

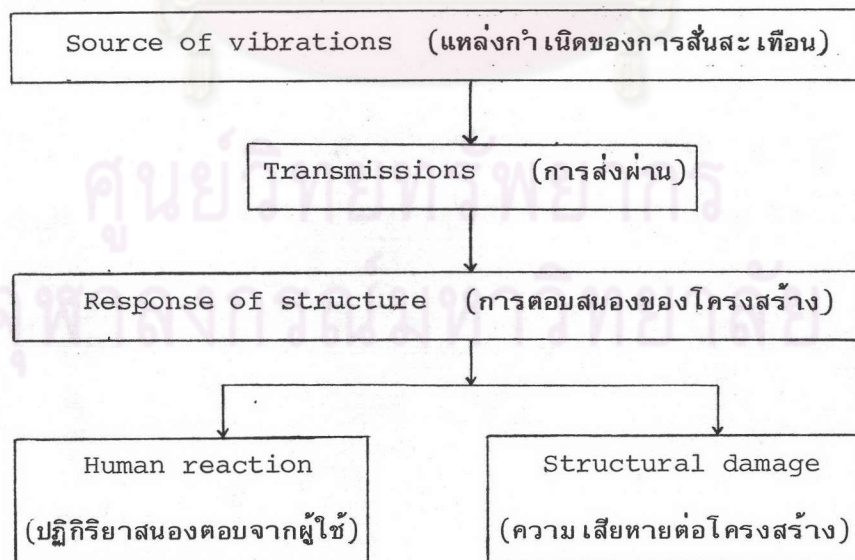


### บทที่ 3

#### ปัจจัยที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของสะพาน

ผู้ใช้สะพานสามารถรับรู้ถึงการสั่นสะเทือนของสะพานอื่น เนื่องจากปริมาณการจราจร ถึงแม้ว่าความถี่ของการสั่นจะต่ำและสามารถได้ยิน เสียงที่ความถี่มากกว่า 15 Hz ขณะที่ผู้ใช้รถยนต์ผ่านสะพานจะมีความวิตกกังวลเกิดขึ้น เพราะมีความรู้สึกกลัวว่าสะพานจะเกิดการเสียหาย เมื่อมีความรู้สึก ได้เห็นหรือได้ยินถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นนั้น ทั้ง ๆ ที่อาจจะไม่เกิดการเสียหายของสะพานเลย (Whiffin และ Leonard, 1971)

ปัญหาของการสั่นสะเทือนจากปริมาณการจราจรประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ แรงกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือน (Exciting force) การตอบสนองทางพลศาสตร์ (Dynamic response) ของโครงสร้างต่อแรงกระตุ้น และความรู้สึกของผู้ใช้สะพานต่อการสั่นสะเทือนนั้น แผนผังข้างล่างแสดงถึงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบทั้ง 3 ส่วนนี้ โดยเริ่มตั้งแต่แหล่งกำเนิดจนถึงผลกระทบต่อภาวะแวดล้อม



สำหรับปัญหาของการสั่นสะเทือนซึ่งส่งผลกระทบต่อผู้ใช้สะพาน และผลกระทบต่อโครงสร้างสะพานจะมีรายละเอียดในบทที่ 4

### 3.1 การเกิดและการส่งผ่าน (Generation and Transmission) ของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น เนื่องจากการจราจรบนสะพาน

การสั่นสะเทือนเนื่องจกยวดยานบนสะพานเกิดได้ 2 ทางคือ

1. เกิดจากการถ่ายแรงที่ไม่สมดุล (Out-of-balance forces) จากยวดยาน (เช่น จากเครื่องยนต์หรือล้อยวดยาน) สู่สะพาน
2. เกิดจากแรงปฏิกิริยา (Dynamic reaction) ระหว่างล้อยวดยานและพื้นผิวสะพาน ขณะยวดยานแล่นบนสะพาน

การถ่ายแรงที่ไม่สมดุล เกิดขึ้นน้อยมากในยวดยานปัจจุบัน สาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนคือ แรงปฏิกิริยาระหว่างล้อยวดยานกับสะพาน ส่วนการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการส่งผ่านของ Pressure waves ผ่านอากาศ (ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และความเร็วของยวดยาน) และ Pressure fluctuations จากเครื่องยนต์ ไอเสีย หรือเสียงจากยวดยาน ไม่มีผลต่อการสั่นสะเทือนเท่าไรนัก

แรงปฏิกิริยาระหว่างล้อยวดยานกับพื้นผิวสะพาน ซึ่งทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1. ลักษณะทางกายภาพของยวดยาน เช่น การกระจายของน้ำหนัก ระบบกันสะเทือน (Vehicle suspension system) ของยวดยาน ช่วงล้อ (Wheel base) และความถี่ธรรมชาติของการสั่นของยวดยาน
2. ความเร็วของยวดยาน
3. ชนิดของสะพานและความถี่ธรรมชาติของสะพาน
4. ความขรุขระของ Bridge approach Expansion joint และพื้นผิวสะพาน (Deck) ที่ไม่เรียบ ซึ่งลักษณะเหล่านี้ทำให้เกิด Initial bounce ของยวดยานบนระบบกันสะเทือน
5. ปริมาณการจราจร
6. ลักษณะของการหน่วง (Damping) ของสะพานและยวดยาน

### 7. พฤติกรรมของผู้ขับขี่รถยนต์ เช่น การเบรค การเร่งรถยนต์

คำอธิบายถึงปัญหาของการสั่นสะเทือนของสะพานจะซับซ้อน เพราะว่าเมืองคัมประกอบเหล่านี้เข้ามาเกี่ยวข้อง มีผู้ทำการวิจัยไว้หลายท่านโดยทำการพิจารณาถึงผลกระทบจากองค์ประกอบต่าง ๆ กัน (Linger และHulsbos, 1962) (Mahil และ Wieland, 1987) (Biggs, 1964) (Gupta, 1980) (Veletsos และ Huang, 1970) (Committee on Loads and Forces on Bridges ASCE, 1981)

สาเหตุใหญ่ที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนคือ แรงกระทำต่อสะพานนั้น เป็นแบบ Periodic ที่มีความถี่ของแรงนี้ เท่ากับหรือใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของสะพาน ซึ่ง Periodic forces เกิดขึ้นจากการผ่านของเพลาจากรถบรรทุกหนักที่ความเร็วและช่วงล้อค่าหนึ่ง ตลอดจนสภาพขรุขระของ Bridge approach พื้นผิวสะพาน ซึ่งจะทำให้เกิดการสั่นของรถยนต์เมื่อแล่นสู่สะพาน (Committee on Deflection of Bridges ASCE, 1958)

#### 3.1.1 ลักษณะทางกายภาพของรถยนต์

ในส่วนแรกของปัญหาการสั่นสะเทือนของสะพาน คือ แรงกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือน ซึ่งจะถือว่าน้ำหนักจากรถยนต์เป็น Forcing function (ดูหัวข้อ ก.3.1) โดยมีความถี่เท่ากับความถี่ของ Axle repetition (Linger และ Hulsbos, 1962) (Hayes และ Sbarounis, 1956) ค่าแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนจะมีค่ามากที่สุดที่ Resonance (ดูรูป ก.18) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความถี่ของ Axle repetition กับความถี่ธรรมชาติของสะพาน ( $w/p$ )

