของรถบรรทุกกระทำต่อสะพานเท่านั้น ช่วงที่สองจะเป็นช่วงที่เพลากลางของรถได้เคลื่อนที่เข้าสู่สะพาน ค่าความเครียดและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะเกิดจากผลของแรงกระทำจากเพลาหน้าและเพลากลางกระทำร่วมกัน ซึ่งช่วงนี้จะเป็นช่วงที่มีระยะสั้นเนื่องจากเพลากลางและเพลาหลังของรถนั้นจะอยู่ใกล้กันมาก ช่วงที่สามจะเป็นช่วงที่เพลาหลังของรถเคลื่อนที่เข้าสู่สะพาน เป็นช่วงที่ทั้งเพลาหน้า เพลากลางและเพลาหลังอยู่บนสะพานทั้ง 3 เพลา ซึ่งค่าความเครียดและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะเป็นผลของน้ำหนักรวมของรถบรรทุก ช่วงที่สี่จะเป็นช่วงที่เพลาหน้าของรถบรรทุกได้เคลื่อนที่ออกจากสะพานช่วงหลักไปแล้ว คงเหลือเพียงแค่น้ำหนักกระทำจากเพลากลางและเพลาหลังกระทำร่วมกัน และช่วงสุดท้ายจะเป็นช่วงที่เพลากลางของรถบรรทุกเคลื่อนที่ออกจากสะพานช่วงหลักไปแล้ว คงเหลืออยู่เพียงเพลาหลังของรถเพียงเพลาเดียวเท่านั้น ซึ่งช่วงนี้จะเป็นช่วงที่มีระยะสั้น ๆ เช่นเดียวกันกับช่วงที่สอง เนื่องจากเพลากลางและเพลาหลังของรถนั้นจะอยู่ใกล้กันมาก



รูปที่ 4.22 ระบบการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก 3 เพลาบนสะพานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบข้อหมุนธรรมดา

ดังนั้นจากแรงที่หาได้ จะสามารถแยกและนำมาเฉลี่ยเป็นแรงทางสถิตในเพลาหน้า เพลากลาง เพลาหลัง และแรงจากน้ำหนักรวมของรถได้ดังนี้

แรงทางสถิตของเพลาหน้า :
$$\mathbf{f}_{front} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{ff}} \left(\mathbf{f}_{front}^{iden} \right)}{n_{ff}}$$

แรงทางสถิตของเพลากลาง :
$$\mathbf{f}_{middle} = \frac{\sum_{i=n_{fmi}}^{n_{fmo}} \left(\mathbf{f}_{middle}^{iden} \right)}{(n_{fmo} - n_{fmi})}$$

แรงทางสถิตของเพลาหลัง :
$$\mathbf{f}_{rear} = \frac{\sum_{i=n_{fr}}^{n} \left(\mathbf{f}_{rear}^{iden} \right)}{\left(n - n_{fr} \right)}$$

แรงทางสถิตของน้ำหนักรวม :
$$\mathbf{f}_{total} = \frac{\sum_{i=n_{fr}}^{n_{ff}} \left(\mathbf{f}_{front}^{iden} + \mathbf{f}_{middle}^{iden} + \mathbf{f}_{rear}^{iden} \right)}{\left(n_{ff} - n_{fr} \right)}$$

โดยที่ n_{fr} คือตำแหน่งของข้อมูลที่เก็บวัด เมื่อเพลาหน้าของรถบรรทุกเคลื่อนที่ออกจากสะพาน

n_{fmi} คือตำแหน่งของข้อมูลที่เก็บวัด เมื่อเพลากลางของรถบรรทุกเคลื่อนที่เข้าสู่สะพาน

n_{fmo} คือตำแหน่งของข้อมูลที่เก็บวัด เมื่อเพลากลางของรถบรรทุกเคลื่อนที่ออกจากสะพาน

n_{fr} คือตำแหน่งของข้อมูลที่เก็บวัด เมื่อเพลาหลังของรถบรรทุกเคลื่อนที่เข้าสู่สะพาน

n คือตำแหน่งของข้อมูลที่เก็บวัด เมื่อเพลาหลังของรถบรรทุกเคลื่อนที่ออกจากสะพาน