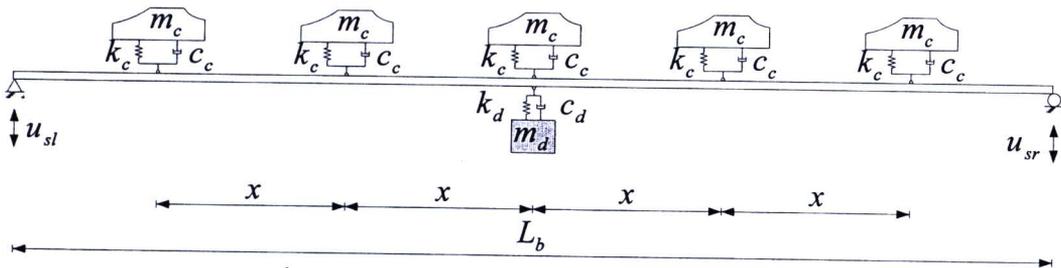


บทที่ 5

ลักษณะเฉพาะของพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ภายใต้การกระตุ้นแบบฮาร์โมนิก

5.1 ข้อกำหนดทั่วไป

ในบทนี้จะทำการศึกษาถึงพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของรถยนต์และโครงสร้างสะพาน ภายใต้การกระตุ้นแบบฮาร์โมนิกซึ่งมีการกระจัดสูงสุดเท่ากับหนึ่งเซนติเมตรที่ฐานรองทั้งสองข้างของสะพานในทิศทางเดียวกัน สะพานที่ใช้ศึกษามีช่วงความยาว (L_b) เท่ากับ 25 เมตร ($x = 5.10$ เมตร) และ 50 เมตร ($x = L_b / 6$ เมตร) ทั้งนี้จะกำหนดให้รถยนต์จอดติดบนสะพานจำนวน 5 คัน และติดตั้งมวลห้วงปรับค่าชุดเดียวที่กึ่งกลางสะพานดังแสดงในรูปที่ 5.1 รถยนต์จะถูกจำแนกออกเป็น 3 กรณี คือ $f_c < f_b$, $f_c = f_b$ และ $f_c > f_b$ มวลห้วงปรับค่าจะถูกปรับค่าความถี่ (f_d) ให้ใกล้เคียงกับค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐานของสะพาน (f_b) และพิจารณารวมผลการสั่นไหวของสะพานใน 5 โหมดแรกเท่านั้น ในกรณีของมวลห้วงปรับค่าจะเลือกใช้อัตราส่วนมวลเท่ากับ 8 % ของมวลเชิงโหมด (หรือคิดเป็น 4 % ของมวลสะพาน) ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม α_{opt} และ $\zeta_{d,opt}$ จะคำนวณจากสมการ (2.51) และ (2.52) ตามลำดับสำหรับการกระตุ้นที่ฐานแบบฮาร์โมนิก ค่าคุณสมบัติของสะพาน รถยนต์ และมวลห้วงปรับค่าถูกแสดงไว้ในตารางที่ 5.1, 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 ตำแหน่งของรถยนต์และมวลห้วงปรับค่า

ตารางที่ 5.1 ค่าคุณสมบัติของสะพาน

คุณสมบัติ	สะพานช่วงสั้น	สะพานช่วงยาว
ความยาว, L_b (m)	25.00	50.00
มวลต่อความยาว, m_b (kg/m)	2380.36	655.15
มวลเชิงโหมด, M_b (kg)	29755	16379
ความแข็งเชิงดัด, $E_b I_b$ (N-m ²)	4.64×10^9	6.18×10^9
ความถี่ธรรมชาติพื้นฐาน, f_b (Hz)	3.51	1.93
อัตราส่วนความหน่วง, ζ_b	0.03	0.03

ตารางที่ 5.2 ค่าคุณสมบัติของรถยนต์

คุณสมบัติ	$f_c = 0.5 f_b$		$f_c = f_b$		$f_c = 1.5 f_b$	
	25	50	25	50	25	50
ช่วงสะพาน, L_b (m)						
มวล, m_c (kg)	1000	1000	1000	1000	1000	1000
ความถี่ธรรมชาติ, f_c (Hz)	1.755	0.965	3.51	1.93	5.265	2.895
สติเฟนสของสปริง, k_c (kN/m)	121.60	36.76	486.38	147.05	1094.35	330.87
สัมประสิทธิ์ความหน่วง, c_c (kN-s/m)	3.31	1.82	6.62	3.64	9.92	5.46
อัตราส่วนความหน่วง, ζ_c	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

ตารางที่ 5.3 ค่าคุณสมบัติของมวลหน่วงปรับค่า

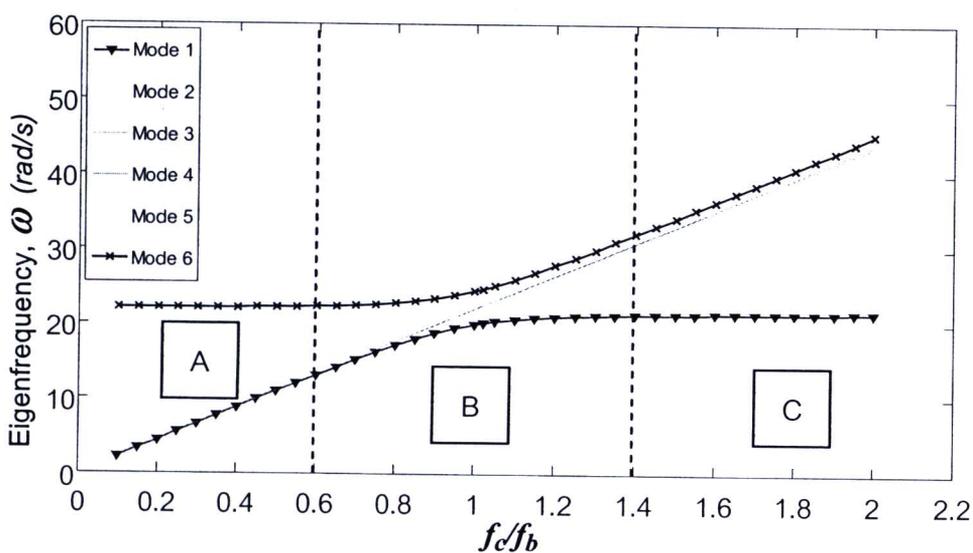
คุณสมบัติ	$L_b = 25.00$ m	$L_b = 50.00$ m
อัตราส่วนมวล, μ	0.08	0.08
อัตราส่วนปรับจูนความถี่ที่เหมาะสม, α_{opt}	0.9433	0.9433
อัตราส่วนความหน่วงที่เหมาะสม, $\zeta_{d,opt}$	0.1716	0.1716
มวล, m_d (kg)	2380	1310
ความถี่ธรรมชาติ, f_d (Hz)	3.31	1.82
สติเฟนสของสปริง, k_d (kN/m)	1030.14	171.44
สัมประสิทธิ์ความหน่วง, c_d (kN-s/m)	16.99	5.14

5.2 ลักษณะเฉพาะของคุณสมบัติเชิงโหนดสำหรับระบบปฏิสัมพันธ์สะพาน-รถยนต์

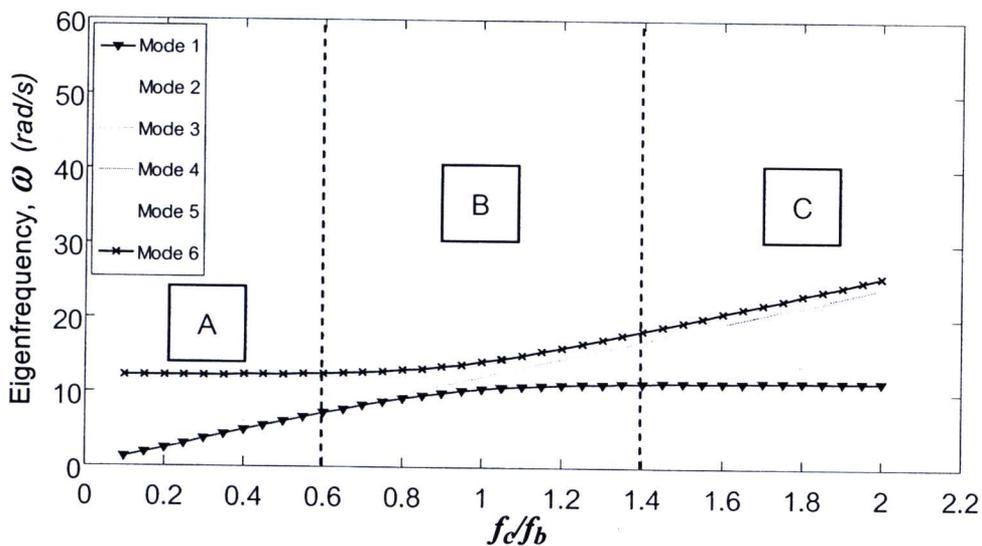
(Vehicle-bridge interaction system)

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในตารางที่ 5.1 และ 5.2 ไปวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติเชิงโหนดด้วยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจะได้ลักษณะกราฟของค่าไอเกนความถี่ดังแสดงในรูปที่ 5.2 สามารถพิจารณาแบ่งออกเป็น 3 บริเวณดังนี้ บริเวณ A กราฟจะเป็นเส้นตรงสำหรับทุกโหมดการสั่นเมื่อความถี่ของรถยนต์ $f_c \leq 0.6 f_b$ บริเวณ B กราฟจะเป็นเส้นโค้งเฉพาะ โหมดการสั่นที่ 1 และ 6 เท่านั้นเมื่อ $0.6 < f_c < 1.4 f_b$ เนื่องจากผลของการปฏิสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างรถยนต์กับสะพาน และบริเวณ C กราฟจะเป็นเส้นตรงสำหรับทุกโหมดการสั่นเมื่อ

$f_c \geq 1.4 f_b$ จากผลการศึกษาโหมดการสั่นของระบบปฏิสัมพันธ์สะพาน-รถยนต์ (รูปที่ 5.3) พบว่าทั้ง 3 บริเวณสำหรับโหมดการสั่นที่ 2 ถึง 5 การสั่นสะเทือนโดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่รถยนต์เท่านั้น สำหรับในส่วนโครงสร้างสะพานจะเกิดการสั่นสะเทือนมากในช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรงตามแนวราบซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติเชิงมุมพื้นฐานของสะพาน