สะพานลอยไทย-เบลเยียม เป็นสะพานข้ามทางแยกวิทยุในถนนพระรามที่ 4 ซึ่งจัดว่าเป็นถนนในเมือง (Urban) ดังนั้นปริมาณการจราจรจึงหนาแน่นมาก มีรถยนต์ผ่านทุกประเภททำให้เกิดการสั่นสะเทือนได้ ในการวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งประเภทโดยคำนึงถึงลักษณะการบรรทุกเป็นสำคัญ โดยแบ่ง เป็น 7 ประเภท ดังนี้

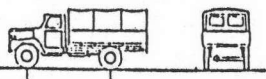

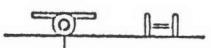
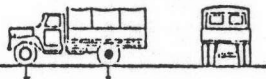
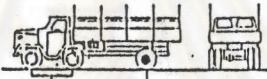
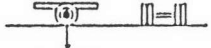
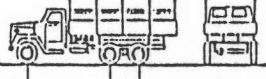
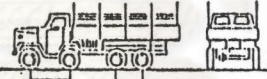


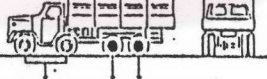
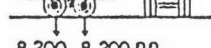
- รถบรรทุกเล็กและรถเก๋ง (2 เพลา, 4 ล้อ)
- รถมินิบัส (2 เพลา, 6 ล้อ)



- รถโดยสารขนาดใหญ่ (2 เพลา, 6 ล้อ)
- รถบรรทุกขนาดกลาง (2 เพลา, 6 ล้อ)
- รถบรรทุกขนาดใหญ่ (3 เพลา, 10 ล้อ)
- รถกึ่งพ่วง (5 เพลา, 18 ล้อ)
- รถพ่วง (5 เพลา, 18 ล้อ)

#### 3.1.1.1 น้ำหนักบรรทุก

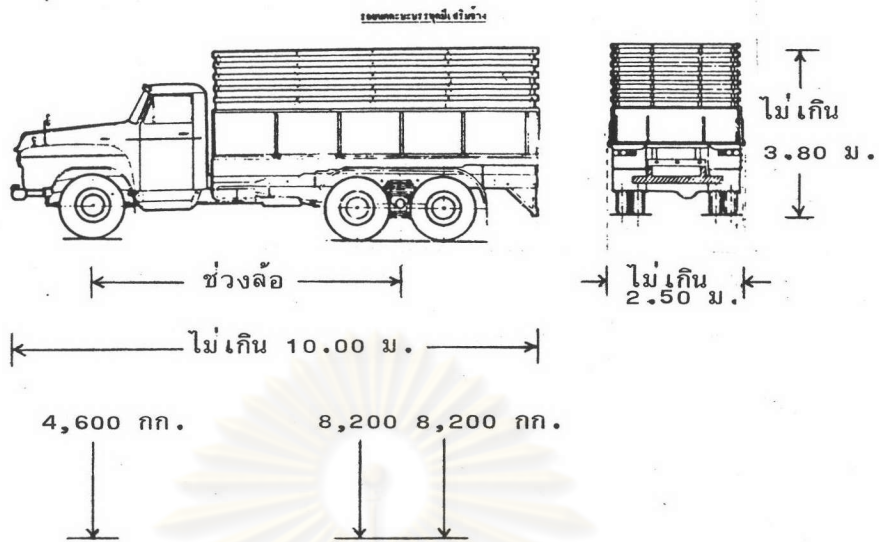
ยวดยานที่ใช้ทางหลวงในประเทศไทยจะต้องมีน้ำหนักและขนาดต่าง ๆ สอดคล้องกับที่กีดตามกฎหมาย โดยที่การกำหนดน้ำหนักบรรทุกบนทางหลวงจะใช้ตามประกาศของผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดิน ณ วันที่ 14 ธันวาคม 2519 ได้ประกาศห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดแล้วบนทางหลวง ซึ่งจะสรุปได้ดังรูป 3.1 (กรมทางหลวง, ม.ป.ป.) รูป 3.2 เป็นรถบรรทุก 3 แบบที่มีน้ำหนักบรรทุกและขนาดตามกฎหมาย

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

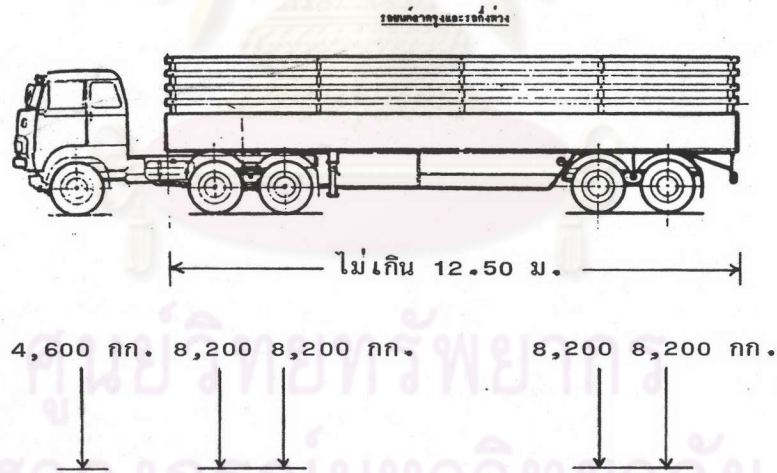
ประเภทรถ Vehicle Type	น้ำหนักกรรวม- น้ำหนักบรรทุก Gross Weight	ประเภทรถ Vehicle Type	น้ำหนักกรรวม- น้ำหนักบรรทุก Gross Weight	ประเภทรถพ่วง Trailer Type
 1,700 กก. 6,800 กก. (Kg) (Kg)	8,500 กก.(Kg)	 3,700 กก. 6,800 กก. (Kg) (Kg)	10,500 กก.(Kg)	 6,800 กก. (Kg)
 2,900 กก. 9,100 กก. (Kg) (Kg)	12,000 กก.(Kg)	 4,900 กก. 9,100 กก. (Kg) (Kg)	14,000 กก.(Kg)	 9,100 กก. (Kg)
 3,100 กก. 6,100 6,100 กก. (Kg) (Kg)	15,300 กก.(Kg)	 6,600 กก. 6,100 6,100 กก. (Kg) (Kg)	18,800 กก.(Kg)	 6,100 6,100 กก. (Kg)
 4,600 กก. 8,200 8,200 กก. (Kg) (Kg)	21,000 กก.(Kg)	 8,800 กก. 8,200 8,200 กก. (Kg) (Kg)	25,200 กก.(Kg)	 8,200 8,200 กก. (Kg)

สัญลักษณ์:  ยางเดี่ยว  ยางคู่  
Symbol : Single Tyre Dual Tyre

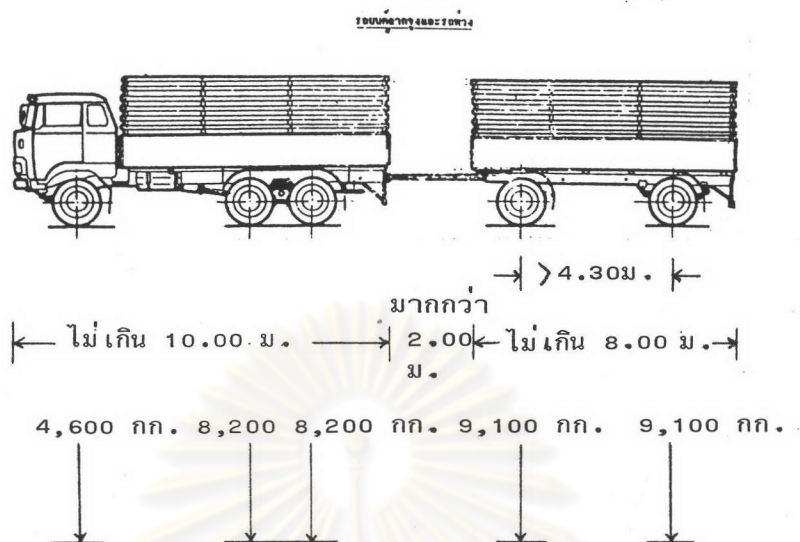
รูป 3.1 การกำหนดน้ำหนักลงเพลาและน้ำหนักกรรวมน้ำหนักบรรทุกตามกฎหมาย



