

考虑碰撞效应的近断层斜拉桥地震响应研究

吕龙^{1,2}, 于德恩³, 袁宇航¹, 杨怀宇⁴

(1. 成都理工大学 环境与土木工程学院, 四川 成都 610059; 2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司 桥梁工程结构动力学国家重点实验室, 重庆市 400067; 3. 中国公路工程咨询集团有限公司, 北京市 100089; 4. 中铁十五局集团第五工程有限公司, 天津市 300133)

摘要: 为了研究碰撞效应对近断层斜拉桥地震响应影响, 该文以一座双塔斜拉桥为工程背景, 分析近断层地震动作用下斜拉桥主桥和引桥主梁碰撞响应及碰撞响应对结构地震响应的影响, 研究黏滞阻尼器和弹性索对近断层地震动作用下斜拉桥碰撞效应影响, 并与远场地震动下斜拉桥地震响应进行对比, 探讨碰撞效应对斜拉桥减震率影响。结果表明: 与无脉冲地震动相比, 近断层脉冲地震动作用下在脉冲时段内斜拉桥主桥与引桥更易发生碰撞, 碰撞效应对斜拉桥地震响应影响更显著; 设置黏滞阻尼器和弹性索后, 斜拉桥主桥与引桥在脉冲时段内仍发生碰撞, 但碰撞响应减小, 且脉冲地震动作用下碰撞效应对斜拉桥地震响应影响明显降低; 在分析脉冲地震动作用下斜拉桥减震率时须考虑碰撞效应。

关键词: 斜拉桥; 近断层; 地震响应; 碰撞效应

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

Seismic Responses of Cable-Stayed Bridge Considering Pounding Effect under Near-Fault Ground Motions

LYU Long^{1,2}, YU Deen³, YUAN Yuhang¹, YANG Huaiyu⁴

(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. State Key Lab of Bridge Engineering Structural Dynamics, China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China; 3. China Highway Engineering Consultants Corporation, Beijing 100089, China; 4. Railway 15th Bureau Group 5th Co., Ltd., Tianjin 300133, China)

Abstract: To study the influence of the pounding effect on seismic responses of the cable-stayed bridge under near-fault ground motions, taking a double-tower cable-stayed bridge as the engineering background, this paper analyzed the pounding response of the main bridge and the main beam of the approach bridge of the cable-stayed bridge under near-fault ground motions and the influence of the pounding response on the structural seismic response. Besides, the influence of viscous dampers and elastic cables on the pounding effect of the cable-stayed bridge under near-fault ground motions was studied, which was compared with the seismic response of the cable-stayed bridge under far-fault ground motions to discuss the influence of the pounding effect on the seismic mitigation rate of the cable-stayed bridge. The results show that compared with non-pulse ground motions, under near-fault pulse-type ground motions, the main bridge and approach bridge of the cable-stayed bridge are more likely to collide within the pulse period, and the influence of the pounding effect on the seismic response of the cable-stayed bridge is more significant. When viscous dampers and elastic cables are installed, the main bridge and approach bridge still collide within the pulse period, but the pounding response decreases. Besides, the influence of the pounding effect on seismic responses of the cable-stayed bridge under pulse-type ground motions is significantly reduced, and the pounding effect should be considered when the seismic mitigation rate of the cable-stayed bridge under pulse-type ground motion is analyzed.

Keywords: cable-stayed bridge; near-fault; seismic response; pounding effect

收稿日期: 2024-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 52108113)

作者简介: 吕龙, 男, 博士, 副教授. E-mail: longl@cdut.edu.cn

0 引言

随着中国公路建设快速发展,越来越多的大跨度斜拉桥应用于工程中,中国地震断裂带较多,这使得斜拉桥面临近断层已不可避免,近断层地震动作用下斜拉桥地震响应较远场更加剧烈,发生碰撞可能性增加。

地震作用下碰撞对桥梁造成不同程度破坏,目前,针对简支梁桥或连续梁桥碰撞的研究已较多^[1-3],部分学者对地震作用下斜拉桥碰撞效应进行研究,主要针对碰撞刚度、初始间隙、主桥与引桥周期比等因素对斜拉桥碰撞及桥梁地震响应影响^[4-6]。雷凡等^[7]和沈禹等^[8]研究了行波效应下斜拉桥纵向主桥与引桥伸缩缝碰撞及结构地震响应;邓育林等^[9]讨论了斜拉桥主桥与多联引桥伸缩缝处双边碰撞效应,结果表明双边碰撞增大引桥地震响应,引桥落梁破坏概率增加;王德光等^[10]分析了两座相连斜拉桥间主梁碰撞响应;张文学等^[11]探讨了连梁装置等措施对斜拉桥碰撞效应影响,结果表明这些措施能有效缓解斜拉桥主梁碰撞,但对引桥地震响应影响较为复杂;申林^[12]提出了跨断层斜拉桥碰撞力学模型,讨

论了碰撞影响因素,建立了跨断层斜拉桥碰撞破坏评估方法,提出了减缓碰撞的措施;车刚刚^[13]以一独塔斜拉桥工程实例,分析了主桥与引桥碰撞及塔梁间碰撞响应,研究了以碰撞响应和桥塔地震响应为目标的黏滞阻尼器参数设计;王念辉^[14]研究了矮塔斜拉桥碰撞响应,提出黏滞阻尼器减小碰撞的措施;石岩等^[15]研究结果表明竖向地震动增大矮塔斜拉桥主梁和桥台碰撞可能性;Shen等^[16]简化斜拉桥模型,提出斜拉桥主桥与引桥纵向地震碰撞的简化分析方法。

以往针对斜拉桥碰撞效应的研究主要考虑远场地震动较多,而针对近断层地震动相对较少。本文分析了不同减震体系下近断层斜拉桥碰撞效应及对结构地震响应影响,探讨了考虑碰撞效应后黏滞阻尼器和弹性索对近断层斜拉桥减震效果影响。