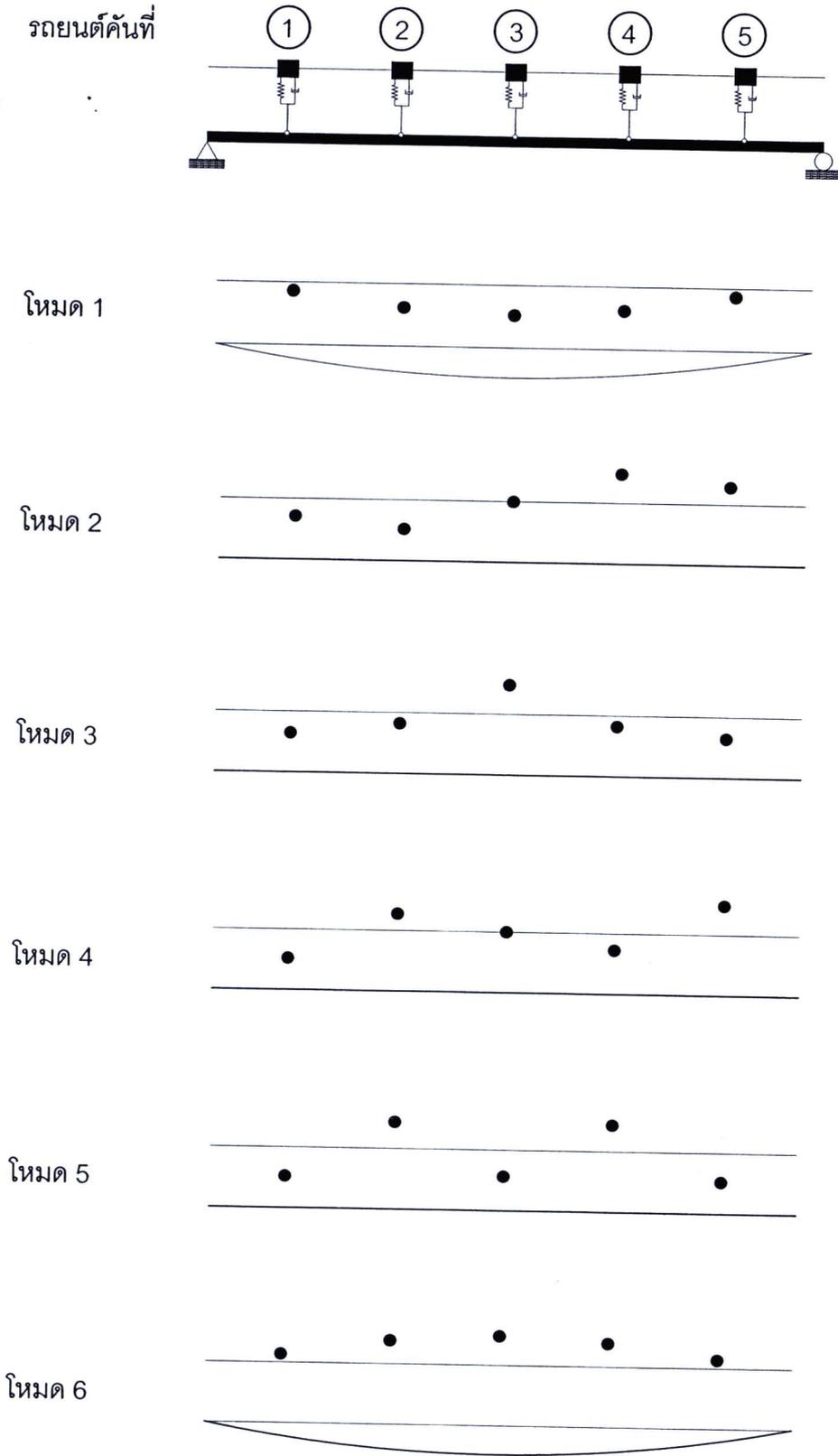


(ก) สะพานช่วงสั้น ($L_b = 25$ m)



(ข) สะพานช่วงยาว ($L_b = 50$ m)

รูปที่ 5.2 ค่าไอเกนความถี่ของระบบปฏิสัมพันธ์เปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่ของรถยนต์ (ก) สะพานช่วงสั้น ($L_b = 25$ m) และ (ข) สะพานช่วงยาว ($L_b = 50$ m)



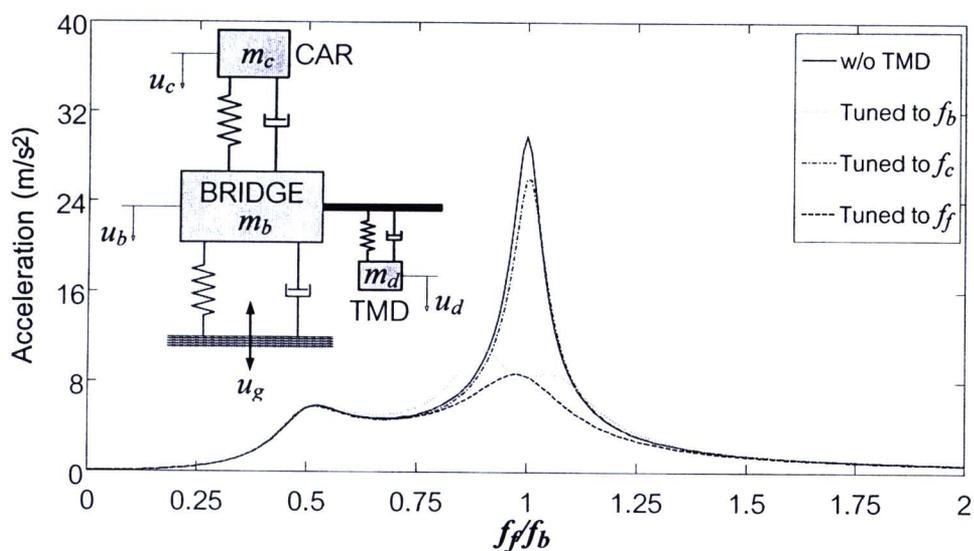
รูปที่ 5.3 รูปร่างโหมดการสั่นต่ำสุด 6 โหมดแรกของระบบปฏิสัมพันธ์สะพาน-รถยนต์

ในสถานการณ์จริงนั้น เราไม่สามารถนำมวลหน่วงปรับค่าไปติดตั้งเข้ากับรถยนต์ได้โดยตรง แต่สามารถทำได้โดยการนำไปติดตั้งที่ใต้ท้องสะพานแทน เพราะฉะนั้น หากต้องการลดผลการสั่นสะเทือนให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ความถี่ของมวลหน่วงปรับค่าจะต้องถูกปรับค่าให้ใกล้เคียงกับค่าไอเกนความถี่ในช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรงตามแนวราบซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการควบคุมการสั่นสะเทือนของสะพาน เพราะหากสะพานเกิดการสั่นสะเทือนน้อยลงแล้วจะมีแนวโน้มทำให้การสั่นสะเทือนของรถยนต์ลดลงตามไปด้วย

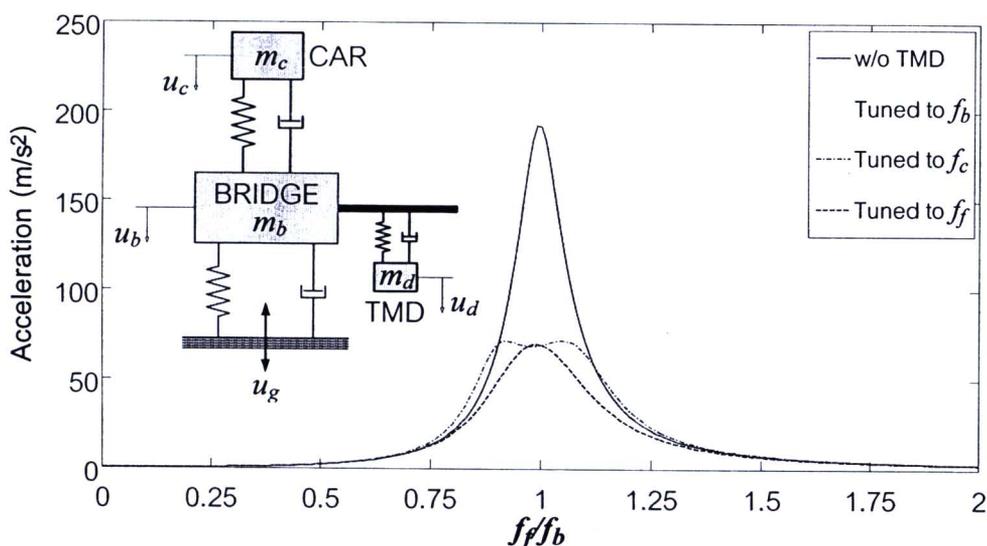
5.3 เงื่อนไขการปรับค่าพารามิเตอร์ของมวลหน่วงปรับค่า

ในเบื้องต้นจะศึกษาเงื่อนไขการปรับค่าความถี่ของมวลหน่วงปรับค่า (f_d) ด้วยแบบจำลองที่มีระดับขั้นความถี่เท่ากับสามถูกกระตุ้นด้วยการกระตุ้นแบบฮาร์โมนิกซึ่งมีการกระจัดสูงสุดเท่ากับหนึ่งเซนติเมตรที่ฐานรองรับ $u_g(t)$ ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ซึ่งใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ การกระจัดสัมพัทธ์ของสะพาน u_b , มวลสะพาน $m_b = 59500$ kg, ความถี่ธรรมชาติพื้นฐานของสะพาน $f_b = 3.51$ Hz, อัตราส่วนความหน่วงของสะพาน $\zeta_b = 0.03$, การกระจัดสัมบูรณ์ของรถยนต์ u_c , มวลรถยนต์ $m_c = 500$ kg, ความถี่ของรถยนต์ประกอบด้วย $f_c = 0.5 f_b$, $f_c = f_b$ และ $f_c = 1.5 f_b$, อัตราส่วนความหน่วงของรถยนต์ $\zeta_c = 0.15$, การกระจัดสัมบูรณ์ของมวลหน่วงปรับค่า u_d , อัตราส่วนมวลของมวลหน่วงปรับค่าต่อมวลเชิงโหมด $\mu = 0.08$ (หรือคิดเป็น 4 % ของมวลสะพาน), อัตราส่วนปรับค่าความถี่ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่าต่อความถี่สะพาน $\alpha_{opt} = 0.9433$ และ อัตราส่วนความหน่วงที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่า $\zeta_{d,opt} = 0.1716$ โดยมีเงื่อนไขการปรับค่าดังนี้ (ก) ปรับค่าไปที่ $f_d = f_b$ (ข) ปรับค่าไปที่ $f_d = f_c$ และ (ค) ปรับค่าไปที่ $f_d = f_f$ ซึ่งผลการวิเคราะห์ในโดเมนของความถี่เมื่อสมมติให้มีการกระตุ้นที่ฐานรองรับของสะพานได้จากการนำค่าความเร่งสัมบูรณ์สูงสุดของรถยนต์ในโดเมนของเวลาที่สภาวะการสั่นแบบคงที่ (Steady-state vibration) ในแต่ละค่าความถี่ของการกระตุ้นมาสร้างกราฟผลตอบสนองดังแสดงในรูปที่ 5.4 โดยที่แกนตั้งแสดงค่าความเร่งสัมบูรณ์ของรถยนต์และแกนนอนแสดงค่าอัตราส่วนความถี่ของการกระตุ้นต่อความถี่ธรรมชาติของสะพาน (f_f / f_b) ผลการวิเคราะห์พบว่าหากปรับจนไปที่ f_f จะสามารถควบคุมการสั่นสะเทือนของรถยนต์ได้มากที่สุด แต่จะไม่มีประสิทธิภาพในการลดผลการสั่นในช่วงความถี่ของการกระตุ้นใกล้เคียงกับความถี่ของรถยนต์ซึ่งหากความถี่ดังกล่าวแตกต่างจากค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานมากดังแสดงในรูปที่ 5.4 เพราะความรุนแรงของการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นน้อยเนื่องจากการสั่นสะเทือนส่วนใหญ่ถูกดูด