(1) รถบรรทุกแบบ 3 เพลา เพลาหลัง เป็นเพลาคู่ใช้ยางคู่ มีพิกัดน้ำหนักบรรทุกรวม น้ำหนักบรรทุกไม่เกิน 21.0 ตัน



(2) รถลากจูงแบบ 3 เพลา 10 ล้อ ชนิดเพลาที่ 2 และที่ 3 เป็นเพลาคู่ ใช้ยางคู่ และส่วนฟ่วงชนิดเพลาคู่ใช้ยางคู่ มีพิกัดน้ำหนักบรรทุกไม่เกิน 37.4 ตัน



(3) รถลากจูงแบบ 3 เพลา 10 ล้อ ชนิดเพลาที่ 2 และที่ 3 เป็นเพลาคู่ใช้ยางคู่ และรถพ่วงชนิดมีเพลาไม่เกิน 2 เพลาใช้ยางคู่ มีพิภพน้ำหนักบรรทุกรวมน้ำหนักบรรทุกไม่เกิน 39.2 ตัน

รูป 3.2 พิภพน้ำหนักบรรทุกรวมน้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุก ตามกฎหมาย

ในสภาพปัจจุบัน เนื่องจากไม่สามารถควบคุมน้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุกได้อย่างแท้จริง ทำให้มีการบรรทุกเกินพิภพตามกฎหมายไปบ้าง Leonard, Grainger, และ Eyre (1974) ได้ทำการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกของรถกับระดับการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นของถนน โดยใช้รถบรรทุก 8 คัน มีน้ำหนักตั้งแต่ 32-44 ตัน พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับ Dynamic loading หรือ vibrations ไม่เด่นชัด เมื่อทำการเปรียบเทียบรถบรรทุก 2 คัน ที่มีลักษณะทางโครงสร้างคล้ายกัน (เช่น จำนวนเพลา ระยะห่างระหว่างเพลาเท่ากัน และระบบกันสะเทือนเหมือนกัน) พบว่า รถที่มีน้ำหนักบรรทุก 44 ตัน สามารถทำให้เกิดระดับการสั่นสะเทือนสูงกว่ารถที่มีน้ำหนักบรรทุก 32 ตัน เพียงเล็กน้อย และสรุปว่าสิ่งที่มีอิทธิพลต่อระดับการสั่นสะเทือน (ของถนน) คือ ระบบกันสะเทือนของยานพาหนะ (Vehicle suspension system) เช่น ยานพาหนะที่มีเพลาคู่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนได้มากกว่าเพลาเดี่ยว

สำหรับในกรณีการสั่นสะเทือนของสะพานนั้น นอกจากลักษณะทางกายภาพของยวดยาน (เช่น น้ำหนักบรรทุก) จะมีส่วนทำให้เกิดการสั่นสะเทือนแล้ว ยังจะต้องพิจารณาถึงความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของสะพานด้วย เพราะมีเงื่อนไขของ Resonance เกี่ยวข้องด้วย Committee on Deflection of Bridges ASCE (1958) ได้สำรวจพบว่า ยวดยานที่มีน้ำหนักบรรทุกปานกลาง ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนได้มากกว่ายวดยานที่มีน้ำหนักบรรทุกมากกว่า ซึ่งอาจจะเป็น เพราะว่ายวดยานที่บรรทุกปานกลางแล่นด้วยความเร็วสูงกว่า

### 3.1.1.2 ขนาดของยวดยาน

ส่วนขนาดของยวดยานนั้นอยู่ในความรับผิดชอบของกรมการขนส่งทางบก ซึ่งมีหน้าที่ในการให้ความเห็นชอบต่อ Chassis รถยนต์ต่าง ๆ ให้เป็นไปตามกฎกระทรวง ฉบับที่ 9 (พ.ศ. 2524) ออกตามความในพระราชบัญญัติขนส่งทางบก พ.ศ. 2522 ได้ให้ความเห็นชอบต่อ Chassis รถยนต์ต่าง ๆ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะเลือกมาบางยี่ห้อ (ตามตาราง 3.1) เพื่อใช้ในการศึกษาความถี่ของการสั่นสะเทือน (Forcing frequency) สำหรับเปรียบเทียบกับความถี่ที่วัดได้จริง ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตาราง 3.1 ช่วง ล้อและน้ำหนักของยานพาหนะประเภทต่าง ๆ

ประเภท	ยี่ห้อ	ชื่อแบบ Chassis	จำนวนเพลา, ล้อ	ช่วงล้อ (ม.)	สมรรถนะเพลา		น้ำหนักรวม สูงสุด (กก.)
					หน้า (กก.)	ท้าย (กก.)	
รถบรรทุกเล็ก และรถเก๋ง	ISUZU	TFR 54HP	2, 4	3.025	950	1,680	2,450
	รถมินิบัส	ISUZU	KS 21R	2, 6	3.280	2,500	5,000
รถโดยสารขนาดใหญ่	DAEWOO	BF 120	2, 6	6.100	6,000	10,500	14,080
รถบรรทุกขนาดกลาง	ISUZU	JCR 360Y	2, 6	3.600	5,000	9,200	12,000
รถบรรทุกขนาดใหญ่	ISUZU	JCM 530YX	3, 10	4.600	6,500	21,000	21,000
	รถลากจูง	SCANIA	P 93 MA 6 x 2Z	3, 10	3.510	6,500	16,000

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- โดยที่ช่วงล้อ ( $d_1$ ) เป็นระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเพลาน้ำถึงศูนย์กลางเพลาท้าย หรือถึงศูนย์กลางเพลาคู่ท้าย (Tandem) ในกรณีที่เป็นเพลาคู่
- สำหรับกรณีรถ 10 ล้อ เพลาคู่ท้าย (Tandem axle) จะมีระยะห่าง ( $d_2$ ) ระหว่างเพลาน้ำ 1.27-1.35 เมตร ในที่นี้จะใช้ค่า 1.30 เมตร
- สำหรับรถกึ่งพ่วงระยะห่างเพลาท้ายของรถลากจูงกับเพลาน้ำของส่วนพ่วง ( $d_3$ ) จะมีค่าประมาณ 7.00 เมตร

