บทที่ 7

ความเป็นไปได้ในการลดการสั่นสะเทือนของรถยนต์ด้วยมวลหน่วงปรับค่า

การสั่นสะเทือนที่เกิดกับรถยนต์จากการสั่นไหวของสะพาน ทำให้ทราบว่าลักษณะของสะพานที่อยู่บนปลายคานขวางเดียวกันเมื่อเกิดการสั่นไหวจะส่งผลกระทบต่อสะพานที่อยู่ในทิศทางการจราจรตรงข้ามโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานในทิศทางดังกล่าว โดยจากผลการประเมินการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์โดยเกณฑ์มาตรฐาน ISO 2631 (1997) พบว่าการสั่นสะเทือนดังกล่าวที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ส่งผลกระทบจนทำให้เกิดการรับรู้ถึงการสั่นสะเทือนได้ และมีแนวโน้มสูงว่าจะส่งผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบายกับผู้โดยสารได้ ทั้งนี้ปัญหาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงสาเหตุจากความสามารถในการให้บริการของสะพานข้ามทางแยก ซึ่งควรจะมีการแก้ไขแต่เนื่องจากสะพานข้ามทางแยกมีอัตราการรองรับในการให้บริการที่สูงมากในแต่ละวัน ดังนั้นแนวทางสำหรับการแก้ไขปัญหาดังกล่าวนั้นต้องไม่ส่งผลกระทบต่อการให้บริการของสะพานมากนัก แนวทางหนึ่งสำหรับการแก้ปัญหาดังกล่าวคือการใช้มวลหน่วงปรับค่า (Tuned-Mass-Damper; TMD) ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับการแก้ไขปัญหา ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้นำเสนอแนวทางการใช้มวลหน่วงปรับค่าเพื่อลดผลตอบสนองของรถยนต์จากการสั่นไหวของสะพาน

7.1 มวลหน่วงปรับค่า

มวลหน่วงปรับค่า (Tuned-Mass-Damper; TMD) คืออุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างด้วยการดูดซับพลังงานการสั่นไหวของโครงสร้างเข้าสู่มวลที่ติดตั้งไว้ ระบบมวลหน่วงปรับค่าอาศัยหลักการทำงานร่วมกันขององค์ประกอบ 3 ส่วนคือ มวล สปริง ตัวหน่วง ระบบมวลหน่วงปรับค่ามีทั้งระบบเดี่ยว (Single TMD) และระบบกลุ่ม (Multiple TMDs) ในที่นี้จะนำเสนอการใช้มวลหน่วงปรับค่าแบบเดี่ยวเพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาถึงความสามารถของมวลหน่วงปรับค่าที่มีผลต่อการลดการสั่นไหวของโครงสร้างสะพานที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพาน การใช้ระบบมวลหน่วงปรับค่าจะต้องมีการออกแบบที่เหมาะสม (Optimum design) จึงจะได้ระบบที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานเพื่อลดการสั่นไหวที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาหลายงานได้นำเสนอสูตรสำเร็จสำหรับการออกแบบมวลหน่วงปรับค่าที่เหมาะสม โดยในขั้นตอนการออกแบบจะทำการคำนวณพารามิเตอร์ที่เหมาะสม 2 ส่วนประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่างความถี่ และอัตราส่วนระหว่างความหน่วง จากสมการทั่วไปดังต่อไปนี้