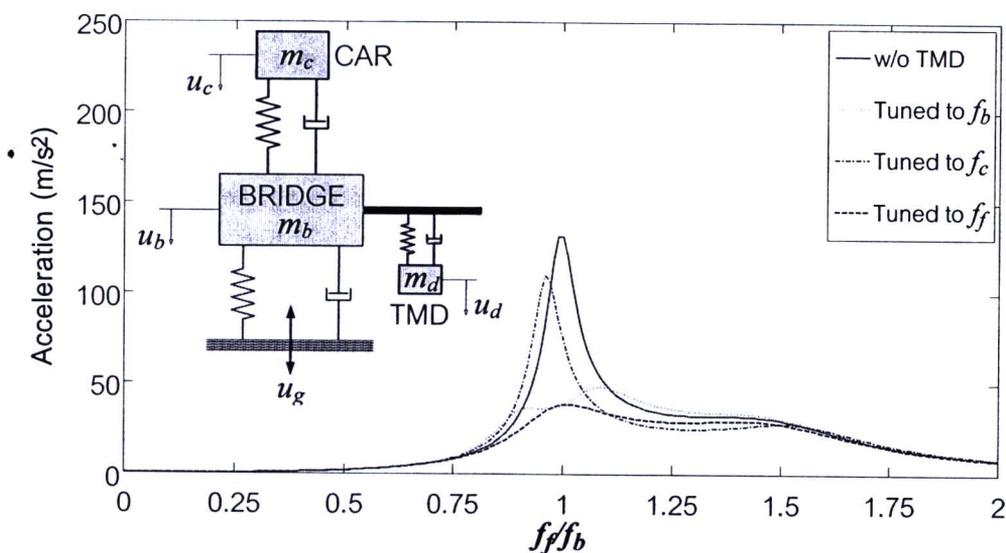
ขับโดยสะพานก่อนที่จะส่งผ่านไปยังรถยนต์ อีกทั้งมวลหน่วงปรับค่าถูกติดตั้งไปที่สะพานแทนตัวรถยนต์ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมเนื่องจากขีดจำกัดในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตาม มวลหน่วงปรับค่าที่เลือกใช้นั้นเป็นแบบ Passive control ซึ่งไม่สามารถปรับค่าความถี่ได้โดยอัตโนมัติเมื่อความถี่ของการกระตุ้นเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นเงื่อนไขการปรับค่าที่เป็นไปได้และมีประสิทธิภาพคือการปรับค่าไปที่ความถี่ธรรมชาติของสะพาน เพราะสามารถควบคุมการสั่นสะเทือนได้ดีในย่านความถี่การกระตุ้นเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของสะพาน โดยในย่านความถี่นี้จะเกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงมากเนื่องจากการกำทอนระหว่างการกระตุ้นที่ฐานรองรับกับตัวโครงสร้างสะพาน ซึ่งคาดว่าจะเป็สภาพปัญหาที่มักพบในความเป็นจริง



(น) $f_c = 0.5 f_b$



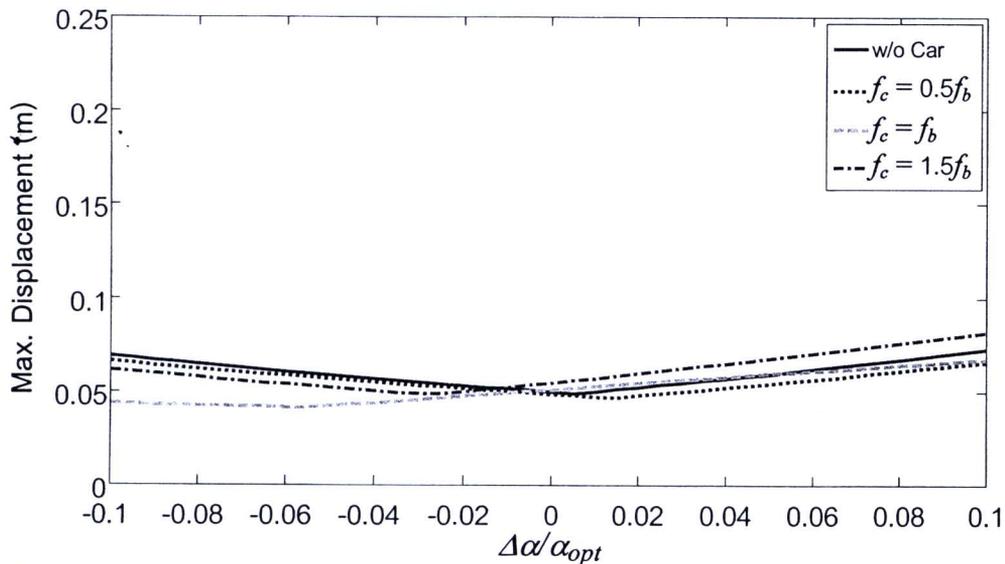
(ข) $f_c = f_b$

(ค) $f_c = 1.5 f_b$

รูปที่ 5.4 ความเร่งสัมบูรณ์ของรถยนต์ของแบบจำลองที่มีระดับชั้นความเร็วเท่ากับสามด้วยการใช้ค่าพารามิเตอร์ $m_b = 59500$ kg, $f_b = 3.51$ Hz, $\zeta_b = 0.03$, $m_c = 1000$ kg, $\zeta_c = 0.15$, $\mu = 0.08$, $\alpha_{opt} = 0.9433$ และ $\zeta_{d,opt} = 0.1716$ (ก) $f_c = 0.5 f_b$ (ข) $f_c = f_b$ และ (ค) $f_c = 1.5 f_b$

5.4 การเบี่ยงเบนของค่าอัตราส่วนปรับค่าความถี่

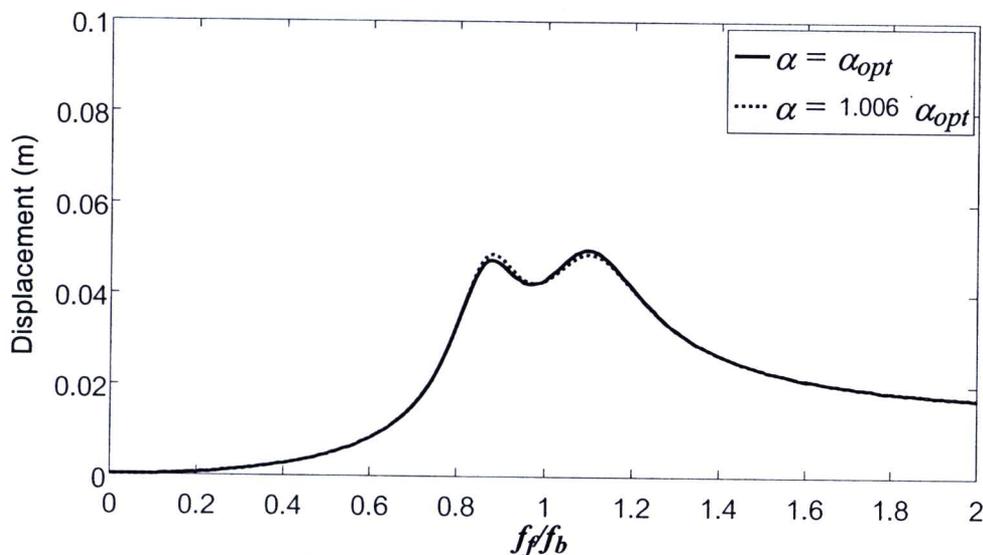
ในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบค่าอัตราส่วนปรับค่าความถี่ที่เหมาะสม ($\alpha_{opt} = 0.9433$) ตามสูตรที่เสนอโดย Tsai และ Lin (1993) ในสมการ (2.51) ก่อนที่จะนำไปใช้ออกแบบมวลหน่วงปรับค่าเพื่อควบคุมการสั่นสะเทือนของรถยนต์ เนื่องจากว่าสูตรดังกล่าวเป็นค่าโดยประมาณถูกสร้างขึ้นเพื่อลดผลการสั่นของโครงสร้างหลักที่มีความหน่วง ซึ่งเป็นแบบจำลองชนิดรวมมวลที่มีระดับชั้นความเร็วเท่ากับหนึ่งภายใต้การกระตุ้นแบบฮาร์โมนิกที่ฐานรองเนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่ง แต่ในการศึกษาครั้งนี้ โครงสร้างหลักเป็นสะพานซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีความต่อเนื่องและมีรถยนต์จอดติดอยู่บนสะพานภายใต้การกระตุ้นที่ฐานรองเนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งและความเร่ง เพราะฉะนั้นอาจเป็นไปได้ที่รถยนต์และแบบจำลองสะพานที่มีความต่อเนื่องหรือแม้กระทั่งการกระตุ้นที่ฐานรองจะส่งผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนปรับค่าความถี่ที่ออกแบบไว้ตามสูตรดังกล่าว



รูปที่ 5.5 การกระจัดสัมพัทธ์สูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพานช่วงสั้น 25 เมตร ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าภายใต้การเบี่ยงเบนของค่าอัตราส่วนปรับค่าความถี่ด้วยการใช้ค่าพารามิเตอร์ $m_c = 1000$ kg, $\zeta_c = 0.15$, $\mu = 0.08$, $\alpha_{opt} = 0.9433$ และ $\zeta_{d,opt} = 0.1716$