ดังนั้น Forcing frequency จะหาได้จาก

$$f_1 = \frac{V}{d_1} \quad \dots (3.1)$$

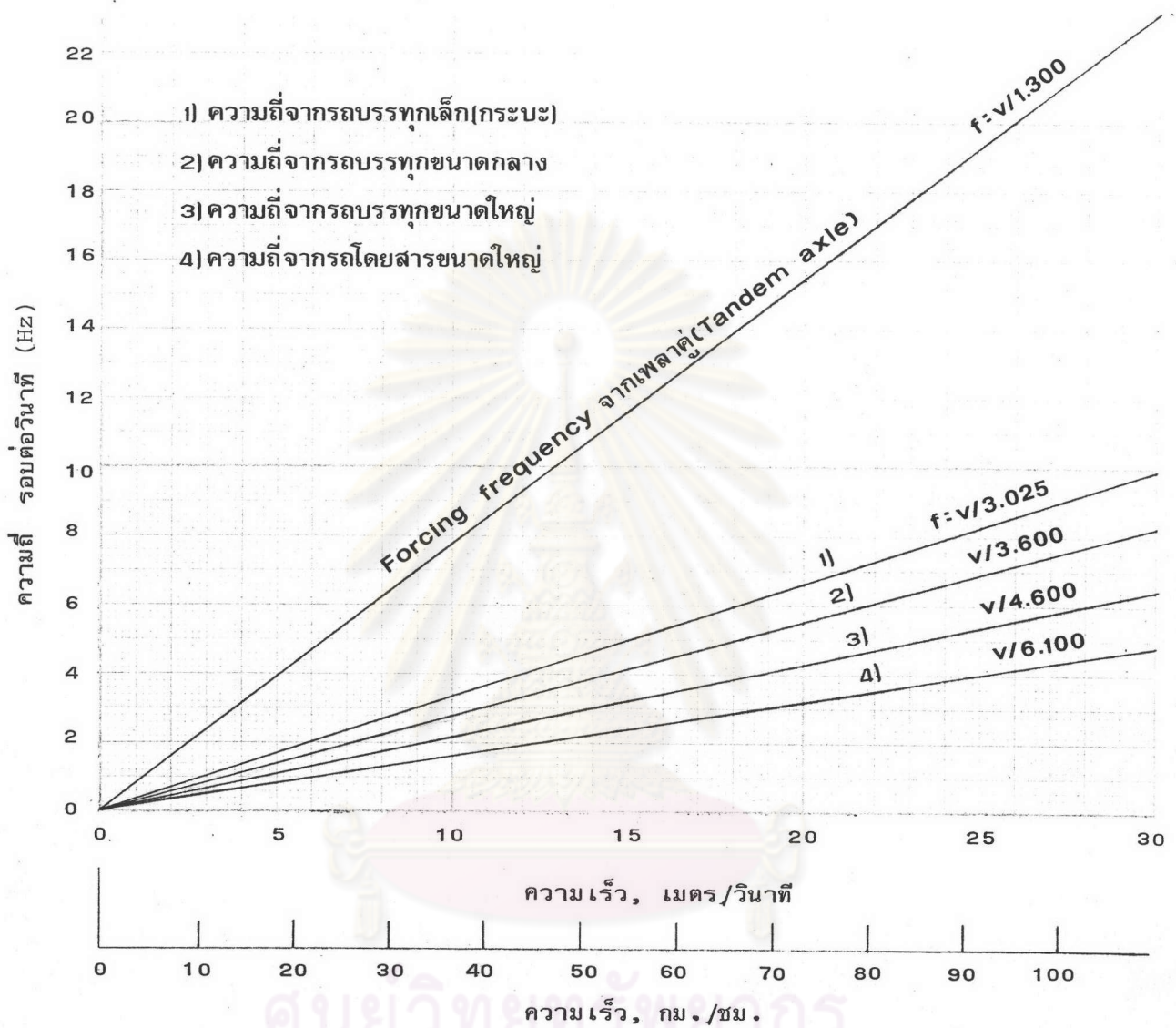
$$f_2 = \frac{V}{d_2} \quad \dots (3.2)$$

$$f_3 = \frac{V}{d_3} \quad \dots (3.3)$$

โดยที่  $f$  เป็นความถี่ของ Forcing function (Hz)

$V$  เป็นความเร็วของยานยนต์ (เมตร/วินาที)

จากสมการ (3.1, 3.2, 3.3) จะเห็นว่าความถี่ของ Forced vibration จะขึ้นอยู่กับความเร็วของยานยนต์ที่แล่น และลักษณะของยานยนต์เอง เช่น รถบรรทุกเล็กจะมีความถี่เพียงค่าเดียวที่ความเร็วหนึ่ง รถ 10 ล้อ จะมีความถี่ 2 ค่า และรถกึ่งพ่วงจะมีความถี่ 3 ค่า (Linger และ Hulsbos, 1962) ความถี่ของการสั่นสะเทือนจากยานยนต์ประเภทต่าง ๆ แสดงไว้ในรูป 3.3



รูป 3.3 ความถี่ (Forcing frequency) จากขบวนประเภทต่าง ๆ  
(Linger และ Hulsbos, 1962)

ในการศึกษาการสั่นสะเทือนของสะพานลอยไทย-เบลเยียมนี้ จะทำการวัดความถี่ของการสั่นสะเทือน ซึ่งจะเป็นความถี่ของขบวนคันใดคันหนึ่งในกรณี Out of phase และอาจจะมี effect มาจากขบวนคันอื่น ๆ ซึ่งแล่นตามกันมาเป็นขบวนเต็ม 2 ช่องทางจราจรถ้า In phase กัน ทำให้เกิดความถี่ใหม่ขึ้นมาได้

### 3.1.1.3 น้ำหนักจรถในการออกแบบสะพานตามมาตรฐาน AASHTO

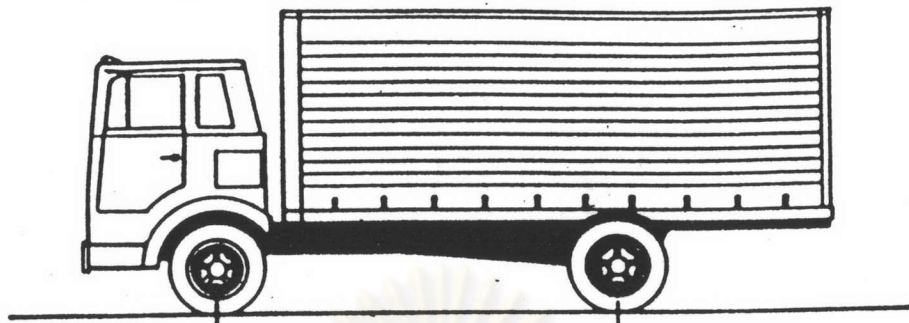
ในการออกแบบสะพานทางหลวงนั้น AASHTO (The American Association of State Highway and Transportation Officials) ได้กำหนดน้ำหนักจากการจราจรเพื่อใช้ในการออกแบบสะพานประกอบด้วย น้ำหนักรถบรรทุกมาตรฐาน (Standard Trucks) หรือน้ำหนักเต็มช่องทางจราจร (Lane Loads) ซึ่งเทียบเท่ากับ ขบวนรถบรรทุก (Truck Trains) ระบบของน้ำหนักจรถบนสะพานแบ่งเป็นระบบ H (H-Loading) และระบบ HS (HS Loading)

ระบบ H ประกอบด้วย รถบรรทุก 2 เพลา หรือน้ำหนักเต็มพื้นที่ทางจราจรซึ่งตรงกับระบบ H แบ่งน้ำหนักออกเป็น 2 ขนาดคือ H20 และ H15 น้ำหนัก H15 เท่ากับ 75% ของน้ำหนัก H20