1 工程背景与模型建立

以一双塔双索面斜拉桥为实例进行分析,主桥跨径布置为(58+102+360+102+58)m,南侧引桥为2×52m的分幅连续梁桥,北侧引桥为4×56m的分幅连续梁桥,总体布置如图1所示。

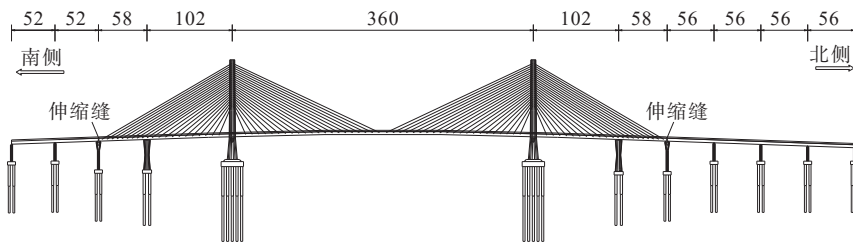


图1 斜拉桥总体布置图(单位:m)

Figure 1 General layout of cable-stayed bridge(unit:m)

本文采用SAP 2000软件进行模拟分析,桥塔、主梁、桥墩均采用梁单元模拟,斜拉索采用桁架单元模拟,并采用Ernst公式修正斜拉索弹性模量来考虑垂度效应,同时,考虑恒载引起的桥塔和斜拉索 $P-\Delta$ 效应,桥面等附属设施采用分布质量施加于主梁上,基础均采用六弹簧模拟桩与土相互作用,有限元模型如图2所示。漂浮体系斜拉桥动力特性分析结果如表1所示。从表1可知:主桥纵向1阶周期显著大于引桥。

考虑主桥与引桥主梁碰撞效应,碰撞单元采用线性接触单元模拟,不考虑碰撞中能量损失,如图2所示,接触单元力与位移关系为^[5,9]:

表1 桥梁动力特性

Table 1 Dynamic characteristics of bridge

阶数	周期/s	频率/Hz	振型描述
1	6.354	0.157	主桥纵向1阶振动
2	2.051	0.488	北侧引桥纵向1阶振动
3	1.500	0.667	南侧引桥纵向1阶振动

$$F = \begin{cases} k(D - D_0) & D > D_0 \\ 0 & D \leq D_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: F 为碰撞力; D_0 为初始间隙,取为0.4m; D 为主桥与引桥主梁纵向相对位移; k 为弹簧碰撞刚度,取为较短主梁刚度,即引桥轴向刚度^[7,9],南侧和北侧伸缩缝处碰撞刚度分别为447 737 kN/m和207 878 kN/m。

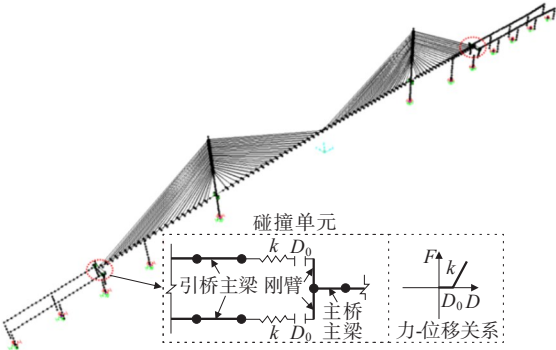


图2 有限元模型

Figure 2 Finite element model

为了分析不同减震体系下斜拉桥碰撞效应,在塔梁连接处设置黏滞阻尼器和弹性索,弹性索采用线性弹簧模拟,其受力 F_e 与变形 d 关系为:

$$F_e = Kd \tag{2}$$

式中: K 为弹性索刚度。

黏滞阻尼器受力 F_d 与相对速度 v 关系为^[13]:

$$F_d = C_d |v|^\alpha \operatorname{sgn}(v) \tag{3}$$

式中: C_d 为阻尼系数; α 为速度指数。

2 地震动输入

本文根据 PEER 地震记录库,选择 4 条典型 Chi-Chi 地震记录,分别对应于近断层前方向性效应、近断层滑冲效应、近断层无脉冲、远场的地震波,如表 2 所示,各条地震动速度时程曲线如图 3 所示,地震动加速度谱值如图 4 所示,所有地震动 P_{PGA} 均调至 $0.3g$,地震动方向为纵向输入。从图 3、4 可知:前方向性和滑冲地震动在速度上具有显著脉冲现象,且长周期对应的加速度谱值较大。

3 漂浮体系斜拉桥地震响应

为了研究近断层地震动下斜拉桥碰撞效应,本节分析不同类型地震动下漂浮体系斜拉桥地震响应。

3.1 碰撞力

主桥与引桥伸缩缝碰撞力时程如图 5 所示。

从图 5 可知:不同类型地震动作用下桥梁均发生不同程度碰撞,对于南侧伸缩缝,前方向性效应地震动作用下碰撞力最大,为 66 911 kN,发生在脉冲时段附近,但碰撞次数相对较少;滑冲效应地震动下碰撞

表2 地震动输入信息

Table 2 Input information of ground motions

地震动类型	台站	断层距/km	$P_{PGA}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$	$P_{PGV}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$(P_{PGV}/P_{PGA})/\text{s}$	T_p/s	调幅系数
前方向性脉冲	TCU051	7.64	160.21	53.85	0.37	10.38	1.87
滑冲效应脉冲	TCU052	0.66	446.91	172.34	0.39	11.96	0.67
无脉冲	TCU089	9.00	353.33	34.99	0.10	—	0.85
远场	HWA028	53.84	103.08	14.82	0.14	—	2.91