$$\mu = \frac{M_{TMD}}{M_{Structure}} \tag{7.1}$$

โดยที่ μ คือ อัตราส่วนระหว่างมวลหน่วงที่ได้จากการสมมติขึ้นกับมวลของโครงสร้าง

$$\alpha = \frac{\omega_{TMD}}{\omega_{Structure}} = \frac{1}{1+\mu} \tag{7.2}$$

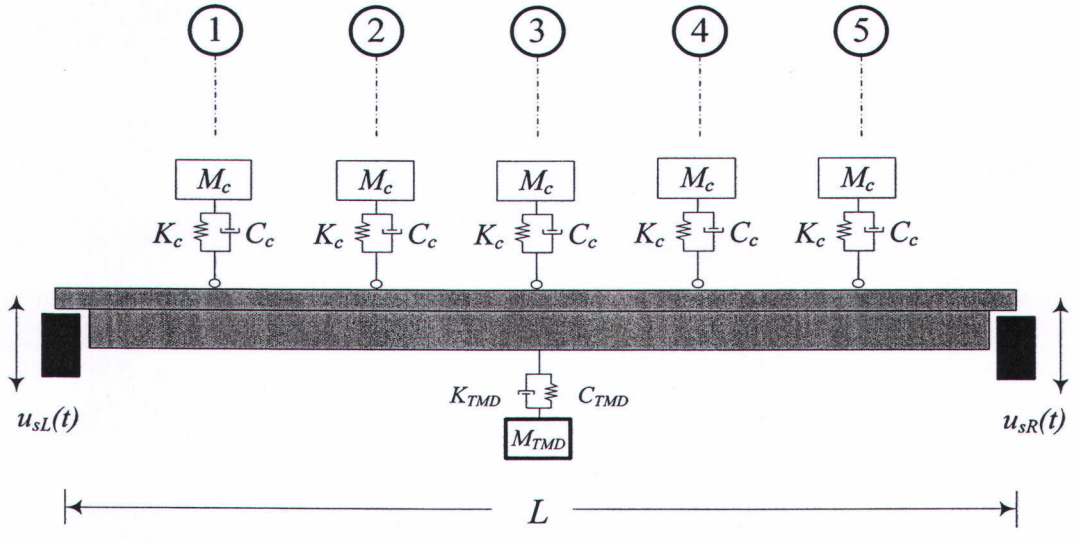
โดยที่ α คือ อัตราส่วนระหว่างความถี่ของมวลหน่วงปรับค่ากับความถี่ของโครงสร้างในโหมดหลัก

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}} \tag{7.3}$$

โดยที่ ζ_{opt} คือ อัตราส่วนความหน่วงที่เหมาะสมในการออกแบบมวลหน่วงปรับค่า

7.2 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานซึ่งติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า

การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานซึ่งติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าดังรูปที่ 7.1 สามารถใช้หลักการที่นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2.1.2 ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของรถยนต์และโครงสร้างสะพานรวมถึงมวลหน่วงปรับค่าได้ โดยขั้นตอนในการวิเคราะห์มีลักษณะที่คล้ายกันกับการวิเคราะห์แบบจำลองที่ผ่านมาในบทที่ 5 ทั้งนี้เพื่อให้เห็นถึงแนวโน้มและประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าที่มีผลต่อการลดผลตอบสนองของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานจะทำการพิจารณาแบบจำลองในบางกรณีจากกรณีที่ได้ศึกษามาแล้วในบทที่ 5 และ 6



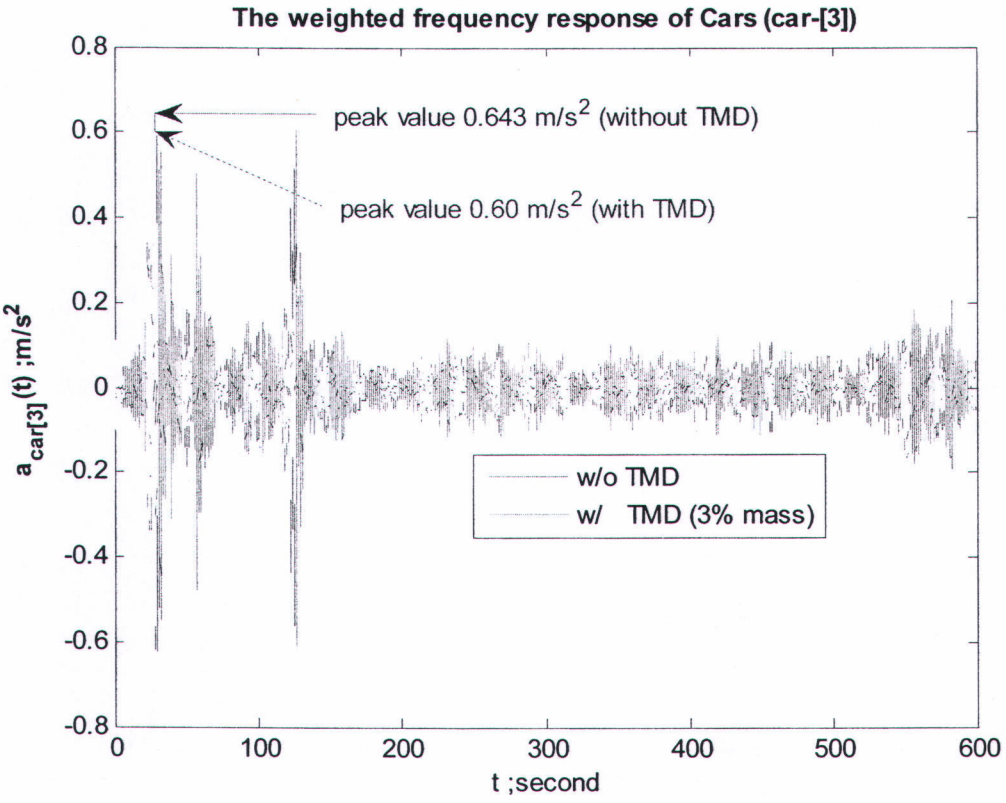
รูปที่ 7.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานซึ่งติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า