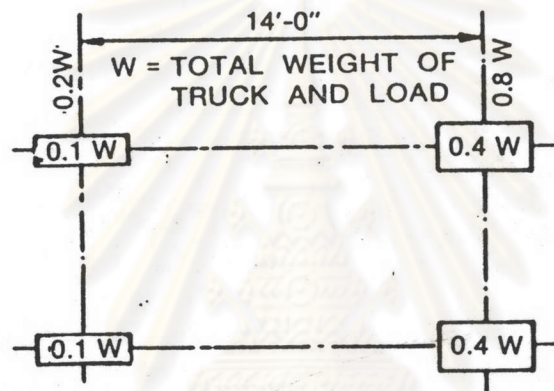
ระบบ HS ประกอบด้วย รถบรรทุกชนิดลากจูง (Tractor Truck) พร้อมด้วยส่วนพ่วง (Semi-Trailor) หรือน้ำหนักเต็มพื้นที่ทางจราจร ซึ่งตรงกับระบบ HS แบ่งน้ำหนักออกเป็น 2 ขนาดคือ HS20 และ HS15 น้ำหนัก HS15 เท่ากับ 75% ของน้ำหนัก HS20

รูป 3.4-3.6 แสดง Standard H Trucks Lane Loading และ Standard HS Trucks ตามลำดับ เนื่องจากกฎหมายไทยไม่ได้กำหนดมาตรฐานของถนนหรือสะพานไว้ กรมทางหลวงจึงใช้น้ำหนักจรถในการออกแบบสะพานด้วยน้ำหนักสูงสุดของระบบ HS คือ HS20-44 (MS18)

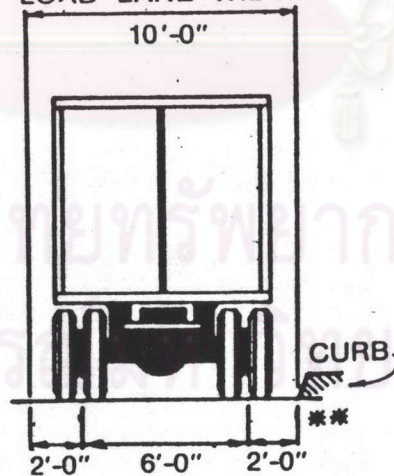
ในการใช้ Truck loading หรือ Lane loading ในการออกแบบนั้น ขึ้นอยู่กับว่าน้ำหนักชนิดไหนจะ Govern คือ ทำให้เกิด Stress สูงสุด ตาราง 3.2 แสดงโมเมนต์คัต, แรงเฉือนสูงสุดของ Simple span จาก Axle loading (one lane) ของ HS20-44 (MS18) จะพบว่าสำหรับแรงคัต Truck loading จะ Govern ถึง span 140 ฟุต (42.68 เมตร) ส่วนแรงเฉือน Truck loading จะ Govern ถึง span 120 ฟุต (36.58 เมตร)



H 20-44	8,000 LBS.	32,000 LBS.**
H 15-44	6,000 LBS.	24,000 LBS.



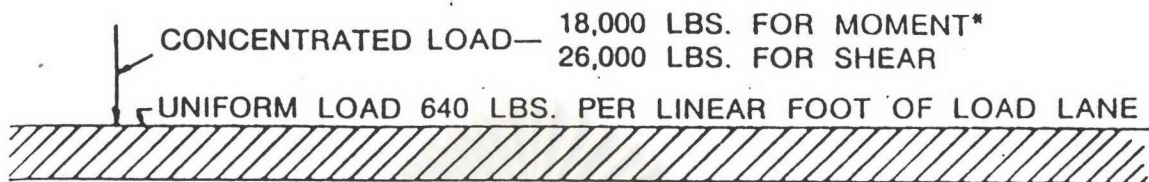
CLEARANCE AND  
LOAD LANE WIDTH



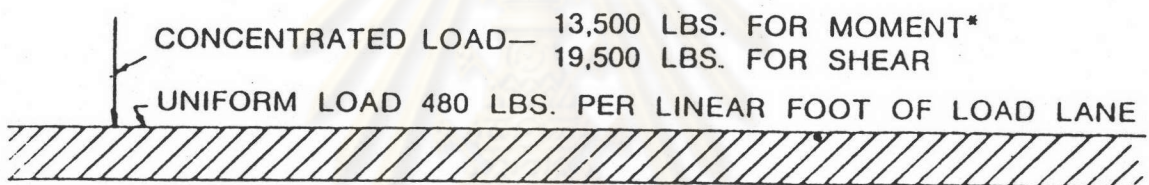
\* In the design of timber floors and orthotropic steel decks (excluding transverse beams) for H 20 loading, one axle load of 24,000 pounds or two axle loads of 16,000 pounds each spaced 4 feet apart may be used, whichever produces the greater stress, instead of the 32,000-pound axle shown.

\*\* For slab design, the center line of wheels shall be assumed to be 1 foot from face of curb.

รูป 3.4 Standard H Trucks (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1989)



H20-44 LOADING  
HS20-44 LOADING

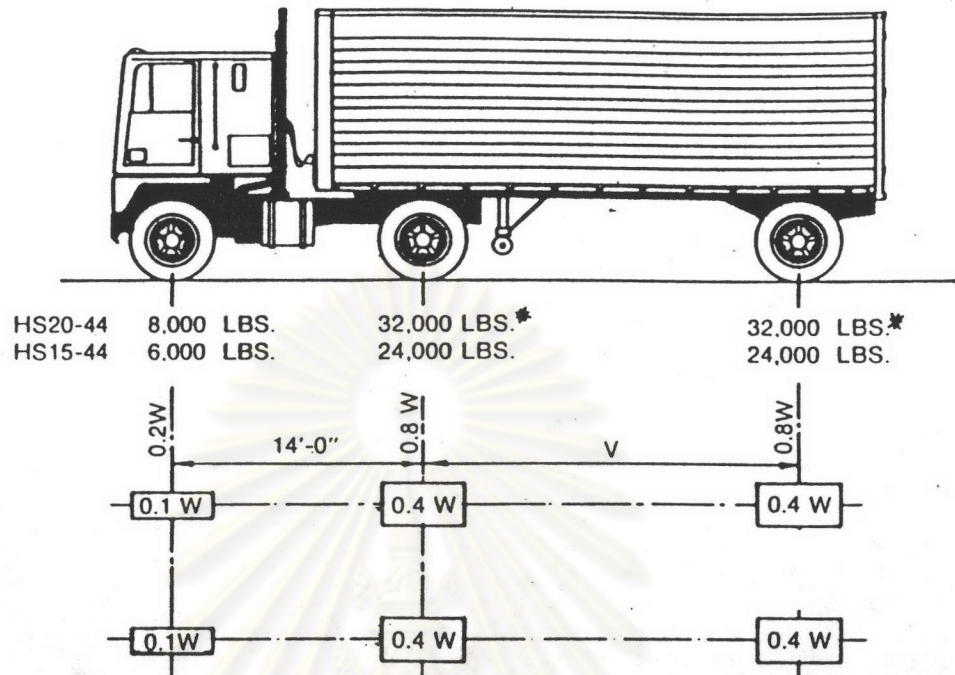


H15-44 LOADING  
HS15-44 LOADING

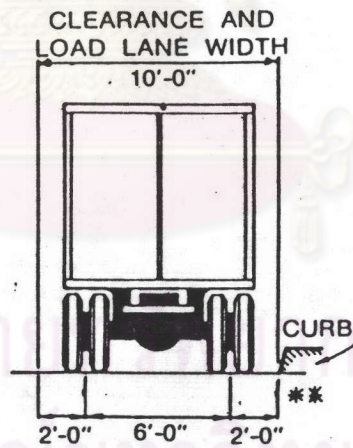
\*For the loading of continuous spans involving lane loading refer to Article 3.11.3 which provides for an additional concentrated load.