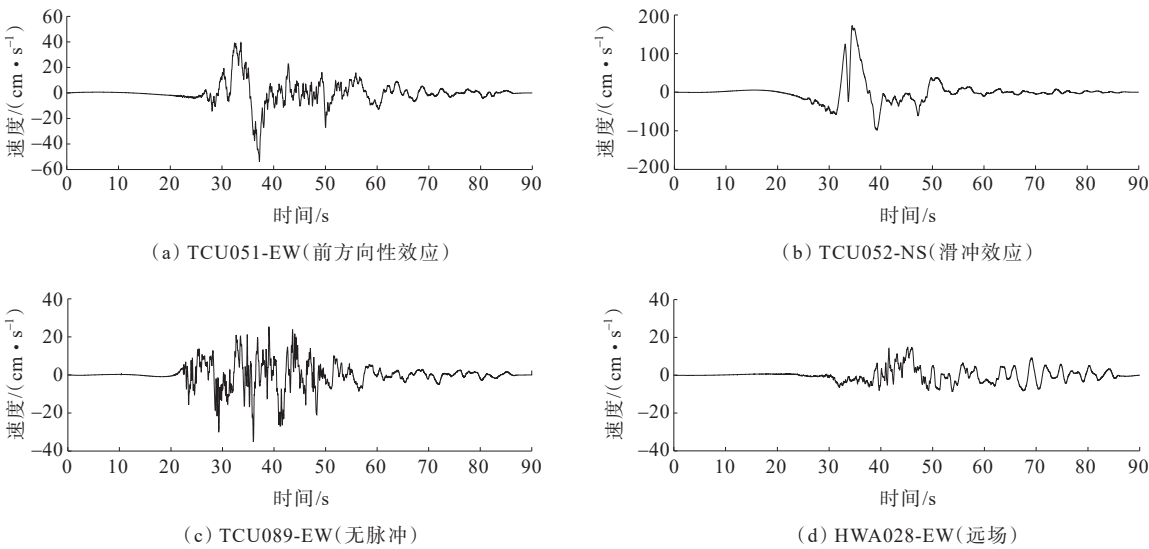


图3 地震动速度时程曲线

Figure 3 Time-histories of ground motion velocity

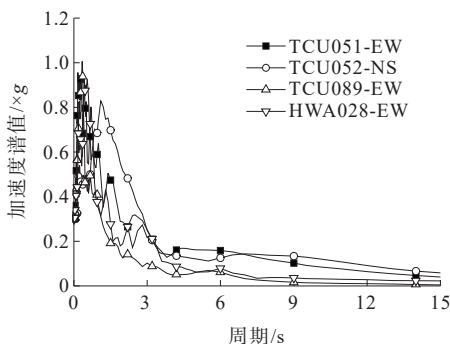


图4 地震动加速度谱值

Figure 4 Acceleration spectrum value of ground motions

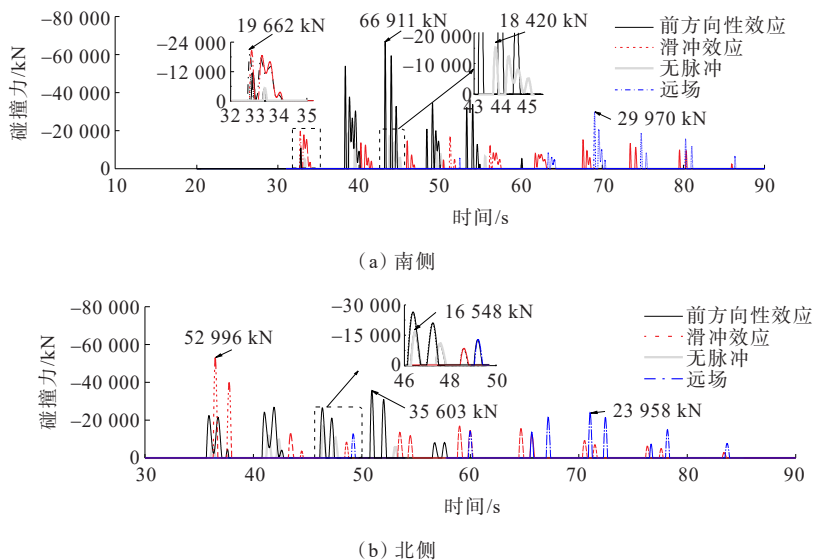


图5 漂浮体系斜拉桥主桥与引桥主梁碰撞力时程

Figure 5 Time-histories of ponding forces of main bridge and main beam of approach bridge of floating cable-stayed bridge

以上分析可知:与远场地震动相比,前方向性脉冲地震动作用下碰撞力最大,碰撞次数较少;滑冲效应地震动作用下碰撞次数较多;无脉冲时碰撞效应与远场相似。这表明近断层地震动脉冲效应对漂浮体系斜拉桥主桥与引桥主梁间碰撞影响显著,近断层脉冲地震动下斜拉桥更易发生碰撞,且碰撞力更大。

3.2 结构地震响应

斜拉桥地震响应如图6所示,其中,无碰撞工况不考虑引桥的斜拉桥地震响应。

从图6可知:与远场和近断层无脉冲地震动相比,前方向性效应和滑冲效应地震动下斜拉桥地震响应更显著。前方向性效应和滑冲效应地震动下碰撞效应使斜拉桥地震响应均有所减小,且滑冲效应更显著;无脉冲地震动下碰撞效应使斜拉桥地震响应有所增大,且对弯矩影响最显著,增幅达22.2%;远场地震动作用下斜拉桥碰撞效应对斜拉桥地震响应

撞次数最多,且碰撞分布时间段较广;无脉冲地震动下碰撞力最小,碰撞次数也较少;远场地震动下碰撞力仅小于前方向性效应,碰撞次数与无脉冲下相近。对于北侧伸缩缝,滑冲效应地震动作用下碰撞力最大,为52 996 kN,发生在脉冲时段附近,且碰撞次数最多,碰撞分布时间段较广;前方向性效应地震动作用下碰撞力仅小于滑冲效应,但碰撞次数相对较少;无脉冲和远场地震动作用下桥梁碰撞力均小于滑冲效应和前方向性效应地震动作用下碰撞力。