การหาค่าผลตอบสนองของการสั่นของสะพานในเบื้องต้นจะสมมติให้ค่าอัตราส่วนความหน่วงที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่า ($\zeta_{d,opt} = 0.1716$) เป็นค่าคงที่ตามสมการ (2.52) แต่จะเปลี่ยนค่าอัตราส่วนปรับค่าความถี่ให้เบี่ยงเบนไปจากค่าที่เหมาะสม ($\Delta\alpha = \alpha - \alpha_{opt}$) ด้วยการให้ค่าอัตราส่วนมวล $\mu = 0.08$ ของมวลเชิงโหมด, มวลของรถยนต์ $m_c = 1000$ kg และ อัตราส่วนความหน่วงของรถยนต์ $\zeta_c = 0.15$ ภายใต้การกระตุ้นแบบฮาร์โมนิคซึ่งมีการกระจัดสูงสุดเท่ากับหนึ่งเซนติเมตรที่ฐานรองรับสะพานทั้งสองด้านในทิศทางเดียวกันที่มีความถี่ของการกระตุ้นตั้งแต่ค่าความถี่ต่ำไปจนถึงค่าความถี่สูง ($f_f \leq 7.02$ Hz) โดยผลตอบสนองของการสั่นของสะพานในแต่ละค่าอัตราส่วนปรับค่าความถี่จะอยู่ในรูปการกระจัดสัมพัทธ์สูงสุดที่สภาวะการสั่นแบบคงที่ซึ่งหามาจากโดเมนของความถี่ดังแสดงในรูปที่ 5.5 โดยที่แกนตั้งแสดงค่าการกระจัดสัมพัทธ์สูงสุดของสะพานที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงและแกนนอนแสดงค่าอัตราส่วนการเบี่ยงเบนความถี่ที่ปรับค่า ซึ่งผลของการวิเคราะห์พบว่าผลตอบสนองของการกระจัดสัมพัทธ์สูงสุดของสะพานที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงสำหรับแบบจำลองสะพาน-มวลหน่วง (เส้นทึบ) จะมีค่าต่ำสุดเมื่อค่า $\Delta\alpha/\alpha_{opt} = 0.006$ โดยในทางทฤษฎีแล้วค่าผลตอบสนองต่ำสุดที่ได้ควรจะเกิดขึ้นที่ค่า $\Delta\alpha/\alpha_{opt} = 0$ ซึ่งเป็นตำแหน่งของค่าอัตราส่วนปรับค่าความถี่ที่เหมาะสม (α_{opt}) ดังนั้นผลการวิเคราะห์ที่ได้ชี้ให้เห็นว่ามีความคลาดเคลื่อนไปน้อยมากประมาณ 0.6 % เพราะเป็นสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนของสูตรที่ใช้หาค่าอัตราส่วนปรับค่าความถี่ที่เหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 5.6 นอกจากนี้ยังพบว่ารถยนต์ส่ง

ผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนปรับค่าความถี่ โดยทำให้ผลตอบสนองต่ำสุดเปลี่ยนตำแหน่งไปจากเดิม (เส้นจุด, เส้นปะ และเส้นประ-จุด) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ความถี่ของรถยนต์มีค่าสูง ($f_o \geq f_b$) :



รูปที่ 5.6 การกระจัดสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพานสำหรับแบบจำลองสะพาน-มวลหน่วง (กรณีไม่มีรถยนต์จอดติดบนสะพาน)

หากพิจารณาผลตอบสนองการกระจัดสัมพัทธ์สูงสุดของสะพานที่สภาวะการสั่นแบบคงที่ สำหรับระบบสะพาน-มวลหน่วงในโดเมนของความถี่ภายใต้การกระตุ้นแบบฮาร์โมนิกที่ฐานรองรับ สะพานทั้งสองด้านในทิศทางเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 5.6 โดยที่แกนตั้งแสดงค่าการกระจัดสัมพัทธ์สูงสุดของสะพานที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงและแกนนอนแสดงค่าอัตราส่วนความถี่ของการกระตุ้นต่อความถี่ธรรมชาติของสะพาน (f_f / f_b) ซึ่งผลของการวิเคราะห์พบว่าผลตอบสนองบริเวณทั้ง 2 Peaks ของทั้งสองกรณีคือ $\alpha = \alpha_{opt}$ (เส้นทึบ) และ $\alpha = 1.006 \alpha_{opt}$ (เส้นจุด) มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนซึ่งค่าสูงสุดที่ได้จากทั้ง 2 Peaks นี้ถูกนำไปสร้างกราฟตามรูปที่ 5.5 ในทางตรงกันข้าม บริเวณที่ความถี่การกระตุ้นเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของสะพาน (f_f / f_b เข้าใกล้ 1.0) ซึ่งเป็นบริเวณที่มวลหน่วงปรับค่าสามารถควบคุมการสั่นได้เป็นอย่างดี พบว่าผลตอบสนองของทั้งสองกรณีแตกต่างกันไม่มากนัก อีกทั้งยังมีช่วงความถี่ใช้งานใกล้เคียงกัน ดังนั้นจากเหตุผลดังกล่าวนี้จึงเลือกใช้ค่าอัตราส่วนปรับค่าความถี่ที่เหมาะสมตามสูตรโดยประมาณสำหรับออกแบบมวลหน่วงปรับค่า

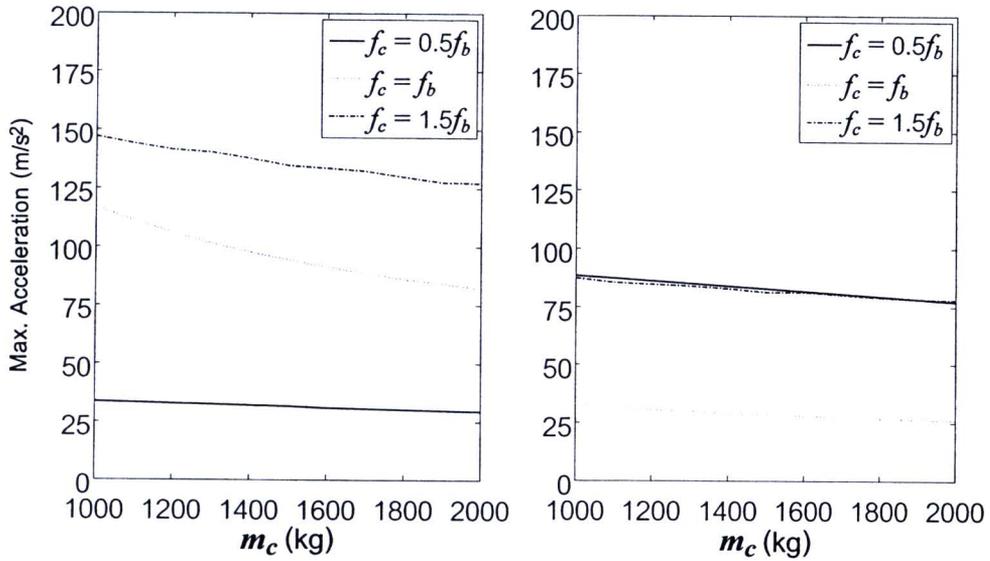
5.5 การศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

• ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนของรถยนต์สำหรับระบบปฏิสัมพันธ์สะพาน-รถยนต์จะมีแนวโน้มไปในทิศทางมากหรือน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของรถยนต์และสะพาน ทั้งนี้เพื่อให้มองเห็นภาพรวมของผลตอบสนองการสั่นสะเทือนดังกล่าวจึงจะทำการศึกษาพฤติกรรมของผลตอบสนองการสั่นสะเทือนสูงสุดภายใต้การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของรถยนต์ประกอบด้วย มวล ความถี่ช่วงล่าง และอัตราส่วนความหน่วง และค่าพารามิเตอร์ของสะพาน คือ ค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐาน $f_b = 3.51$ Hz และ ค่าอัตราส่วนความหน่วง $\zeta_b = 0.03$ โดยทุกกรณีจะพิจารณาผลตอบสนองการสั่นที่สภาวะการสั่นแบบคงที่ภายใต้การกระตุ้นแบบฮาร์โมนิกซึ่งมีการกระจัดสูงสุดเท่ากับหนึ่งเซนติเมตรที่ฐานรองรับสะพานทั้งสองด้านในทิศทางเดียวกัน ทั้งนี้การสั่นสะเทือนของรถยนต์จะอยู่ในรูปค่าความเร่งสัมบูรณ์สูงสุดที่สภาวะการสั่นแบบคงที่ซึ่งหามาจากโดเมนของความถี่ และพิจารณารวมผลการสั่นของสะพานใน 5 โหมดแรกเท่านั้น

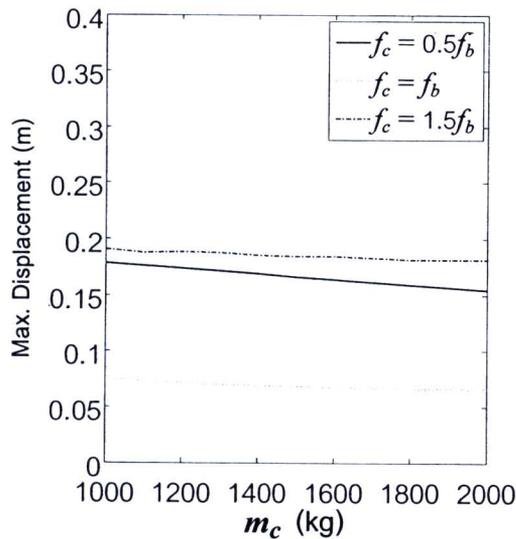
5.5.1 ผลกระทบจากมวลของรถยนต์

ในกรณีนี้ได้ทำการวิเคราะห์ค่าการสั่นสะเทือนของรถยนต์เปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงไปของมวลรถดังแสดงในรูปที่ 5.7 ด้วยการให้ค่าอัตราส่วนความหน่วงของรถยนต์ $\zeta_c = 0.15$ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าหากรถยนต์มีมวลเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้รถยนต์และสะพานเกิดการสั่นสะเทือนลดลง โดยที่การสั่นสะเทือนของรถยนต์จะลดลงประมาณร้อยละ 5 ถึง 20 เมื่อรถยนต์มีมวลเพิ่มขึ้น 500 kg และเมื่อพิจารณาความเร่งสัมบูรณ์ของรถยนต์ในรูปที่ 5.7(ก) พบว่ารถยนต์ที่มีช่วงล่างแข็งมากขึ้น (f_c มีค่าสูงขึ้น) ความรุนแรงของการสั่นสะเทือนจะสูงขึ้นตามไปด้วย แต่แนวโน้มลักษณะเช่นนี้จะไม่ปรากฏขึ้นกับสะพาน โดยในรูปที่ 5.7(ข) และ 5.7(ค) สังเกตได้ว่ารถยนต์ที่มีความถี่เท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ($f_c = f_b$) จะทำให้ความเร่งสัมบูรณ์และการกระจัดสัมพัทธ์ของสะพานต่ำที่สุด พฤติกรรมลักษณะนี้เป็นไปในทำนองเดียวกันกับการติดมวลหน่วงปรับค่าเข้าไปที่สะพานด้วยการปรับค่าความถี่ไปที่ความถี่ธรรมชาติของสะพานนั่นเอง นอกจากนี้ผลจากการวิเคราะห์การสั่นของสะพานที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงที่ไม่มีรถยนต์จอดติดบนสะพานพบว่าค่าความเร่งสัมบูรณ์สูงสุดเท่ากับ 103.28 m/s^2 และค่าการกระจัดสัมพัทธ์สูงสุดเท่ากับ 0.21 m ซึ่งมีค่าสูงกว่ากรณีที่มียอดติดอยู่บนสะพานตามรูปที่ 5.7(ข)