รูป 3.5 Lane Loading (American Association of State Highway  
and Transportation Officials, 1989)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



W = COMBINED WEIGHT ON THE FIRST TWO AXLES WHICH IS THE SAME AS FOR THE CORRESPONDING H TRUCK.  
 V = VARIABLE SPACING — 14 FEET TO 30 FEET INCLUSIVE. SPACING TO BE USED IS THAT WHICH PRODUCES MAXIMUM STRESSES.



\*In the design of timber floors and orthotropic steel decks (excluding transverse beams) for HS 20 loading, one axle load of 24,000 pounds or two axle loads of 16,000 pounds each, spaced 4 feet apart may be used, whichever produces the greater stress, instead of the 32,000-pound axle shown.

\*\*For slab design, the center line of wheels shall be assumed to be 1 foot from face of curb.

รูป 3.6 Standard HS Trucks (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1989)

ตาราง 3.2 แรงคัต แรงเฉือนสูงสุดของ Simple span จาก HS20-44 (MS18) Loading  
(American Association of State Highway and Transportation  
Officials, 1989)

### LOADING—HS 20-44 (MS18)

#### TABLE OF MAXIMUM MOMENTS, SHEARS AND REACTIONS— SIMPLE SPANS, ONE LANE

Spans in feet; moments in thousands of foot-pounds; shears and reactions in thousands of pounds.

These values are subject to specification reduction for loading of multiple lanes.

Impact not included.

Span	Moment	End shear and end reaction (a)	Span	Moment	End shear and end reaction (a)
1	8.0(b)	32.0(b)	42	485.3(b)	56.0(b)
2	16.0(b)	32.0(b)	44	520.9(b)	56.7(b)
3	24.0(b)	32.0(b)	46	556.5(b)	57.3(b)
4	32.0(b)	32.0(b)	48	592.1(b)	58.0(b)
5	40.0(b)	32.0(b)	50	627.9(b)	58.5(b)
6	48.0(b)	32.0(b)	52	663.6(b)	59.1(b)
7	56.0(b)	32.0(b)	54	699.3(b)	59.6(b)
8	64.0(b)	32.0(b)	56	735.1(b)	60.0(b)
9	72.0(b)	32.0(b)	58	770.8(b)	60.4(b)
10	80.0(b)	32.0(b)	60	806.5(b)	60.8(b)
11	88.0(b)	32.0(b)	62	842.4(b)	61.2(b)
12	96.0(b)	32.0(b)	64	878.1(b)	61.5(b)
13	104.0(b)	32.0(b)	66	914.0(b)	61.9(b)
14	112.0(b)	32.0(b)	68	949.7(b)	62.1(b)
15	120.0(b)	34.1(b)	70	985.6(b)	62.4(b)
16	128.0(b)	36.0(b)	75	1,075.1(b)	63.1(b)
17	136.0(b)	37.7(b)	80 [24.39 ม.]	1,164.9(b)	63.6(b)
18	144.0(b)	39.1(b)	85 [25.91 ม.]	1,254.7(b)	64.1(b)
19	152.0(b)	40.4(b)	90	1,344.4(b)	64.5(b)
20	160.0(b)	41.6(b)	95	1,434.1(b)	64.9(b)
21	168.0(b)	42.7(b)	100	1,524.0(b)	65.3(b)
22	176.0(b)	43.6(b)	110	1,703.6(b)	65.9(b)
23	184.0(b)	44.5(b)	120 [36.58 ม.]	1,883.3(b)	66.4(b)
24	192.7(b)	45.3(b)	130	2,063.1(b)	67.6
25	207.4(b)	46.1(b)	140 [42.68 ม.]	2,242.8(b)	70.8
26	222.2(b)	46.8(b)	150	2,475.1	74.0
27	237.0(b)	47.4(b)	160	2,768.0	77.2
28	252.0(b)	48.0(b)	170	3,077.1	80.4
29	267.0(b)	48.8(b)	180	3,402.1	83.6
30	282.1(b)	49.6(b)	190	3,743.1	86.8
31	297.3(b)	50.3(b)	200	4,100.0	90.0
32	312.5(b)	51.0(b)	220	4,862.0	96.4
33	327.8(b)	51.6(b)	240	5,688.0	102.8
34	343.5(b)	52.2(b)	260	6,578.0	109.2
35	361.2(b)	52.8(b)	280	7,532.0	115.6
36	378.9(b)	53.3(b)	300	8,550.0	122.0
37	396.6(b)	53.8(b)			
38	414.3(b)	54.3(b)			
39	432.1(b)	54.8(b)			
40	449.8(b)	55.2(b)			

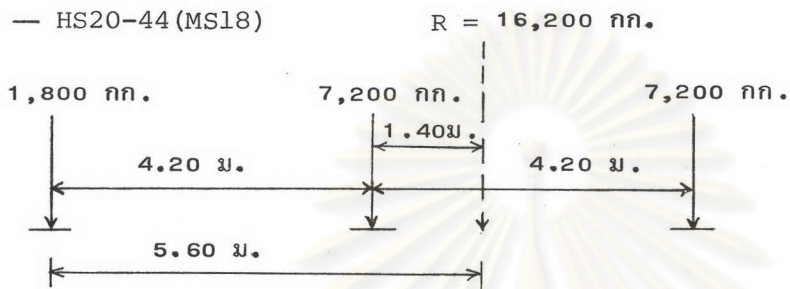
(a) Concentrated load is considered placed at the support. Loads used are those stipulated for shear.

(b) Maximum value determined by Standard Truck Loading. Otherwise the Standard Lane Loading governs.

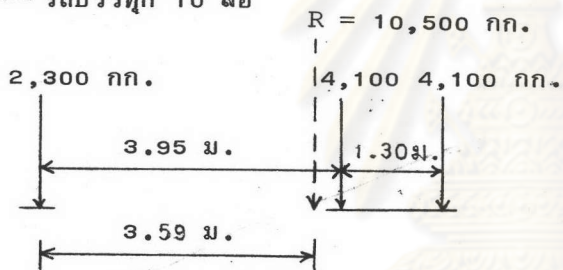


ตาราง 3.3 การเปรียบเทียบ HS20-44 (MS18) กับรถบรรทุก 10 ล้อ รถกึ่งพ่วง และรถพ่วง ใช้พิคคาน้ำหนักและช่วงล้อตามกฎหมาย สำหรับ Simple span (โดยใช้ Wheel loading ไม่คิดผลของ Impact)

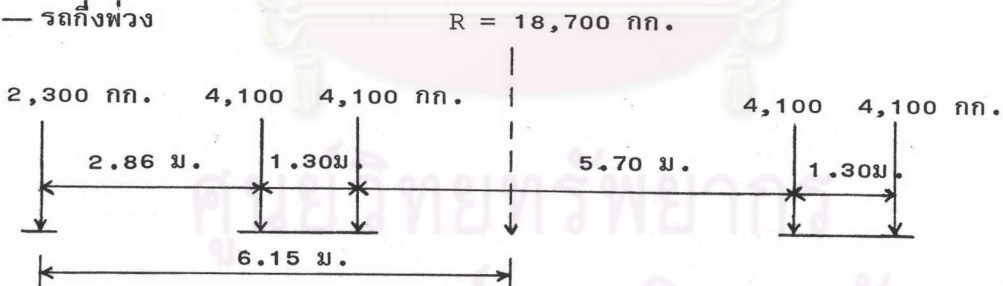
— HS20-44 (MS18)