影响较小,变化程度均在6%以内。这表明与无脉冲地震动相比,脉冲地震动作用下斜拉桥地震响应受碰撞效应影响更显著。

综上,近断层地震动脉冲效应使漂浮体系斜拉桥主桥与引桥主梁间碰撞可能性增大,碰撞响应更加显著;碰撞效应使近断层脉冲地震动作用下漂浮体系斜拉桥地震响应显著减小。

4 设置减震装置的斜拉桥地震响应

本节分析了不同类型地震动作用下设置黏滞阻尼器和弹性索后斜拉桥地震响应,其中,每个塔梁处黏滞阻尼器总阻尼系数为12 000 kN/(m/s)^{0.3},速度指数为0.3;每个塔梁处弹性索弹性刚度为80 000 kN/m。

4.1 不同类型地震动下碰撞力

图7、8分别为设置黏滞阻尼器和弹性索后不同类型地震动作用下斜拉桥主桥与引桥伸缩缝处碰撞力

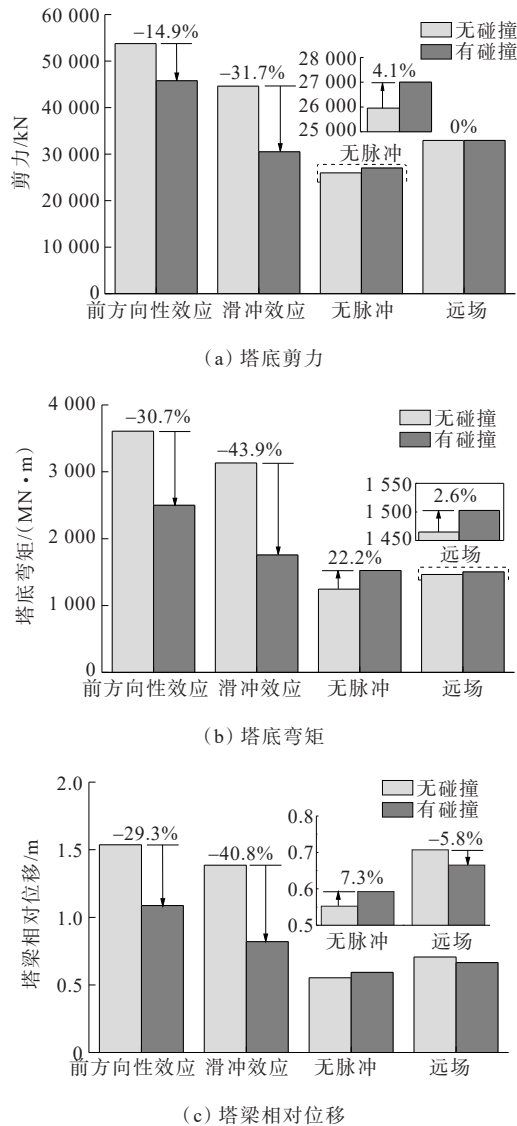


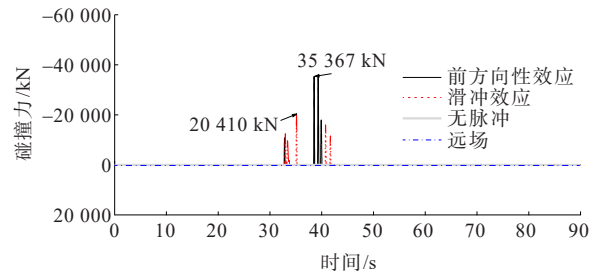
图6 漂浮体系斜拉桥地震响应

Figure 6 Seismic responses of floating cable-stayed bridge

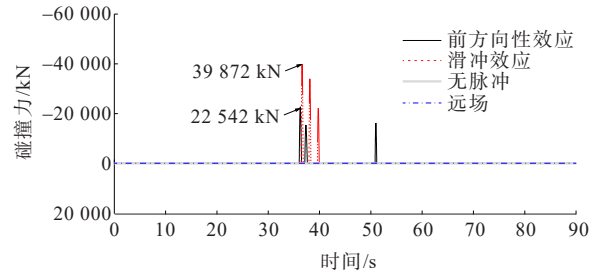
时程。从图7、8可知:由于设置黏滞阻尼器或弹性索后,斜拉桥主梁纵向位移得到控制,近断层无脉冲和远场地震动下不发生碰撞;前方向性脉冲和滑冲效应下发生不同程度碰撞,且碰撞发生时间较集中,大部分碰撞发生在脉冲时间附近,仅设置弹性索后斜拉桥主桥与北侧引桥未发生碰撞,这主要是由于设置弹性索后斜拉桥主桥周期为2.034 s与北侧引桥周期(2.051 s)接近。这表明设置减震装置后,斜拉桥主梁纵向位移有所减小,但脉冲地震动下斜拉桥主桥和引桥仍发生碰撞。

4.2 脉冲地震动下碰撞力对比

图9、10分别为前方向性效应和滑冲效应地震动下斜拉桥主桥与引桥伸缩缝处碰撞力。从图9、10可知:

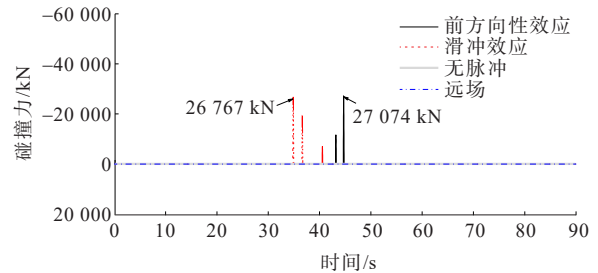


(a) 南侧

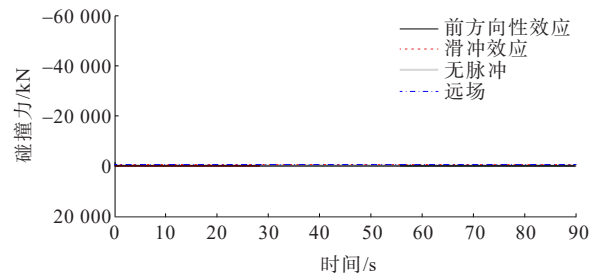


(b) 北侧

图7 设置阻尼器的斜拉桥主桥与引桥主梁碰撞力时程
Figure 7 Time-histories of ponding forces of main bridge and main beam of approach bridge of cable-stayed bridge with dampers



(a) 南侧



(b) 北侧

图8 设置弹性索的斜拉桥主桥与引桥主梁碰撞力时程
Figure 8 Time-histories of ponding forces of main bridge and main beam of approach bridge of cable-stayed bridge with elastic cables

设置黏滞阻尼器和弹性索后,脉冲地震动下斜拉桥主桥与引桥碰撞次数显著减少,大多数碰撞力也减小,特别是漂浮体系斜拉桥碰撞力最大值对应时间处的碰撞力均显著减小,且多数碰撞仍发生于

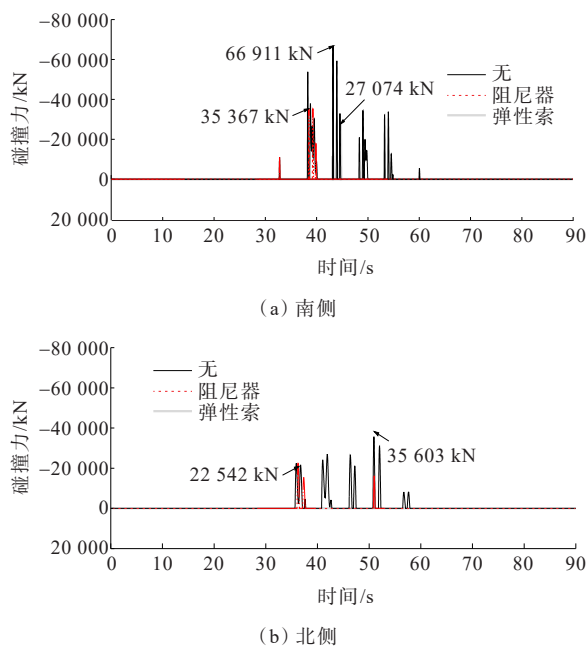


图9 前方向性效应地震动下斜拉桥主桥与引桥主梁碰撞力
Figure 9 Pounding forces of main bridge and main beam of approach bridge of cable-stayed bridge under forward-directivity-effect ground motions

脉冲时段,与不设置减震装置时间范围相近。这主要是由于设置黏滞阻尼器减小主梁位移而减小碰撞力和碰撞次数;设置弹性索减小主梁位移,同时,减小斜拉桥周期使得主桥和引桥周期接近,减少两者不同步振动而削弱其碰撞效应。以上分析表明:设置黏滞阻尼器和弹性索能有效降低碰撞次数,减小碰撞力,且脉冲时段斜拉桥主桥与引桥碰撞响应受减震装置影响显著,黏滞阻尼器和弹性索对脉冲时段碰撞效应减弱较显著。

4.3 设置减震装置后结构地震响应

脉冲地震动作用下设置黏滞阻尼器和弹性索的斜拉桥地震响应结果见表3。从表3可知:与漂浮体系斜拉桥相比,碰撞效应对设置减震装置的斜拉桥

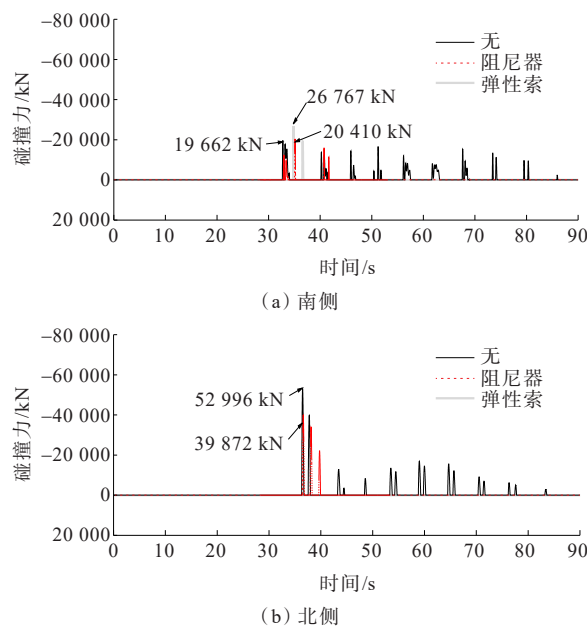


图10 滑冲效应地震动下斜拉桥主桥与引桥主梁碰撞力
Figure 10 Pounding forces of main bridge and main beam of approach bridge of cable-stayed bridge under fling-step ground motions

地震响应影响显著降低;设置黏滞阻尼器后,碰撞效应使斜拉桥地震响应减小,剪力减幅较小,塔梁相对位移减幅稍大,弯矩降幅最大;设置弹性索后,碰撞效应使斜拉桥地震响应略有增大,增幅均在3%以内。这表明黏滞阻尼器和弹性索减弱了碰撞效应对脉冲地震动下斜拉桥地震响应影响程度。

综上可知,设置减震装置后,脉冲地震动作用下斜拉桥主桥与引桥仍可能发生碰撞,但碰撞力和碰撞次数均减小,且脉冲时段碰撞效应减弱显著,同时减震装置显著降低碰撞效应对脉冲地震动下斜拉桥地震响应影响。