และ 5.7(ค) ตามลำดับ จากผลลัพธ์ดังกล่าวจะเห็นว่ารถยนต์มีส่วนช่วยในการลดการสั่นของสะพานลงได้



(ก) ความเร่งสัมบูรณ์ของรถยนต์คันที่ 3 (ข) ความเร่งสัมบูรณ์ของสะพานที่กึ่งกลางช่วง

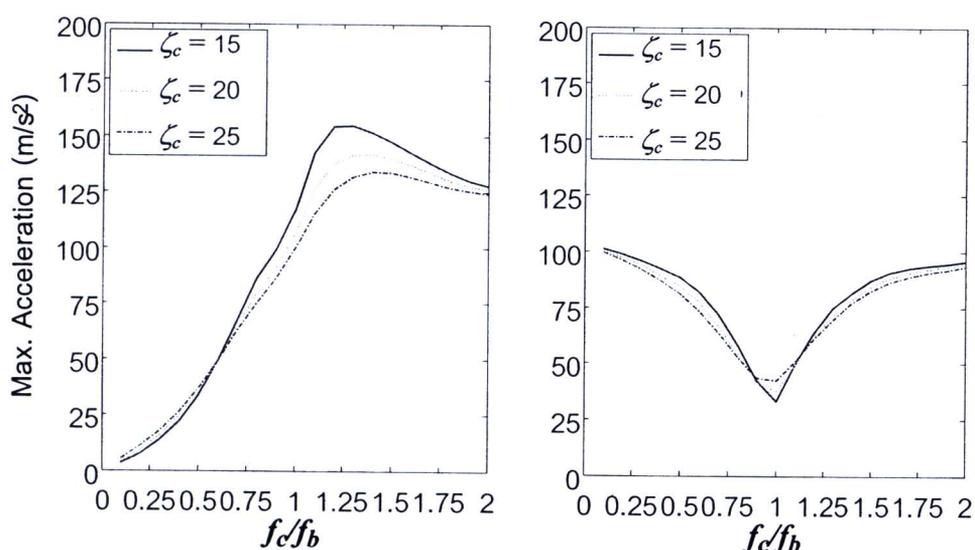


(ค) การกระจัดสัมพัทธ์ของสะพานที่กึ่งกลางช่วง

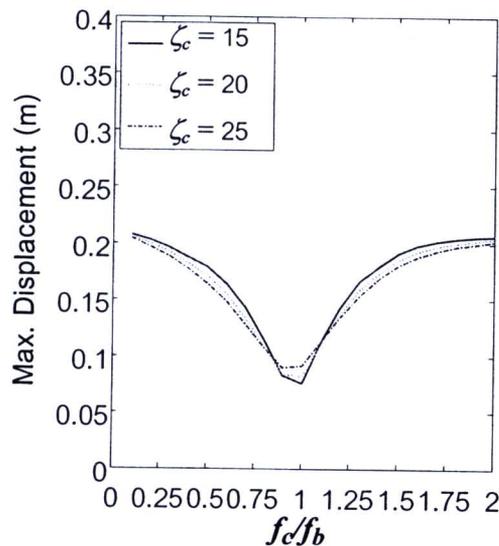
รูปที่ 5.7 ผลตอบสนองการสั่นสูงสุดภายใต้การเปลี่ยนแปลงมวลของรถยนต์ด้วยการใช้ค่าพารามิเตอร์ $\zeta_c = 0.15$ (ก) ความเร่งสัมบูรณ์ของรถยนต์คันที่ 3 (ข) ความเร่งสัมบูรณ์ของสะพานที่กึ่งกลางช่วง และ (ค) การกระจัดสัมพัทธ์ของสะพานที่กึ่งกลางช่วง

5.5.2 ผลกระทบจากความถี่ช่วงล่างของรถยนต์

หากพิจารณาการสั่นสะเทือนของรถยนต์ภายใต้การใช้ค่ามวลของรถยนต์ $m_c = 1000$ kg และค่าอัตราส่วนความหน่วงที่แตกต่างกันตามรูปที่ 5.8(ก) พบว่าความถี่ของรถยนต์ที่สูงขึ้นเรื่อยๆ นั้นจะมีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนโดยการสั่นสะเทือนของรถยนต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 20-100 % เมื่อความถี่ช่วงล่างของรถยนต์สูงขึ้นเพียง 0.5 Hz ทั้งนี้ความรุนแรงของการสั่นสะเทือนจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงความถี่ค่าหนึ่ง หลังจากนั้นแล้วจะค่อยๆ ลดลงและลู่เข้าหากันในที่สุดเมื่อความถี่ของรถยนต์มีค่าสูงมาก จากพฤติกรรมดังกล่าวทำให้ทราบว่าอัตราส่วนความหน่วงส่งผลกระทบต่ออาการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่มีช่วงล่างแข็งมากๆ เพราะเปรียบได้กับรถยนต์กลายเป็นส่วนหนึ่งของตัวสะพานไปแล้ว ในทางตรงกันข้าม การสั่นสะเทือนของสะพานจะลดลงอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มขึ้นของความถี่ของรถยนต์จนกระทั่งมีค่าการสั่นสะเทือนต่ำสุดเมื่อความถี่ของรถยนต์เข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของสะพาน ($f_c \approx f_b$) ดังแสดงในรูปที่ 5.8(ข) และ 5.8(ค) พฤติกรรมนี้คล้ายกับรถยนต์ทำหน้าที่เสมือนเป็นมวลหน่วงปรับค่า อย่างไรก็ตาม หากความถี่ของรถยนต์สูงขึ้นกว่าค่าดังกล่าวแล้วจะทำให้การสั่นสะเทือนของสะพานสูงขึ้นเรื่อยๆ และมีแนวโน้มลู่เข้าหากันค่าหนึ่งเมื่อความถี่ของรถยนต์สูงมากๆ



(ก) ความเร่งสัมบูรณ์ของรถยนต์คันที่ 3 (ข) ความเร่งสัมบูรณ์ของสะพานที่กึ่งกลางช่วง



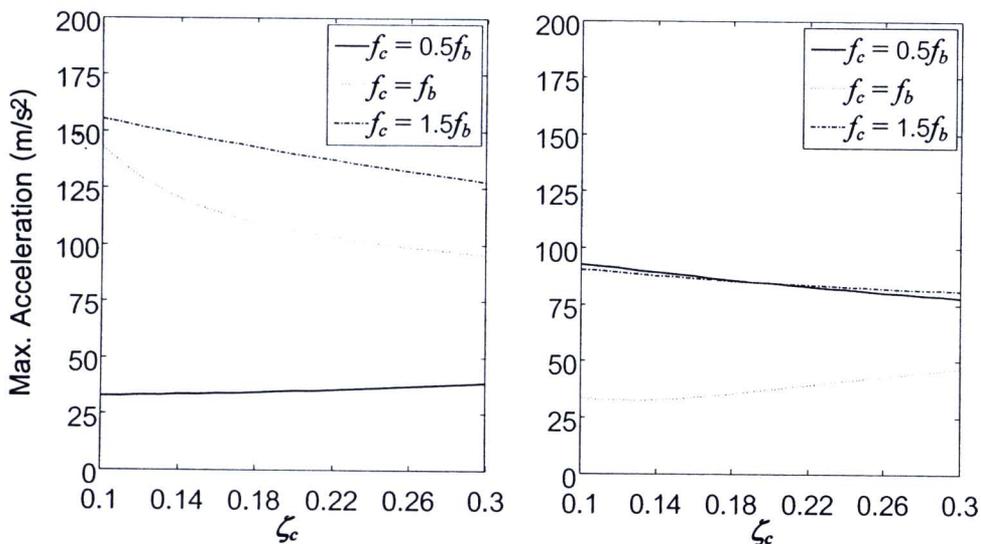
(ค) การกระจัดสัมพัทธ์ของสะพานที่กึ่งกลางช่วง

รูปที่ 5.8 ผลตอบสนองการสั่นสูงสุดภายใต้การเปลี่ยนแปลงความถี่ของรถยนต์ด้วยการใช้ค่าพารามิเตอร์ $m_c = 1000$ kg (ก) ความเร่งสัมบูรณ์ของรถยนต์คันที่ 3 (ข) ความเร่งสัมบูรณ์ของสะพานที่กึ่งกลางช่วง และ (ค) การกระจัดสัมพัทธ์ของสะพานที่กึ่งกลางช่วง

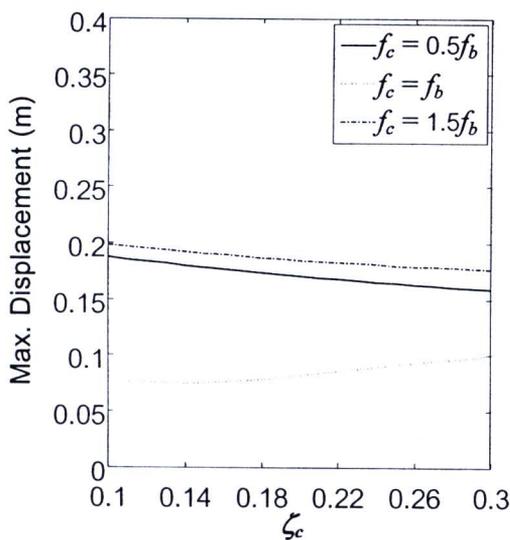
นอกจากนี้แล้ว จะสังเกตเห็นว่าในช่วงความถี่ที่รถยนต์มีปฏิสัมพันธ์ร่วมกับสะพานนั้น อิทธิพลของอัตราส่วนความหน่วงจะส่งผลกระทบต่อความรุนแรงของการสั่นสะเทือนของรถยนต์ได้แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่อัตราส่วนความหน่วงสูงจะมีแนวโน้มทำให้การสั่นสะเทือนต่ำลง อย่างไรก็ตามในกรณีการสั่นสะเทือนของสะพาน อิทธิพลของอัตราส่วนความหน่วงที่มีค่าแตกต่างกัน จะส่งผลกระทบให้ได้ค่าความเร่งและการกระจัดสัมพัทธ์ของสะพานแตกต่างกันน้อยกว่ากรณีการสั่นสะเทือนของรถยนต์

5.5.3 ผลกระทบจากความหน่วงของรถยนต์

ในส่วนนี้จะพิจารณาผลกระทบจากความหน่วงของรถยนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปต่อการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับตัวรถด้วยการใช้ค่ามวลของรถยนต์ $m_c = 1000$ kg โดยรูปที่ 5.9(ก) รถยนต์ที่มีอัตราส่วนความหน่วงมากขึ้นจะมีแนวโน้มของการสั่นสะเทือนลดลงในกรณีที่ $f_c \geq f_b$ ในทางตรงกันข้าม หาก $f_c < f_b$ การสั่นสะเทือนจะสูงขึ้น สำหรับกรณีการสั่นสะเทือนของสะพาน ตามรูปที่ 5.9(ข) และ 5.9(ค) นั้น การสั่นสะเทือนจะสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความหน่วงของรถยนต์ในกรณีที่ $f_c = f_b$ ส่วนในกรณีอื่นๆ ของความถี่ของรถยนต์การสั่นสะเทือนมีแนวโน้มลดลง



(ก) ความเร่งสัมบูรณ์ของรถยนต์คันที่ 3 (ข) ความเร่งสัมบูรณ์ของสะพานที่กึ่งกลางช่วง



(ค) การกระจัดสัมพัทธ์ของสะพานที่กึ่งกลางช่วง

รูปที่ 5.9 ผลตอบสนองการสั่นสูงสุดภายใต้การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความหน่วงของรถยนต์ด้วยการใช้ค่าพารามิเตอร์ $m_c = 1000$ kg (ก) ความเร่งสัมบูรณ์ของรถยนต์คันที่ 3 (ข) ความเร่งสัมบูรณ์ของสะพานที่กึ่งกลางช่วง และ (ค) การกระจัดสัมพัทธ์ของสะพานที่กึ่งกลางช่วง

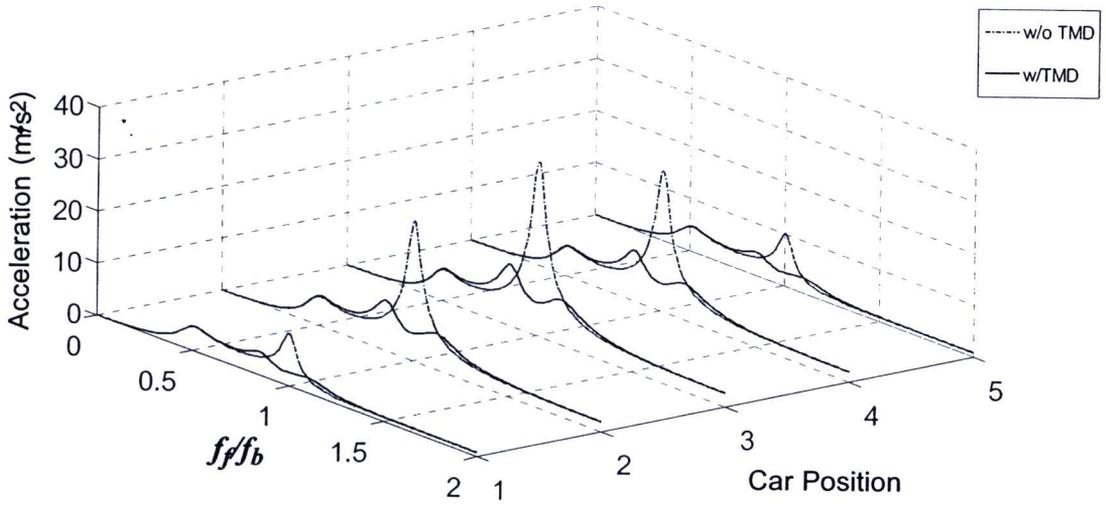
จากรูปที่ 5.7 ถึง 5.9 จะเห็นว่าพารามิเตอร์หลักที่มีผลกระทบต่อการสั่นสะเทือนของรถยนต์และสะพานมากที่สุดคือความถี่ของรถยนต์ ส่วนผลของมวลและความหน่วงของรถยนต์จะมีน้อยกว่า

โดยภาพรวมการสั่นสะเทือนของรถยนต์มีแนวโน้มเกิดขึ้นสูงกับรถยนต์ที่มีความถี่ช่วงล่างแข็ง (f_c มีค่าสูง) และอัตราส่วนความหน่วงต่ำ แต่การสั่นสะเทือนดังกล่าวจะลดลงหากรถยนต์มีมวลเพิ่มมากขึ้น ส่วนการสั่นสะเทือนของสะพานจะมีแนวโน้มลดลงกับรถยนต์ที่มีอัตราส่วนความหน่วงสูงและมวลมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ความถี่ช่วงล่างของรถยนต์เข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของสะพานจะลดลงเป็นอย่างมากเพราะเปรียบเสมือนกับการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้าไปที่ตัวสะพานนั่นเอง

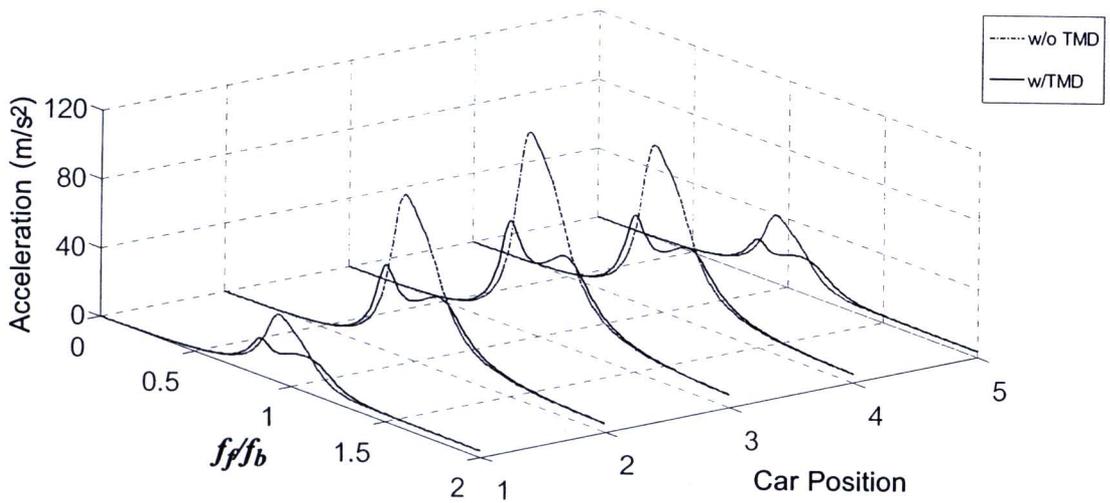
5.6 ผลตอบสนองในโดเมนของความถี่

ในการศึกษานี้ได้ใช้มวลหน่วงปรับค่าชุดเดียวติดตั้งเข้าไปที่บริเวณใต้ท้องสะพานที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานเพื่อควบคุมการสั่นสะเทือนของรถยนต์ ภายหลังจากทำการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานพบว่า สามารถลดการสั่นลงได้เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในช่วงความถี่การกระตุ้นเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของสะพาน แต่จะไม่สามารถลดการสั่นในช่วงความถี่ค่าอื่นได้ ซึ่งรวมถึงช่วงความถี่เข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของรถยนต์ด้วยหากความถี่ดังกล่าวมีค่าไม่ใกล้เคียงกับความถี่ตามธรรมชาติของสะพาน อย่างไรก็ตามในบริเวณความถี่การกระตุ้นเข้าใกล้ความถี่ของรถยนต์ ความรุนแรงของการสั่นสะเทือนจะเกิดขึ้นน้อยและไม่แตกต่างกันมากทั้งในกรณีที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า ทั้งนี้เพราะคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของสะพานจะทำหน้าที่เสมือนตัวรองรับการสั่นสะเทือนที่ส่งผ่านไปยังรถยนต์

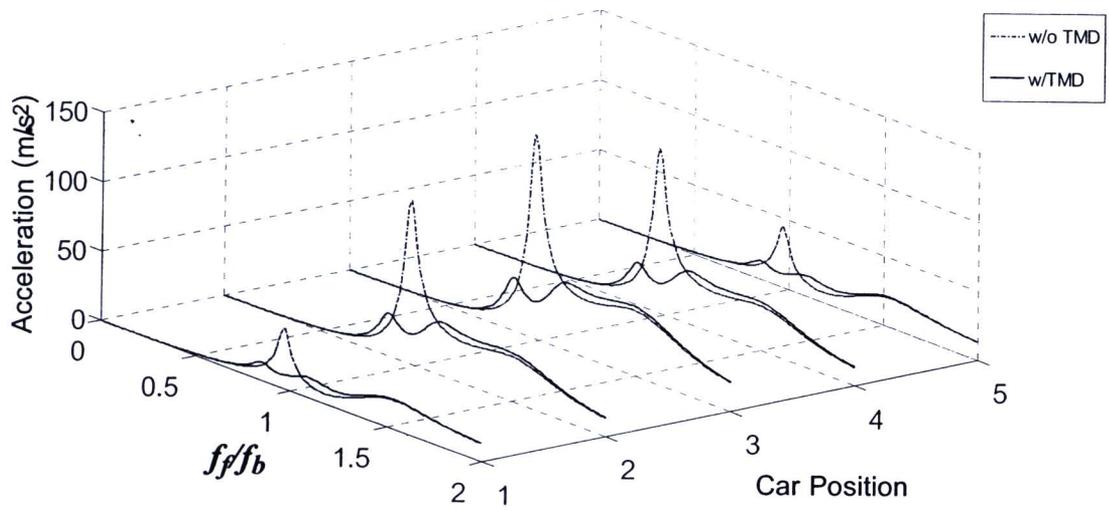
ลักษณะกราฟของค่าความเร่งของการสั่นสะเทือนของรถยนต์ก่อนติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าจะปรากฏ 2 Peaks หลักที่บริเวณความถี่การกระตุ้นเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของรถยนต์และสะพานในกรณี $f_c < f_b$ และ $f_c > f_b$ โดยที่บริเวณความถี่การกระตุ้นใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของสะพานมีค่าสูงกว่ามากเพราะเกิดการกำทอนของโครงสร้างสะพานกับการกระตุ้นของฐานรองรับ ซึ่งคาดว่าจะสภาพที่มักพบว่าเป็นปัญหาในความเป็นจริง แต่ในกรณี $f_c = f_b$ เส้นกราฟจะเหลือเพียง Peak เดียวดังแสดงในรูปที่ 5.10(ข) และ 5.11(ข) ทั้งนี้พบว่าผลตอบสนองการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดบริเวณกึ่งกลางสะพานจะสูงกว่าคันอื่นเพราะเป็นตำแหน่งที่สะพานสั่นตัวมากกว่า ส่วนผลของความถี่ธรรมชาติของรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นและช่วงความยาวสะพานที่สั้นลง จะทำให้การสั่นสะเทือนของตัวรถในรูปของค่าความเร่งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น