ในที่นี้ได้เลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกรณีที่รถยนต์มีคุณสมบัติด้านมวลค่าหนึ่งและความถี่ช่วงล่างกลุ่มหนึ่งเพื่อใช้ศึกษาความสามารถในการลดผลตอบสนองของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพาน ในส่วนของมวลหน่วง

ปรับค่าจะทำการกำหนดคุณสมบัติด้านมวลจำนวน 2 ค่าและใช้สมการที่ 7.1 ถึง 7.3 ในการออกแบบมวลหน่วงปรับค่าเพื่อใช้เป็นกรณีศึกษาต่อไป

7.3 ผลการวิเคราะห์และประเมินผลตอบสนองของรถยนต์ที่จอดติดบนสะพานภายหลังการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า

ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองของรถยนต์จากการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่ตำแหน่งกลางช่วงของสะพานสามารถแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานและเมื่อนำผลการวิเคราะห์ไปเข้าสู่กระบวนการประเมินผลกระทบต่อผู้โดยสารจากการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานตามเกณฑ์มาตรฐานของ ISO 2631-1 ในการวิเคราะห์นี้ได้เลือกค่าคุณสมบัติของรถยนต์บางกรณีเพื่อใช้ในการศึกษา โดยเลือกให้มวลของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานมีค่าเท่ากับ 1000 kg และค่าความถี่ช่วงล่างที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 Hz ตามลำดับ



รูปที่ 7.2 ตัวอย่างการเปรียบเทียบสัญญาณความเร่งของรถยนต์ระหว่างก่อนและหลังการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่มีมวลเป็น 3 % ของมวลสะพาน ในกรณีที่รถยนต์มีมวล 1000 kg ความถี่ช่วงล่าง 2.5 Hz

จากรูปที่ 7.2 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณความเร่งของรถยนต์แบบถ่วงน้ำหนักตามความถี่ในกรณีก่อนและหลังการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่มีการกำหนดให้มีมวลเป็น 3% ของมวลสะพาน และรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานมีค่ามวลเท่ากับ 100 kg ความถี่ช่วงล่าง 2.5 Hz ซึ่งพบว่ามวลหน่วงปรับค่าสามารถลดผลตอบสนองเชิง

ความเร่งของรถยนต์ได้ แต่ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์กรณีต่างๆซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 7.1 พบว่าแนวโน้มของมวลหน่วงปรับค่ามีแนวโน้มที่สามารถลดผลตอบสนองของรถยนต์ได้เมื่อกำหนดให้มวลมีค่ามากขึ้น

ตารางที่ 7.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความเร่งแบบถ่วงน้ำหนักตามความถี่ (Frequency weighted acceleration, $a_w(t)$ ของแบบจำลองทางรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานทั้งก่อนและหลังติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า

Car Freq.	Car pos.	PEAK			RMS			VDV		
		w/o TMD	$\mu = 1\%$	$\mu = 3\%$	w/o TMD	$\mu = 1\%$	$\mu = 3\%$	w/o TMD	$\mu = 1\%$	$\mu = 3\%$
1.0 Hz	1	0.039	0.032	0.031	0.005	0.005	0.005	0.041	0.037	0.035
	2	0.072	0.056	0.046	0.008	0.006	0.006	0.073	0.056	0.048
	3	0.085	0.067	0.061	0.009	0.007	0.006	0.088	0.066	0.056
1.5 Hz	1	0.072	0.066	0.061	0.008	0.007	0.007	0.073	0.062	0.055
	2	0.145	0.122	0.11	0.015	0.011	0.009	0.152	0.112	0.09
	3	0.172	0.143	0.129	0.018	0.013	0.011	0.184	0.133	0.107
2.0 Hz	1	0.153	0.146	0.137	0.014	0.012	0.011	0.148	0.126	0.111
	2	0.283	0.242	0.217	0.028	0.022	0.018	0.297	0.23	0.188
	3	0.338	0.276	0.254	0.034	0.025	0.021	0.355	0.271	0.222
2.5 Hz	1	0.309	0.296	0.271	0.026	0.023	0.021	0.293	0.262	0.236
	2	0.537	0.512	0.474	0.053	0.044	0.039	0.569	0.486	0.424
	3	0.643	0.633	0.6	0.064	0.053	0.046	0.677	0.579	0.513

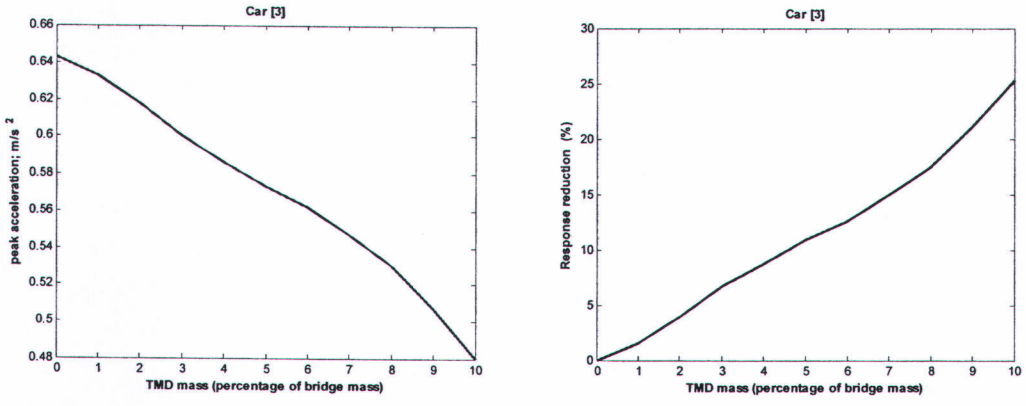
not uncomfortable

a little uncomfortable

fairly uncomfortable

ผลตอบสนองเชิงความเร่งของรถยนต์แบบถ่วงน้ำหนักตามความถี่ดังแสดงในตารางที่ 7.1 สามารถนำไปประเมินผลกระทบต่อความสามารถในการรับรู้ได้จากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นรวมถึงความรู้สึกสะดวกสบาย ซึ่งผลการประเมินที่วิเคราะห์ดังตารางที่ 7.1 พบว่าความเร่งที่เกิดขึ้นยังคงอยู่ในสภาวะที่สามารถรับรู้ได้ แต่ในส่วนของผลกระทบที่มีต่อความรู้สึกสะดวกสบายมีแนวโน้มในระดับที่ลดลง

เมื่อทำการขยายผลการพิจารณาคุณสมบัติของรถยนต์ตัวอย่างบางคุณสมบัติต่อผลจากการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า ซึ่งในที่นี้เลือกรถยนต์ที่มีคุณสมบัติเชิงมวลเท่ากับ 1000 kg และความถี่ช่วงล่างเท่ากับ 2.5 Hz โดยมีการแปรเปลี่ยนคุณสมบัติด้านมวลของมวลหน่วงปรับค่า จากการกำหนดค่ามวลของมวลหน่วงปรับค่าให้แปรเปลี่ยนไปเริ่มจาก 1 ถึง 10 % ทั้งนี้ในแต่ละกรณีจะมีการออกแบบมวลหน่วงปรับค่าโดยมีค่ามวลเป็นตัวแปรต้นซึ่งมีคุณสมบัติของสปริงและความหน่วงเป็นตัวแปรตาม ดังแสดงในรูปที่ 7.3 (ก) และ (ข)



(ก) (ข)

รูปที่ 7.3 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของรถยนต์ที่จอดติดอยู่กลางช่วงสะพานเมื่อติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้ากับสะพาน (ก) ผลตอบสนองเชิงความเร่งของรถยนต์จากการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า
(ข) ประสิทธิภาพของการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่มีต่อรถยนต์ (%)

การติดตั้งมวลหน่วงปรับค่ามีอิทธิพลต่อผลตอบสนองเชิงความเร่งของรถยนต์จนส่งผลให้การประเมินผลกระทบจากการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่มีต่อผู้โดยสารมีระดับที่เกิดความรู้สึกไม่สะดวกสบายลดลงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามการที่จะลดระดับความรู้สึกไม่สะดวกสบายของผู้โดยสารที่อยู่ภายในรถยนต์ที่จอดติดอยู่เกิดการสั่นสะเทือนจากการสั่นไหวของสะพานอาจต้องใช้มวลหน่วงที่มีค่ามวลมากถึง 10 % ของมวลสะพาน ซึ่งปริมาณมวลขนาดดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อการแอ่นตัวของสะพานอันเนื่องมาจากการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกคงที่ให้กับสะพานในการแบกรับมวลหน่วงปรับค่า ดังนั้นแนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการใช้มวลหน่วงปรับค่าควรจะมีการออกแบบมวลหน่วงปรับค่าที่สอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสะพานที่มีการสั่นไหวที่จุดรองรับ แต่สูตรคำนวณค่าคุณสมบัติที่เหมาะสมของมวลหน่วงในกรณีศึกษานี้เป็นสูตรการออกแบบทั่วไปที่ยังไม่สอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาโดยตรง หรือการใช้มวลหน่วงปรับค่าแบบกลุ่ม (Multiple TMD) ในการแก้ปัญหาผลกระทบจากการสั่นไหวที่จุดรองรับของสะพานซึ่งมีผลต่อผู้โดยสารที่อยู่ภายในรถยนต์