5 碰撞效应对桥梁减震效果影响

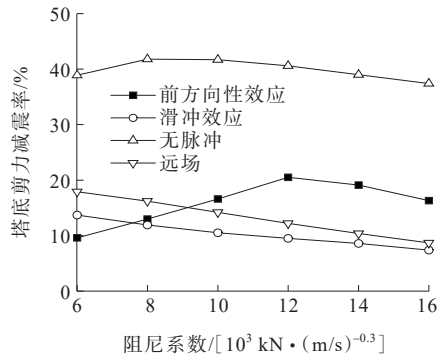
为研究减震装置对斜拉桥减震效果影响,本节分

表3 脉冲地震动作用下设置减震装置的斜拉桥地震响应

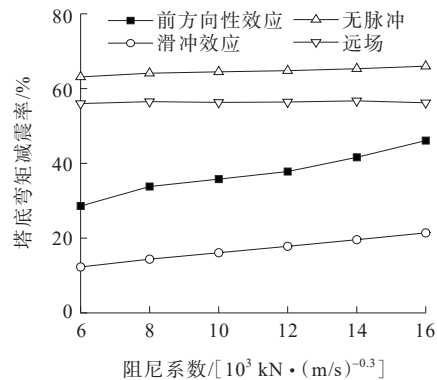
Table 3 Seismic responses of cable-stayed bridge with seismic mitigation devices under pulse-type ground motions

地震响应	项目	塔底剪力			塔底弯矩			塔梁相对位移		
		有碰撞	无碰撞	$[(V-V_0)/V_0]/\%$	有碰撞 $M/$	无碰撞 $M_0/$	$[(M-M_0)/M_0]/\%$	有碰撞 $D/$	无碰撞	$[(D-D_0)/D_0]/\%$
		V/kN	V_0/kN		$(MN \cdot m)$	$(MN \cdot m)$		m	D_0/m	
前方向性效应	漂浮体系	45 765	53 757	-14.9	2 500	3 608	-30.7	1.087	1.537	-29.3
	阻尼器	36 363	36 485	-0.3	1 556	1 842	-15.5	0.600	0.684	-12.3
	弹性索	108 789	106 566	2.1	2 963	2 912	1.7	0.138	0.136	1.7
滑冲效应	漂浮体系	30 521	44 630	-31.6	1 757	3 133	-43.9	0.820	1.386	-40.8
	阻尼器	27 608	28 242	-2.2	1 444	1 678	-13.9	0.558	0.581	-4.0
	弹性索	195 320	191 583	2.0	5 265	5 166	1.9	0.229	0.229	0.0

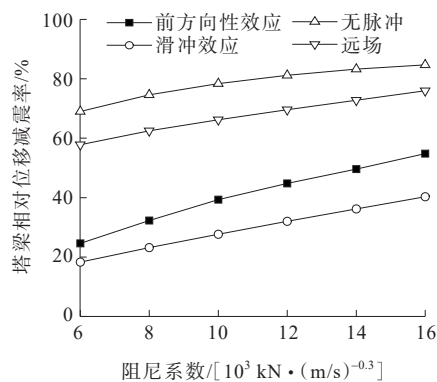
析了不同黏滞阻尼器和弹性索参数下考虑碰撞效应的斜拉桥减震率,减震率=(无减震装置结构响应-设置减震装置结构响应)/无减震装置结构响应。其中,黏滞阻尼器总阻尼系数取为 $6\,000\text{ kN}/(\text{m/s})^{0.3}$ 、 $8\,000\text{ kN}/(\text{m/s})^{0.3}$ 、 $10\,000\text{ kN}/(\text{m/s})^{0.3}$ 、 $12\,000\text{ kN}/(\text{m/s})^{0.3}$ 、 $14\,000\text{ kN}/(\text{m/s})^{0.3}$ 、 $16\,000\text{ kN}/(\text{m/s})^{0.3}$,速度指数取为0.3;弹性索弹性刚度取为 $200\,000\text{ kN/m}$ 、 $400\,000\text{ kN/m}$ 、 $600\,000\text{ kN/m}$ 、 $800\,000\text{ kN/m}$ 、 $1\,000\,000\text{ kN/m}$ 、 $1\,200\,000\text{ kN/m}$,斜拉桥减震率随黏滞阻尼器和弹性索参数变化关系如图11、12所示。



(a) 塔底剪力



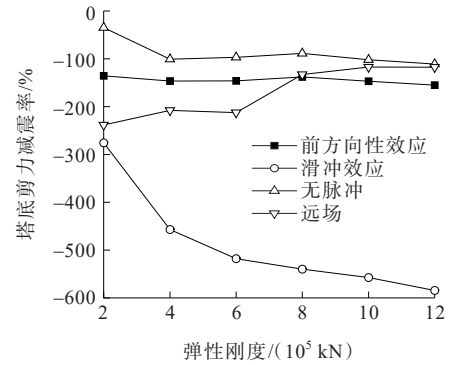
(b) 塔底弯矩



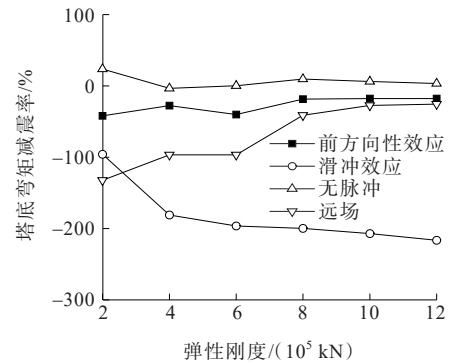
(c) 塔梁相对位移

图11 斜拉桥减震率随黏滞阻尼器参数变化关系

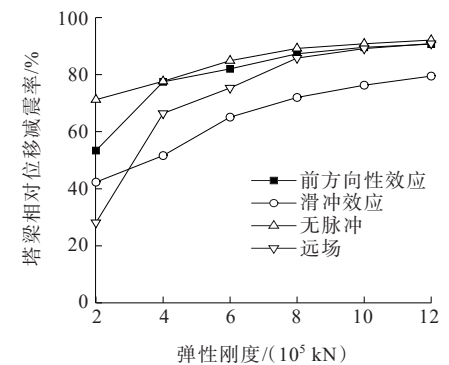
Figure 11 Variation of seismic mitigation rate of cable-stayed bridge with parameters of viscous dampers



(a) 塔底剪力



(b) 塔底弯矩



(c) 塔梁相对位移

图12 斜拉桥减震率随弹性索参数变化关系

Figure 12 Variation of seismic mitigation rate of cable-stayed bridge with parameters of elastic cables

从图11(a)可知:对于前方向性效应和无脉冲地震动,塔底剪力减震率随阻尼系数增大先增大后减小,对于滑冲效应和远场地震动,塔底剪力减震率逐渐减小。从图11(b)可知:对于前方向性效应和滑冲效应地震动,塔底弯矩减震率随阻尼系数增大逐渐增大;对于无脉冲和远场地震动,塔底弯矩减震率变化不显著。从图11(c)可知:塔梁相对位移减震率随阻尼系数增大均逐渐增大。以上分析表明:黏滞阻尼器均能有效减小不同类型地震动下考虑碰撞效应

的斜拉桥地震响应,且斜拉桥减震效果受地震动类型影响较大,总体而言,考虑斜拉桥主桥与引桥碰撞效应后,黏滞阻尼器对无脉冲地震动下斜拉桥减震效果较好,而脉冲型地震动下较差。

从图 12(a)和(b)可知:滑冲效应和无脉冲地震动下塔底剪力减震率和弯矩减震率随弹性索弹性刚度增大而逐渐减小,远场地震动下逐渐增大,前方向性效应下变化略小;图 12(c)表明塔梁相对位移减震率随弹性刚度增大均逐渐增大。以上分析表明:弹性索能有效减小不同类型地震动下考虑碰撞效应的斜拉桥塔梁相对位移,但增大塔底内力,且斜拉桥地震响应随弹性索弹性刚度变化率受地震动类型影响较大,无脉冲地震动下塔梁相对位移减小效果最显著,且塔底内力增大相对较小,而滑冲效应地震动下塔梁相对位移减小效果最差,且塔底内力增大最显著。因此,考虑斜拉桥主桥与引桥碰撞效应后,弹性索能有效减小斜拉桥塔梁相对位移,而且对塔底内力不利,尤其是对滑冲效应地震动下斜拉桥减震最不利。

为研究碰撞效应对设置黏滞阻尼器和弹性索的斜拉桥减震效果影响,分析了考虑碰撞和不考虑碰撞效应下斜拉桥减震率,结果如表 4 所示。其中,每侧塔梁处阻尼器总阻尼系数为 $12\,000\text{ kN}/(\text{m/s})^{0.3}$,速度指数为 0.3;弹性索弹性刚度为 $80\,000\text{ kN/m}$ 。从表 4 可知:不论考虑碰撞与否,设置黏滞阻尼器后斜拉桥减震效果较好,除了远场地震动下剪力,脉冲地震动下斜拉桥减震率小于无脉冲地震动下减震率,且考虑碰撞效应时,这种差距更显著。设置弹性索后斜拉桥主梁位移减震效果较好,但对塔底内力可能不利;不同类型地震动下斜拉桥主梁位移减震率相近,滑冲效应地震动下塔底内力增大最显著。对于无脉冲地震动,考虑碰撞和不考虑碰撞时斜拉桥减震率差距不显著,基本保持在 10% 以内;对于脉冲地震动,不考虑碰撞效应会高估减震率,且滑冲效应更加显著,同时低估弹性索对桥塔地震内力不利影响。因此,探讨脉冲地震动下斜拉桥减震率时,不能忽略碰撞效应影响。

表 4 设置减震装置后斜拉桥减震率

Table 4 Seismic mitigation rate of cable-stayed bridge with seismic mitigation devices

减震装置	地震动类型	塔底剪力减震率			塔底弯矩减震率			塔梁相对位移减震率		
		有碰撞	无碰撞	比值	有碰撞	无碰撞	比值	有碰撞	无碰撞	比值
		$R/\%$	$R_0/\%$	R_0/R	$R/\%$	$R_0/\%$	R_0/R	$R/\%$	$R_0/\%$	R_0/R
黏滞阻尼器	前方向性效应	20.5	32.1	1.57	37.8	49.0	1.30	44.8	55.5	1.24
	滑冲效应	9.5	36.7	3.86	17.8	46.4	2.61	32.0	58.1	1.82
	无脉冲	40.6	38.2	0.94	64.8	57.0	0.88	81.2	79.9	0.98
	远场	12.2	12.2	1.00	56.4	55.2	0.98	69.6	71.4	1.03
弹性索	前方向性效应	-137.7	-98.2	0.71	-18.5	19.3	-1.04	87.3	91.2	1.04
	滑冲效应	-539.9	-329.3	0.61	-199.7	-64.9	0.32	72.0	83.4	1.16
	无脉冲	-88.5	-96.1	1.09	9.7	-10.4	-1.07	89.2	88.4	0.99
	远场	-132.8	-132.8	1.00	-41.2	-44.9	1.09	85.8	86.6	1.01

6 结论

本文研究了近断层地震动作用下斜拉桥主桥和引桥碰撞响应,探讨了碰撞效应对斜拉桥地震响应及减震率影响,得到以下主要结论:

(1) 不同类型地震动作用下漂浮体系斜拉桥主桥与引桥主梁均可能发生碰撞,且近断层脉冲地震动作用下斜拉桥更易发生碰撞,在脉冲时段内碰撞力更大,且碰撞效应显著减小脉冲地震动下斜拉桥地震响应。

(2) 设置黏滞阻尼器和弹性索后,斜拉桥主桥与

引桥在脉冲地震动作用下主梁仍可能发生碰撞,且多数碰撞发生于脉冲时段内,与不设置减震装置时间范围相近,但脉冲时段碰撞效应减弱较显著。同时,黏滞阻尼器和弹性索减弱了碰撞效应对脉冲地震动下斜拉桥地震响应影响程度。

(3) 考虑斜拉桥主桥与引桥碰撞效应后,黏滞阻尼器对无脉冲地震动下斜拉桥减震效果较好,而脉冲型地震动下较差,弹性索对滑冲效应地震动下斜拉桥地震响应最不利;碰撞效应对近断层脉冲地震动作用下斜拉桥减震率影响显著,分析脉冲地震动作用下斜拉桥减震效果时须考虑碰撞效应。

参考文献:

References:

- [1] JIA H Y, LAN X L, ZHENG S X, et al. Assessment on required separation length between adjacent bridge segments to avoid pounding[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 120: 398-407.
- [2] 成先杰, 胡浩. 强震区多跨简支梁桥抗震加固措施对比研究及应用[J]. 中外公路, 2023, 43(6): 278-283.
CHENG Xianjie, HU Hao. Comparative study and implementation of seismic retrofitting measures for multi-span simply supported bridges in strong earthquake areas[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(6): 278-283.
- [3] MIARI M, CHOONG K K, JANKOWSKI R. Seismic pounding between bridge segments: A state-of-the-art review[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2021, 28(2): 495-504.
- [4] 孙永江. 近场地震作用下大跨高墩连续刚构桥易损性分析[J]. 中外公路, 2024, 44(1): 161-165.
SUN Yongjiang. Fragility analysis of continuous rigid frame bridge with high piers and long span subjected to near-field earthquakes[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(1): 161-165.
- [5] 武芳文, 孟园英, 纪全有, 等. 基于碰撞作用的大跨径斜拉桥地震响应分析[J]. 地震研究, 2018, 41(2): 337-341.
WU Fangwen, MENG Yuanying, JI Quanyou, et al. Study of pounding analysis of seismic response for long-span cable-stayed bridge[J]. Journal of Seismological Research, 2018, 41(2): 337-341.
- [6] 管仲国, 李建中. 大跨度桥梁抗震体系研究[J]. 中国科学(技术科学), 2021, 51(5): 493-504.
GUAN Zhongguo, LI Jianzhong. Advances in earthquake resisting systems for long-span bridges[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2021, 51(5): 493-504.
- [7] 雷凡, 邓育林, 何雄君. 地震动行波作用下大跨斜拉桥与引桥伸缩缝处碰撞效应研究[J]. 公路, 2015, 60(2): 70-75.
LEI Fan, DENG Yulin, HE Xiongjun. Study of collision effect at expansion joints between main span and approach spans of long-span cable-stayed bridge due to travelling wave seismic response[J]. Highway, 2015, 60(2): 70-75.
- [8] 沈禹, 谈华顺, 王献攀, 等. 考虑行波效应的大跨度矮塔斜拉桥耐震时程分析[J]. 工程力学, 2020, 37(3): 131-141, 148.
SHEN Yu, TAN Huashun, WANG Xianzhi, et al. Application of the endurance time method to seismic-induced pounding analysis for long-span extradosed cable-stayed bridges considering wave passage effects[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(3): 131-141, 148.
- [9] 邓育林, 雷凡, 何雄君. 地震作用下大跨斜拉桥主桥与多联引桥伸缩缝处连锁碰撞效应研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(2): 87-95.
DENG Yulin, LEI Fan, HE Xiongjun. Study on effects of pounding at expansion joints on seismic responses of long-span cable-stayed bridges between main span and multiple approach spans under earthquakes[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(2): 87-95.
- [10] 王德光, 王恒, 沈文爱, 等. 软土地地上双座串联大跨度斜拉桥地震响应及碰撞分析[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(3): 52-58.
WANG Deguang, WANG Heng, SHEN Wenai, et al. Seismic response and collision analysis of two series-connected long-span cable-stayed bridges at soft soil site[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2020, 37(3): 52-58.
- [11] 张文学, 吴海军, 王景景. 连梁装置对斜拉桥与引桥碰撞影响分析[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(5): 684-689.
ZHANG Wenxue, WU Haijun, WANG Jingjing. Analysis of effect of unseating prevention devices on the collision of cable-stayed bridge and approach span[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(5): 684-689.
- [12] 申林. 基于碰撞效应的混凝土斜拉桥地震响应特征研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
SHEN Lin. Study on seismic response characteristics of concrete cable-stayed bridge based on collision effect[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [13] 车刚刚. 城市独塔斜拉桥抗震性能研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
CHE Ganggang. Study on seismic performance of urban single-tower cable-stayed bridge[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.
- [14] 王念辉. 宽幅单索面矮塔斜拉桥碰撞效应分析[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.
WANG Nianhui. Analysis of collision effect of low-pylon cable-stayed bridge with wide single cable plane[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.
- [15] 石岩, 范向鑫, 刘云帅, 等. 近断层竖向地震动对摩擦摆隔震矮塔斜拉桥地震反应的影响[J]. 工程抗震与加固改造, 2022, 44(3): 121-129.
SHI Yan, FAN Xiangxin, LIU Yunshuai, et al. Effect of near-fault vertical ground motion on extradosed cable-stayed bridge isolated with FPS[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2022, 44(3): 121-129.
- [16] SHEN Y, LI Y X, XU W J, et al. Evaluation of seismic-induced impact interaction between a cable-stayed bridge and its approach spans using a simplified analysis model[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2022, 26(7): 3343-3363.