(n) $f_c = 0.5 f_b$



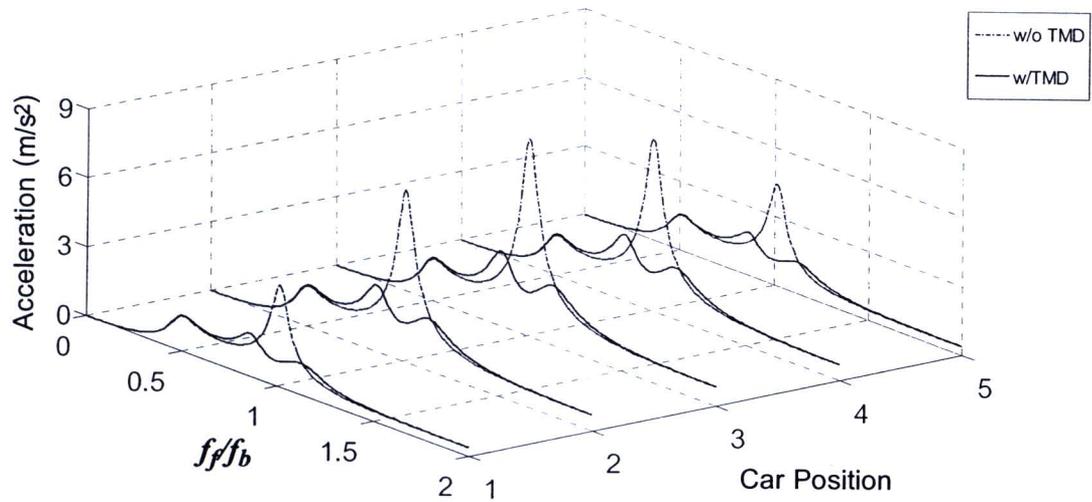
(n) $f_c = f_b$



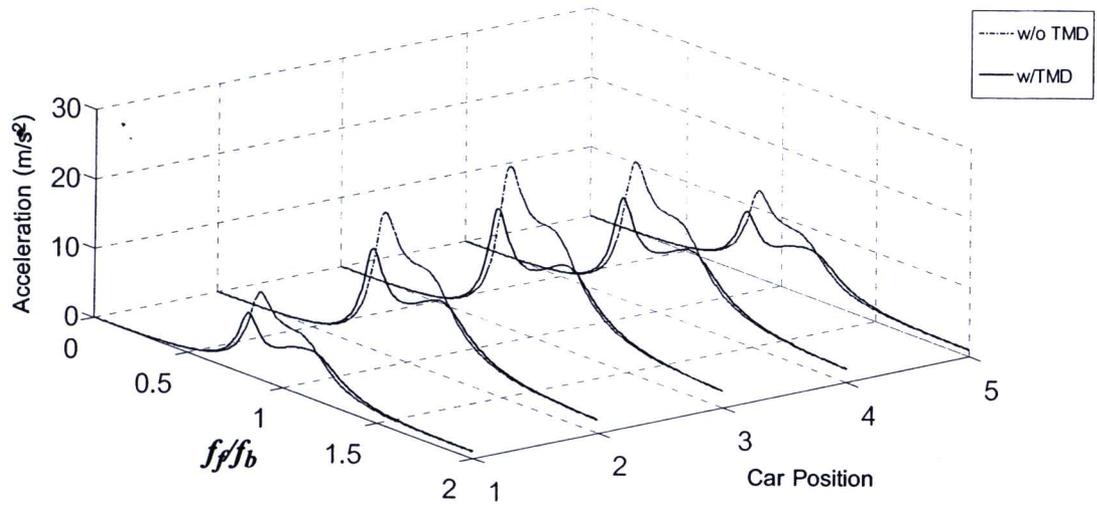
$$(ค) f_c = 1.5 f_b$$

รูปที่ 5.10 ความเร่งสัมบูรณ์ของรถยนต์ที่จอดติดบนสะพานช่วงสั้น 25 เมตร (ก) $f_c = 0.5 f_b$ (ข)

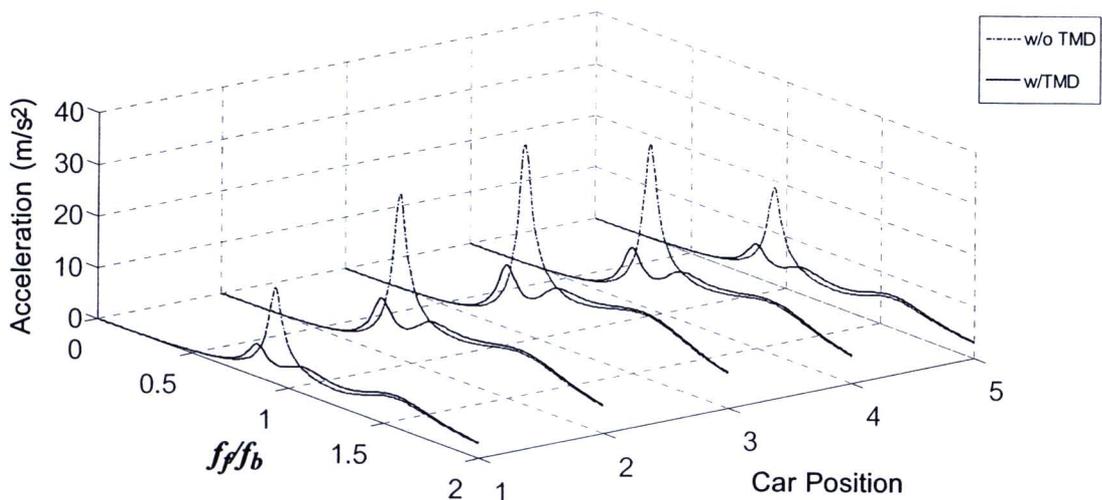
$f_c = f_b$ และ (ค) $f_c = 1.5 f_b$



$$(ก) f_c = 0.5 f_b$$



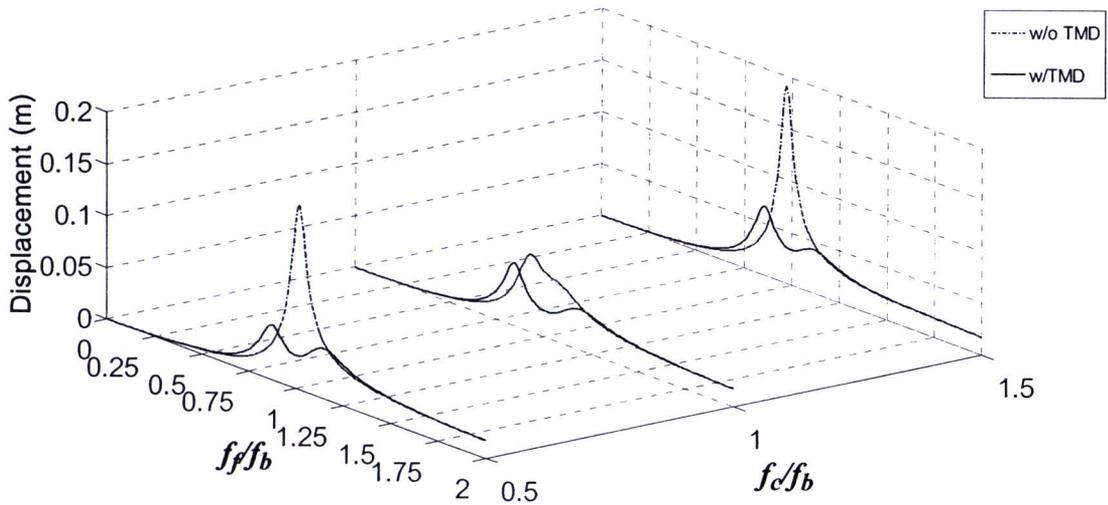
(ข) $f_c = f_b$



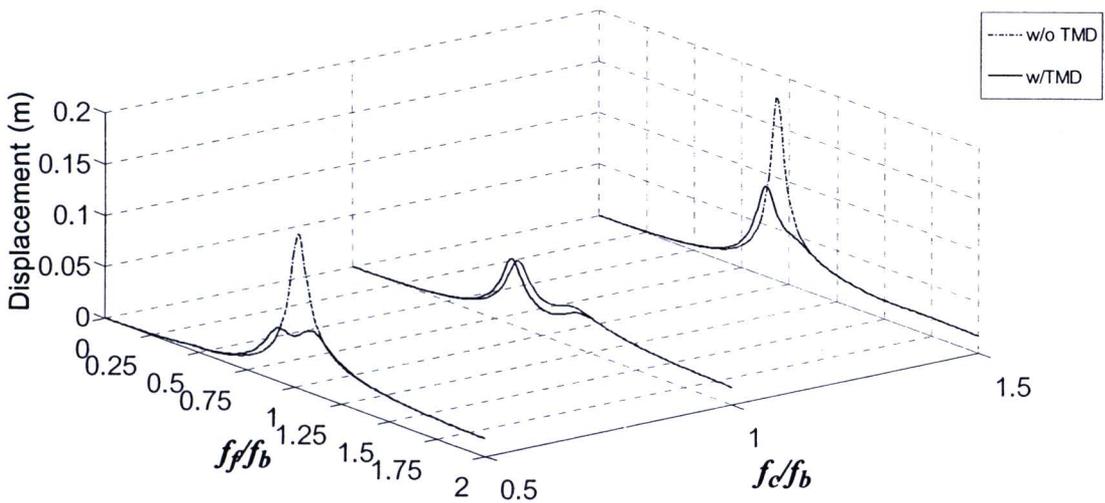
รูปที่ 5.11 ความเร่งสัมบูรณ์ของรถยนต์ที่จอดติดบนสะพานช่วงยาว 50 เมตร (ก) $f_c = 0.5 f_b$ (ข) $f_c = f_b$ และ (ค) $f_c = 1.5 f_b$