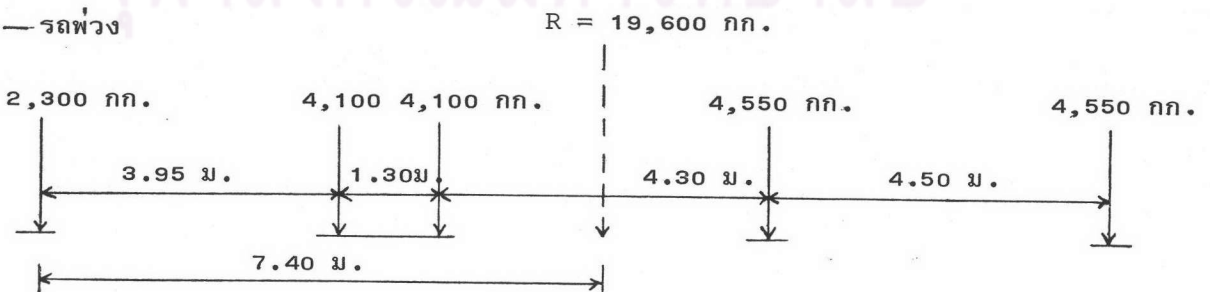
— รถบรรทุก 10 ล้อ



— รถกึ่งพ่วง



— รถพ่วง



ตาราง 3.3 แรงตัด แรงเฉือนสูงสุดของ Simple span 25.00 เมตร จาก HS20-44 (MS18) รถ 10 ล้อ รถกึ่งพ่วง รถพ่วง โดย Wheel loading ไม่คิดผลของ Impact

น้ำหนัก (Wheel loadings)	โมเมนต์ตัด (กก.-ม.)	แรงเฉือน (กก.)
HS20-44 (MS18)	82,667	14,386
รถ 10 ล้อ	58,431	9,804
รถกึ่งพ่วง	84,907	14,951
รถพ่วง	81,889	14,389

จากตาราง 3.3 จะเห็นได้ว่า HS20-44 (MS18) Loading ให้ค่าแรงตัด แรงเฉือนมากที่สุด น้อยกว่ารถกึ่งพ่วงตามกฎหมายของประเทศไทย ทั้ง ๆ ที่ HS20-44 (MS18) นั้นคิดเป็น Truck trains แต่ค่าที่ได้ก็ใกล้เคียงกันมาก ในการออกแบบโครงสร้างทางด่วนยกระดับของโครงการระบบทางด่วนขั้นที่ 2 ได้ยึดถือข้อกำหนดและมาตรฐานตาม Standard Specifications for Highway Bridges (1983) ของ AASHTO แต่ได้มีการปรับปรุงค่าน้ำหนักจรให้เหมาะสมกับสภาพรถบรรทุกในประเทศไทย โดยปรับเพิ่มเป็น 1.3 เท่าของ HS20-44 Loading (การทางพิเศษแห่งประเทศไทย, 2532)

### 3.1.2 ความถี่ธรรมชาติของสะพาน (Loaded and Unloaded Natural Frequencies)

เมื่อสะพานสั่นอย่างอิสระ (Free vibration) ความถี่ของการสั่นสะเทือน เรียกว่า ความถี่ธรรมชาติของสะพาน (Unloaded natural frequency) หาได้จากสมการ (2.17) (2.19) (2.21) ซึ่งความถี่ธรรมชาตินี้จะขึ้นอยู่กับค่า EI, L, m และถ้าเป็น

สะพานแบบต่อเนื่องจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Span ( $l_1/l_2$ ) ด้วย โดยทั่วไปความถี่ธรรมชาติของสะพานจะมีค่าอยู่ในช่วง 1-20 Hz (Leonard, 1966)

แต่เมื่อมียานยนต์แล่นบนสะพาน จะมีผลกระทบจากน้ำหนักของยานยนต์ด้วย Hayes และ Sbarounis (1956) ได้วัดความถี่ธรรมชาติของสะพาน พบว่ามีค่าน้อยกว่า Unloaded natural frequency ดังนั้นจึงคิดผลกระทบจากน้ำหนักของยานยนต์ ด้วยการประมาณให้เป็น Equivalent uniform loading เพื่อที่จะบวกเข้ากับน้ำหนักคงที่ของโครงสร้างสะพาน

ดังนั้นความถี่ธรรมชาติ (Loaded natural frequency) ของสะพานแบบ Simply supported จะกลายเป็น

$$f_i = \frac{i^2 \pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{\frac{m+2M_L}{L}}} \quad \dots (3.4)$$

และ Loaded natural frequency ของสะพานแบบ Two-span continuous เป็น

$$f_i = C_i \frac{1}{L_2} \sqrt{\frac{EI}{\frac{m+2M_L}{L_2}}} \quad \dots (3.5)$$

โดยที่  $M_L$  = น้ำหนักทั้งหมดของ Concentrated live load บนสะพาน (กิโลกรัม) ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้รถบรรทุกขนาดใหญ่หนัก 21 ตัน

ในการใช้  $2M_L/L$  เป็น Equivalent uniform loading นี้ มีกล่าวไว้ใน Rayleigh's method โดยที่จะแทนที่ Single load ด้วย Uniformly distributed load

การเลือกขนาดและจำนวนของรถบรรทุกในการปรับแก้ Unloaded natural frequency นั้น จะต้องพิจารณาถึงลักษณะและสถานที่ตั้งของแต่ละสะพานเพื่อคำนึงถึงปริมาณการจราจร ตามปกติแล้วผลกระทบจากรถบรรทุกขนาดใหญ่ (10 ล้อ) ก็ถือว่า

วิกฤติแล้ว เพราะว่าความเป็นไปได้ (Probability) สำหรับรถบรรทุกขนาดใหญ่ที่จะ In-phase กันนั้น มีความเป็นไปได้้น้อยมาก

สำหรับสะพานลอยไทย-เบลเยียม จะหาความถี่ธรรมชาติได้ดังนี้

$$E = 200 \times 10^9 \text{ N/m}^2 \left( \text{Kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} / \text{m}^2 \right)$$

$$I = (5 \times 737,093 \times 10^{-8}) = 0.0368 \text{ m}^4 \text{ (จากภาคผนวก ข)}$$

$$m = (5 \times 370 + 2 \times 70 + 27) = 2,017 \text{ kg/m (จากภาคผนวก ข)}$$

$$M_L = 21,000 \text{ kg}$$

$$C_1 = 2.00 \quad (l_1/l_2 = 0.67 \text{ จากรูป ก.5})$$

$$C_2 = 4.44 \quad (l_1/l_2 = 0.67 \text{ จากรูป ก.5})$$

ตาราง 3.4 เป็นตารางเปรียบเทียบระหว่าง Unloaded และ Loaded natural frequencies ของสะพานลอยไทย-เบลเยียม ซึ่งโดยทั่วไป Simple spans จะสั้นใน Fundamental mode (1st mode) ในขณะที่ Continuous spans จะสั้นใน First symmetric หรือ First anti-symmetric mode (1st, 2nd mode) (Committee on Deflection of Bridges ASCE, 1958)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 3.4 ความถี่ธรรมชาติของสะพานลอยไทย-เบลเยียม (Unloaded and Loaded Natural Frequencies)

Spans (m)	Unloaded natural frequency (Hz)		Loaded natural frequency (Hz)	
	1st mode	2nd mode	1st mode	2nd mode
25.00 (Simple span)	4.804	19.218	3.549	14.195
30.00 (Continuous span)	4.248	9.431	3.264	7.246

จากตาราง 3.4 จะเห็นว่าความถี่ธรรมชาติของสะพานลอยไทย-เบลเยียม มีค่าน้อยกว่า Forcing frequency จากขบวนการ ดังนั้นอาจจะเกิดกรณี Resonance ขึ้นได้กับสะพานแต่จริง ๆ แล้วมีผลของ Damping เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