ในรูปที่ 5.12 ลักษณะกราฟของค่าการกระจัดสัมพัทธ์ของสะพานก่อนติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าจะปรากฏเพียง Peak หลักเดียวที่โดดเด่นที่บริเวณความถี่การกระตุ้นเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของสะพานในทุกๆ กรณีของค่า f_c เพราะเกิดการกำทอนของโครงสร้างสะพานกับการกระตุ้นของฐานรองรับ โดยช่วงความยาวสะพานที่สั้นและยาวการสั่นสะเทือนของสะพานมีรูปแบบพฤติกรรมเหมือนกันขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนความถี่ของรถยนต์ต่อความถี่ธรรมชาติของสะพาน (f_c / f_b) อย่างไรก็ตามในแง่ของความเร่ง สะพานสั้นมีแนวโน้มจะมีค่าสูงกว่าเพราะมี

ความถี่ธรรมชาติที่สูงกว่ามาก ($f_b = 3.51$ Hz สำหรับสะพานช่วงสั้น 25 m, $f_b = 1.93$ Hz สำหรับสะพานช่วงยาว 50 m) แต่การสั่นสะเทือนของสะพานจะเกิดขึ้นน้อยหากความถี่ของรถยนต์เท่ากับความถี่ธรรมชาติของสะพาน เพราะว่าในกรณีนี้รถยนต์ที่จอดติดบนสะพานเปรียบเสมือนกับการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้าไปที่ตัวสะพานนั่นเอง



(ก) สะพานช่วงสั้น 25 เมตร



(ข) สะพานช่วงยาว 50 เมตร

รูปที่ 5.12 การกระจัดสัมพัทธ์ของสะพานที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วง (ก) สะพานช่วงสั้น 25 เมตร และ (ข) สะพานช่วงยาว 50 เมตร

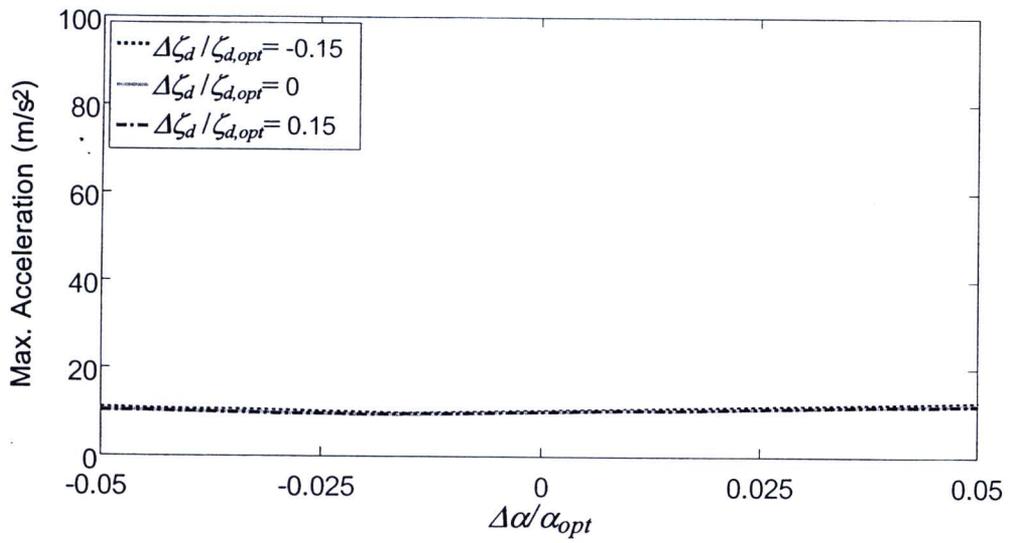
ภายหลังที่ทำการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานพบว่า สามารถลดการสั่นลงได้เป็นอย่างมาก (ลดลงเหลือประมาณ 50 %) โดยเฉพาะในช่วงความถี่การกระตุ้นเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของสะพานในทำนองเดียวกันกับกรณีการสั่นสะเทือนของรถยนต์

กล่าวโดยสรุป การทำงานของมวลหน่วงปรับค่าสามารถช่วยลดการสั่นสะเทือนของตัวรถได้ในทั้งสองช่วงความยาวสะพานที่พิจารณา และคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของรถยนต์แบบต่างๆ แต่การทำงานของมวลหน่วงปรับค่าอย่างมีประสิทธิภาพนั้นจะจำกัดเฉพาะย่านความถี่บริเวณที่ทำการปรับจูน (ความถี่ธรรมชาติของสะพาน) ซึ่งพบว่าสามารถลดค่าความเร่งของรถยนต์คันกลางที่จอดติดอยู่ได้ถึงกว่าร้อยละ 60

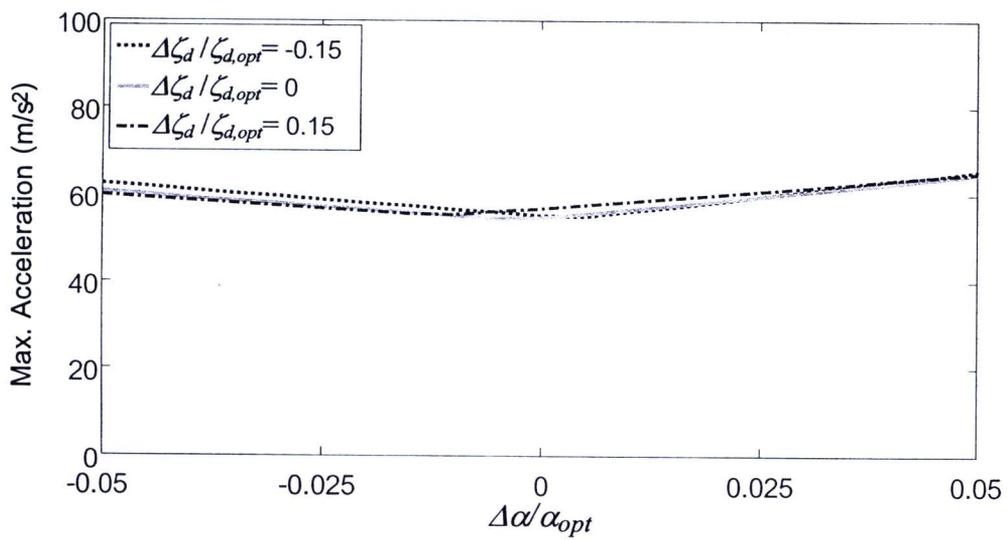
5.7 การเบี่ยงเบนของค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่า

เมื่อพิจารณาผลของการเบี่ยงเบนค่าพารามิเตอร์ของมวลหน่วงปรับค่า (Detuning) จะเห็นได้ว่าหากอัตราส่วนความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าลดลง ($\Delta\zeta_d / \zeta_d = -0.15$) จะส่งผลให้ค่าความเร่งสัมบูรณ์สูงสุดเพิ่มขึ้นหรืออีกนัยหนึ่งประสิทธิภาพในการควบคุมการสั่นลดลงดังแสดงในรูปที่ 5.13(ก), 5.13(ข) และ 5.13(ค) เพราะความหน่วงของสะพานลดลงจึงส่งผลให้การสั่นสะเทือนของรถยนต์รุนแรงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าหากค่า $f_c \geq f_b$ หรือรถยนต์มีช่วงล่างที่แข็ง (รูปที่ 5.13(ข) และ 5.13(ค)) จะมีความแตกต่างจากกรณีที่ใช้ค่า $\zeta_{d,opt}$ ($\Delta\zeta_d / \zeta_d = 0$) อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้กรณีที่ค่า $f_c < f_b$ มวลหน่วงปรับค่าจะมีคุณสมบัติ Robustness มากที่สุด

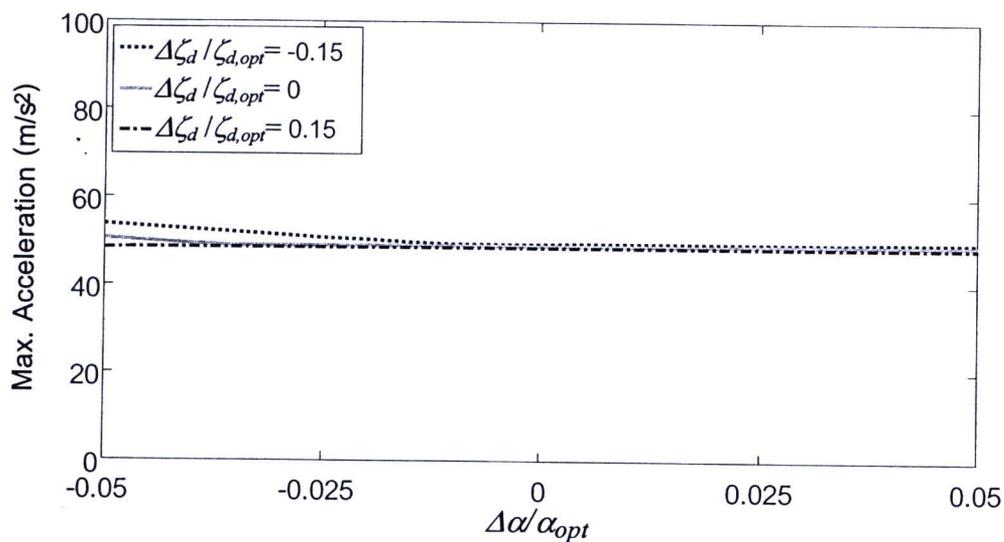
อย่างไรก็ดี อิทธิพลการเกิด Detuning ของค่า α ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเร่งสูงสุดของรถยนต์มากกว่าการเกิด Detuning ของค่า ζ_d เนื่องจากผลของค่า ζ_d ทำให้ความเร่งเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย โดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร่งเพียงไม่เกินร้อยละ 10 เมื่อเทียบกับกราฟ $\Delta\zeta_d / \zeta_d = 0$ (เส้นทึบ)



(n) $f_c = 0.5 f_b$



(n) $f_c = f_b$



(ค) $f_c = 1.5 f_b$

รูปที่ 5.13 ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนสูงสุดของรถยนต์คันที่ 3 ภายใต้การเบี่ยงเบนของค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่า (ก) $f_c = 0.5 f_b$ (ข) $f_c = f_b$ และ (ค) $f_c = 1.5 f_b$