### 3.2 การตอบสนอง (Response) หรือการสั่นสะเทือน (Forced vibration) ของสะพาน

ขบวนการที่แล่นผ่านสะพานทำให้เกิดการสั่นสะเทือน เมื่อขบวนการได้รับ Initial disturbance เช่น แล่นผ่าน Expansion joint หรือสภาพที่ผิดปกติ (Irregularity) ของ Bridge approach ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนนี้เป็นผลมาจาก Dynamic interaction ของขบวนการและการตอบสนองของสะพาน ซึ่งอาจพิจารณาเป็นระบบหนึ่ง (Single system)

#### 3.2.1 แอมพลิจูด (Amplitude) ของการสั่นสะเทือน

ผลกระทบจากน้ำหนักของขบวนการ ระบบกันสะเทือนของขบวนการ หรือ Expansion joint ก็ที่มีผลโดยตรงต่อ Dynamic loading ทำให้เกิดปัญหาการสั่นสะเทือนขึ้นมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จึงมีการพิจารณาถึงการตอบสนองของโครงสร้างสะพาน โดยกำหนด

ในรูปของ Impact factor ซึ่งอาจจะนิยามได้ว่า:- Impact factor เป็นอัตราส่วนระหว่างความแตกต่างของ Dynamic และ Static effect กับ Static effect ซึ่งความแตกต่างนี้อาจจะเป็น Loading หรือ Deflection ก็ได้แล้วแต่ปัญหาที่พิจารณา

ในเรื่องการสั่นสะเทือนของสะพานจากขบวนยาน เมื่อความเร็วของขบวนยานมีค่าใกล้เคียงจะเกิด Static deflection แต่เมื่อขบวนยานแล่นด้วยความเร็วจะทำให้เกิด Dynamic deflection หรือ Amplitude ดังนั้นการโก่งตัวของสะพานจากขบวนยาน (Live load deflection) จะเป็นผลรวมของ Static และ Dynamic deflections

ถึงแม้ว่า Static deflection เพิ่มขึ้น เมื่อน้ำหนักของขบวนยานเพิ่มขึ้น แต่ขบวนยานที่หนักที่สุดก็ไม่ทำให้เกิด Dynamic deflection มีค่ามากที่สุดเสมอไป หรือแม้ Expansion joint จะทำให้ Dynamic loading เพิ่มขึ้น แต่สาเหตุที่สำคัญที่สุดที่ทำให้ Amplitude ของการสั่นสะเทือนมีค่ามากที่สุดคือ ลักษณะหรือพฤติกรรมของขบวนยานที่แล่นด้วยความเร็วค่าหนึ่งทำให้เกิด Forcing frequency ซึ่งมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับความถี่ธรรมชาติของสะพาน ทำให้เกิดกรณีของ Resonance (Hayes และ Sbarounis, 1956)

จากรูป 3.3 จะเห็นว่า ถ้าขบวนยานแล่นด้วยความเร็วต่ำเงื่อนไขของ Resonance เกิดขึ้นจาก Forcing frequency ของเพลาคู่ แต่เมื่อขบวนยานแล่นด้วยความเร็วสูงสุด (Tandem axles acts as a single load) เงื่อนไขของ Resonance จะเกิดขึ้นจากความถี่ของช่วงล้อ (Wheel base) ดังนั้น Resonance จะเกิดขึ้นที่ความเร็วของขบวนยาน 2 ค่า

### 3.2.2 ผลกระทบจากชนิดของโครงสร้างสะพานต่อการสั่นสะเทือน

สะพานแบบต่อเนื่อง (Continuous spans) จะตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนอื่น เนื่องจากขบวนยานมากกว่าสะพานแบบ Simple spans (Csagoly, Campbell, และ Agarwal, 1972) จาก AASHTO (1989) หัวข้อ 3.8.2 แนะนำ Impact factor สำหรับ Live loading มีค่า  $I = 50/L+125$  สำหรับ Continuous

- span ให้ใช้  $L$  เป็นระยะระหว่างจุดตัดกลับ (contra flexure)

ดังนั้นสำหรับช่วง Span ที่ยาวเท่ากันแล้ว Impact ของ Continuous span จะมากกว่า Simple span จากสมการ (3.4) จะเห็นว่าความถี่ธรรมชาติของ Simple span เพิ่มเป็นสัดส่วนกับจำนวนเต็มยกกำลังสอง (1, 4, 9, 16, ...) ถ้า First mode frequency = 1.426 Hz, ค่า Second mode frequency จะมีค่าถึง 5.704 Hz ซึ่งก็อาจจะพ้นจาก Resonance band ของขดขาน แต่ถ้าเป็น Continuous spans (สำหรับ  $l_1/l_2 = 0.67$ ) ถ้า 1st mode มีค่า 1.426 Hz 2nd, 3rd, 4th จะมีค่าเป็น 3.137, 5.205, 9.982 Hz ตามลำดับ ซึ่งจากเหตุผลนี้ในการออกแบบ Continuous structure จะยากกว่าในการที่จะหลีกเลี่ยง Resonance band จากขดขาน

### 3.3 ความสามารถของความหน่วง (Damping Capacity)

จากหัวข้อ ก.4.2 จะพบว่า Damping มีผลกระทบอย่างมากต่อขนาดการตอบสนองของสะพานที่ใกล้ ๆ กับ Resonance frequency ถ้า Damping capacity ต่ำ ค่าแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนจะเกิดขึ้นมาก

Damping capacity ของสะพานจะขึ้นอยู่กับรูปแบบโครงสร้างของสะพาน วัสดุที่ใช้ ชนิดของ support และอื่น ๆ อีกมาก ในทางปฏิบัติไม่สามารถคำนวณหา Damping characteristics จะต้องทำการทดสอบสำหรับโครงสร้างแต่ละประเภทและความยาวของ span ต่าง ๆ กัน จำนวนหนึ่ง สะพานโดยทั่วไปมีค่า Damping ratio อยู่ในช่วง 1%-3% ของ Critical damping

### 3.4 ผลกระทบต่อการสั่นสะเทือนของสะพานอันเนื่องมาจากปริมาณการจราจรเลียบตัวสะพานและใต้สะพาน

เนื่องจากขดขานที่แล่นบนถนน เลียบตัวสะพานและใต้สะพาน จะชะลอความเร็วเมื่อแล่นเข้าใกล้สี่แยกหรือหยุด เมื่อติดสัญญาณไฟแดงแล้วค่อย ๆ เคลื่อนตัวเมื่อได้รับสัญญาณไฟเขียว

ดังนั้นความเร็วของขบวนจะต่ำการสิ้นสะเทือนจะเกิดขึ้นน้อยมาก อีกทั้งคลื่นจะต้องแผ่จาก  
ชั้นดินไปสู่ฐานรากของสะพานอีกต่อหนึ่ง ดังนั้นจะไม่มีผลกระทบต่อการสิ้นสะเทือนของสะพาน  
แต่ประการใด (วรุณ คุณวาสิ และคณะ, 2529)

ซึ่ง AASHTO หัวข้อ 3.8.1 กำหนดว่าไม่ต้องคิด Impact factor  
สำหรับโครงสร้าง "Group B" เช่น Abutments, เสาเข็ม, ท่อ หรือโครงสร้างที่มีดินถม  
มากกว่า 0.90 เมตร ซึ่งเป็นโครงสร้างที่อยู่ใต้พื้นดิน



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย