

文章编号:1673-2049(2016)04-0082-08

橡胶防撞垫片参数对曲线桥力学特性的影响

宋 波^{1,2},程景霞^{1,2},王彦旭³,毕泽锋^{1,2}

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院,北京 100083; 2. 北京科技大学 强震区轨道交通工程抗震研究
北京市国际科技合作基地,北京 100083; 3. 北京市交通委员会路政局,北京 100053)

摘要:基于某两联曲线桥建立了计算模型,通过横桥向橡胶防撞垫片的设置,研究了橡胶垫片设计参数对曲线桥动力特性的影响。结果表明:橡胶垫片的加设使曲线桥旋转中心点转移,位移偏移方向改变;在设置橡胶垫片时,应考虑橡胶垫片的刚度以保证垫片作用力最大值不超过其极限值,避免梁体出现偏移;通过垫片的加设可以减弱梁体与挡块的碰撞,降低墩底曲率延性需求系数;随着间隙值的增大,橡胶垫片利用率明显下降,相对垫片的负荷增大,在保证曲线桥温度正常服役变形要求的前提下尽量减小间隙值的取值;随着硬度的增大,橡胶垫片强度增大,变形能力减弱,进而造成橡胶垫片利用率降低,建议选取邵氏硬度 55 作为橡胶垫片的首选值。

关键词:曲线桥;橡胶垫片;力学特性;间隙值;硬度

中图分类号:TU311 **文献标志码:**A

Influence of Parameters of Rubber Gasket on Mechanical Characteristic of Curved Bridge

SONG Bo^{1,2}, CHENG Jing-xia^{1,2}, WANG Yan-xu³, BI Ze-feng^{1,2}

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing International Cooperation Base for Science and Technology on Aseismic Research of Rail Transit Engineering in Strong Motion Area, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Road Administration of Beijing Municipal Commission of Transport, Beijing 100053, China)

Abstract: The calculation model was established based on a curved bridge with two-linking, and the influences of parameters of rubber gasket on mechanical characteristic of curved bridge were studied. The results show that application of rubber gasket make the rotation center of curved bridge transfer and the offset direction change. When rubber gasket is arranged, the stiffness of rubber gasket should be considered to ensure that the maximum force of gasket doesn't exceed the limit value, and the deviation of beam body is avoided. The impact of beam body and block stop can be reduced by addition of gasket, and the curvature ductility demand coefficient of pier bottom can be reduced. The utilization rate of rubber gasket decreases obviously and the load of relative gasket increases with the increase of gap value. Under the premise of ensuring the normal service deformation requirements of temperature of curved bridge, the gap value should be reduced as far as possible. With the increase of hardness, the strength of rubber gasket increases, the deformation ability is weakened, and the utilization rate of rubber gasket is reduced. It is suggested that the Shore hardness value of 55 is taken as the first choice of rubber

收稿日期:2016-01-24

基金项目:教育部海外名师项目(MS2011BJKJ005);北京市交通委员会路政局项目

作者简介:宋 波(1962-),男,山东招远人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:songbo@ces.ustb.edu.cn。

gasket.

Key words: curved bridge; rubber gasket; mechanical characteristic; gap value; hardness

0 引言

2008年中国四川省汶川县发生8.0级地震,造成大量公路桥梁破坏,该地区的桥梁主要为连续简支梁桥,支座多为直接搁置的板式橡胶支座,地震中稳定性较差,主梁与桥墩连接较为薄弱,更多地发生横向、纵向移位,乃至最终落梁^[1]。中国地震局2015年11月3日发布中国第5代地震区划图,该区划图以抗倒塌为设防目标,罕遇地震作用桥在该区划图中得到充分体现。然而罕遇地震作用下曲线桥主梁梁体与横桥向挡块碰撞受损严重,纵向、横向相对位移过大易发生落梁,给灾后救援增加了难度。本文基于曲线桥横桥向橡胶垫片的设置,为防止曲线桥横桥向相对位移过大而导致落梁坍塌,提出了较为经济合理的措施。

现阶段各国对曲线梁桥的抗震性能进行了初步探究。朱东升等^[2]采用反应谱法计算了曲线桥地震反应,研究了计算精度、计算中需选取的振型数及最大值的组合方法;聂利英等^[3]基于位移和多级设防的桥梁抗震设计思想对曲线梁的抗震性能进行了评估。在数值仿真分析方面,魏双科等^[4]提出了一种双脊骨空间有限元模型以模拟和分析立交桥曲线箱梁的固有振动特性和动力反应。曲线梁桥碰撞破坏的研究开展相对较少,李黎等^[5-6]研究了公路和城市立交曲线梁桥的相邻梁体碰撞地震反应,分析了铅芯橡胶支座对邻桥碰撞反应的影响;郭安薪等^[7]研究了针对高架桥梁碰撞的磁流变阻尼器(MR)半主动控制以及采用形状记忆合金(SMA)限位器的落梁控制;Shrestha等^[8]研究了梁间形状记忆合金的连梁装置在罕遇地震作用下的有效性;Khawwaja等^[9]基于考虑线性、非线性力-位移关系的模型,研究了邻梁间的碰撞效应及碰撞力;黄勇等^[10]研究了汶川地震中小半径曲线连续梁桥不同下部结构形式及固定墩上下部结构不同连接方式对曲线梁桥抗震性能的影响;王阳春等^[11]指出地震波输入方式、墩梁约束形式、宽度和跨径的改变对小半径匝道曲线梁桥地震响应的影响较大;王军文等^[12]研究了横桥向地震作用下非规则梁桥梁体与抗震挡块间的碰撞对结构横桥向地震反应的影响;徐路勤等^[13]研究了考虑上部梁体与防震挡块间横向碰撞效应的非规则梁桥横向地震力分布规律;石岩等^[14]建立了考虑偏

心距、桥墩弹塑性、桩-土相互作用等因素的合理碰撞模型;邓育林等^[15]研究了横向地震作用下梁体与挡块间的碰撞效应,推导出阻尼常数与恢复系数间的关系表达式,并提出了为减小梁体与横桥向挡块间碰撞效应的挡块刚度合理取值。

本文以某两联八跨曲线桥作为研究对象,考虑碰撞过程中的能量损失,建立了加设横桥向橡胶防撞垫片装置的计算模型,分析了横桥向橡胶防撞垫片设置前后曲线桥动力特性的改变,并对间隙值、橡胶硬度等设计参数进行了分析。

1 橡胶防撞垫片作用机理

加设横向防撞橡胶垫片的曲线桥梁间与挡块的计算模型[图1(a)]设置了2个间隙单元,其作用原理为:当上部梁体与橡胶垫片的相对距离为0时,橡胶垫片的间隙单元开始发挥作用,橡胶垫片承受压应力进而发生压缩变形;随着该过程的持续,当梁体与挡块间的相对距离减小到0时,梁体与挡块横向碰撞的第2个间隙单元开始发挥作用,而梁体与橡胶垫片的间隙单元在此时退出工作,即代表橡胶垫片失效。碰撞过程中的恢复力特性如图1(b)所示(其中, F 为恢复力, u 为位移),在对防撞橡胶垫片进行设计时通常改变上部梁体与橡胶垫片的间隙 d_0 、橡胶垫片与横桥向挡块的间隙 d_1 ,以及橡胶垫片刚度 k_1 、碰撞刚度 k_2 等,进而分析其对结构碰撞反应和结构整体动力响应的影响。

目前各国规范关于橡胶防撞垫片的设计方法仍然未形成统一的设计理念及体系,根据肖俊恒^[16]提出的设计方法,本文采用矩形橡胶垫片,其横向橡胶防撞垫片的各项参数具体计算公式为

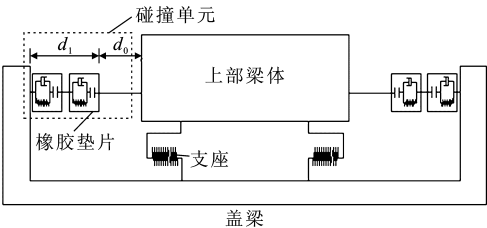
$$k = \frac{A_c \mu_1 E}{t} \quad (1)$$

$$c_p = 2\xi_r \sqrt{k \frac{m_s}{2}} \quad (2)$$

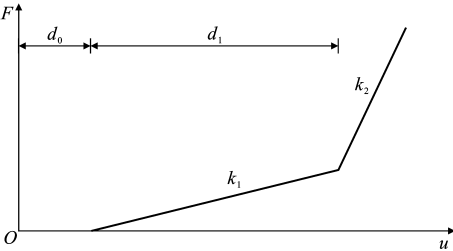
式中: k 为橡胶垫片的压缩刚度; E 为橡胶弹性模量; A_c 为橡胶垫片的受压面积; μ_1 为橡胶间摩擦因数; t 为橡胶垫片厚度; c_p 为橡胶垫片的阻尼; ξ_r 为橡胶缓冲垫的阻尼比; m_s 为防撞体系的质量。

2 计算模型

选取某曲线桥作为研究背景,其具体参数如下:



(a) 防撞橡胶垫片计算模型



(b) 恢复力特性

图 1 防撞橡胶垫片作用机理

Fig. 1 Mechanism of Anti-collision Rubber

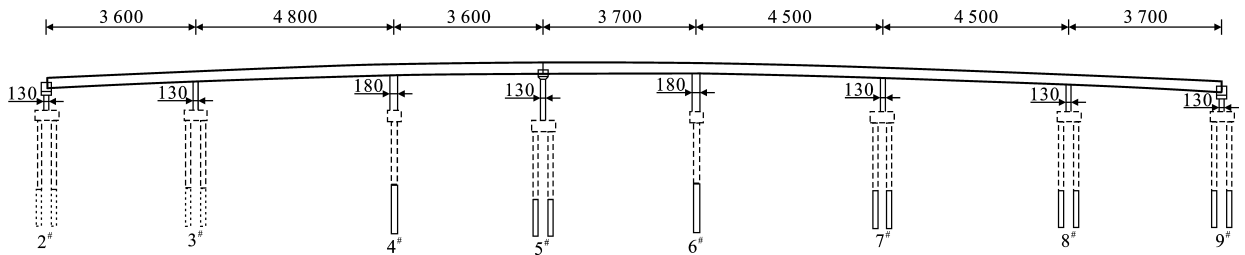


图 2 曲线桥立面(单位:cm)

Fig. 2 Elevation of Curved Bridge (Unit:cm)

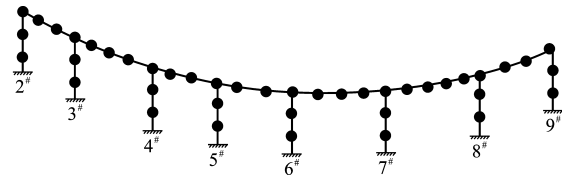


图 3 曲线桥计算模型

Fig. 3 Calculation Model of Curved Bridge

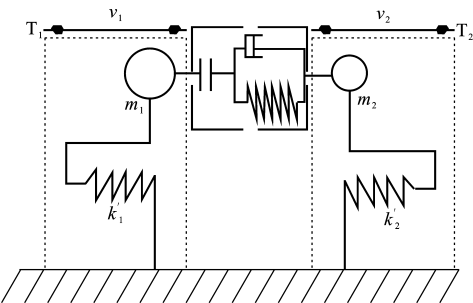


图 4 梁间细部解析模型

Fig. 4 Detail Analytical Model Between Beams

梁间支座刚度, m_1, m_2 为相邻梁体质量, v_1, v_2 为碰撞速度, T_1, T_2 代表相邻跨)。墩底采用自由度全约束的形式。

桥长 378.92 m, 桥宽 10.5 m。该桥上部结构形式为 2 m×30 m 预应力混凝土简支 T 梁+(36+48+36)m 钢-混凝土组合连续梁+(37+45+45+37)m 钢-混凝土组合连续梁+1 m×30 m 预应力混凝土简支 T 梁;下部结构采用柱式桥墩,桥台为 U 型桥台,钻孔灌注桩基础。曲线桥立面如图 2 所示。

曲线桥计算模型见图 3。本文选取两联钢筋混凝土连续梁桥作为研究对象,采用 ANSYS 软件进行建模分析,以 Beam189 单元对主梁和桥墩进行模拟,Combine40 单元模拟 GPZ(KZ)10GD 固定支座,初始水平刚度为 $1 \times 10^{12} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$,支座发生剪切破坏的限值为 2 000 kN,超过限值该方向的支座失效;Combine39 单元模拟 JQCZ-II 3000DX 减隔震支座,初始水平刚度为 $3 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$;Combine40 单元模拟梁间以及梁体与横桥向挡块的碰撞。梁间细部解析模型见图 4(其中, k_1', k_2' 为相邻

根据《隔振设计规范》(GB 50463—2008)^[17],橡胶缓冲垫的阻尼比可取 0.08。本文曲线桥选取邵氏硬度为 55 的橡胶垫片,由于该曲线桥采用的是沿纵桥向滑动的钢球支座,全桥在横桥向设置的支座均未发生剪切破坏。根据黄良路左转匝道曲线桥所处场地条件及区域,桥梁位于地震设防烈度 8 度区,Ⅲ类场地,故选取日本海中部地震波 T1-Ⅲ(远场地震)、兵库县南部地震波 T2-Ⅲ(近场地震)及天津波 3 条地震波。部分地震波记录见表 1。

表 1 地震波记录

Tab. 1 Seismic Wave Records

场地类型	地震波	时间	地震名称	震级
I 类	T1-I	1978 年	宫城县地震	7.4
II 类	T1-II	1968 年	日向滩冲地震	7.5
III 类	T1-III	1983 年	日本海中部地震	7.7
I 类	T2-I	1995 年	兵库县南部地震	7.2
II 类	T2-II			
III 类	T2-III			

5[#] 墩支承的上部梁体设有 12 cm 伸缩缝,为了研究曲线桥伸缩缝处的横桥向位移变化,分别提取

不同地震动作用下第 1 联、第 2 联 5[#] 墩处的墩、梁相对径向位移。取加速度峰值为 70×10^{-2} , 140×10^{-2} , $200\times10^{-2}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 的不同类型地震波, 提取各墩横桥向左的相对位移(图 5)。图 5 中, “+” 表示横桥向近圆心点方向, “-” 表示横桥向背离圆心点方向。在地震动峰值加速度 $200\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 作用下, 曲线桥梁体与墩顶的相对径向位移最大值出现在第 1 联 5[#] 墩和第 2 联 5[#] 墩处, 曲线桥的最大相对径向位移约为 0.8 mm , 故梁体与橡胶垫片的游间值拟采用 0.01 m , 且拟定在 2[#], 5[#], 9[#] 墩的梁体与挡块之间加设防撞橡胶垫。

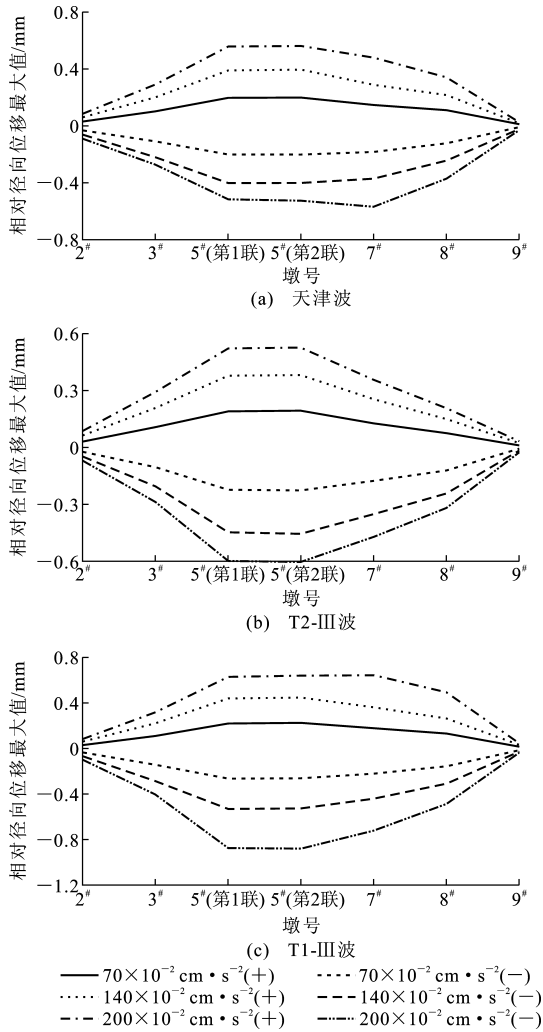


图 5 不同峰值加速度地震作用下梁体与墩顶相对径向位移最大值

Fig. 5 Maximum Values of Relative Radial Displacements of Beam and Pier Top Under Earthquake with Different Peak Accelerations

3 橡胶垫片对曲线桥动力响应影响

3.1 有无橡胶垫片的上部梁体位移对比

通过加设橡胶垫片, 2[#] 墩在时间 $t=10.12\text{ s}$ 时

径向位移值最大, 第 1 联梁体整体绕 4[#] 墩与 5[#] 墩之间的梁上某点呈逆时针转动, 5[#] 墩(第 1 联)有指向圆心点偏移的趋势, 同无橡胶垫片时相比, 其第 1 联各墩径向位移值均减小, 2[#] 墩径向位移值减小约 74%。对于第 2 联, 旋转点由 7[#] 墩和 8[#] 墩之间移动至 5[#] 墩和 6[#] 墩之间; 5[#] 墩以及 9[#] 墩处横桥向位移减小, 但值得注意的是 6[#], 7[#], 8[#] 墩位移增大。当 $t=7.79\text{ s}$ 时, 5[#] 墩(第 1 联)处径向位移达到最大值, 曲线桥整体向背离圆心点偏移, 同无橡胶垫片时变化规律一致, 但位移值变小, 普遍减小 20%~30%, 曲线桥各时刻梁体径向位移变化如图 6 所示, 其中箭头表示 5[#] 墩偏移趋势。

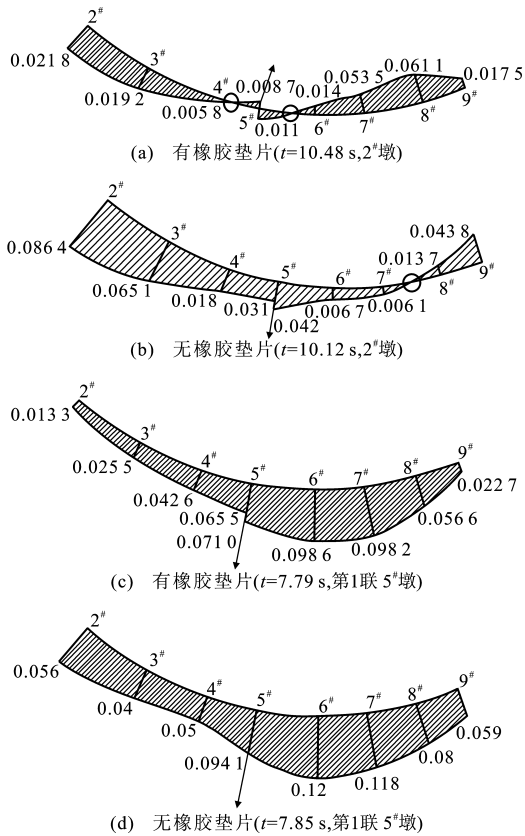


图 6 曲线桥各时刻梁体径向位移变化(单位: mm)

Fig. 6 Changes of Radial Displacements of Beam in Curved Bridge at Different Time (Unit: mm)

由于橡胶垫片的加设, 曲线桥运动形式发生改变, 旋转中心点转移, 位移偏移方向发生改变; 各墩上部梁体的横桥向位移较无橡胶垫片时减小, 但也存在特殊情况, 第 2 联桥跨端部的横桥向位移值偏大, 增大 24%。

3.2 曲线桥橡胶垫片碰撞力

当梁体与橡胶垫片间的位移超过橡胶垫片间隙值时, 橡胶垫片起作用, 能量首先由橡胶垫片耗散, 有效降低了梁体与挡块发生碰撞时的加速度, 进而

避免瞬间产生非常大的碰撞,相邻桥跨的橡胶垫片作用过程不同步,易出现 2 种结果:①橡胶垫片碰撞力的最大值未达到极限值,从碰撞次数看,梁体在横桥向没有明显的偏移倾向;②橡胶垫片碰撞力的最大值超过极限值,上部梁体向某一边发生明显的偏移,如图 7 所示。本文曲线桥第 2 联梁体右边防撞橡胶垫片的碰撞次数较左边多 300 次。

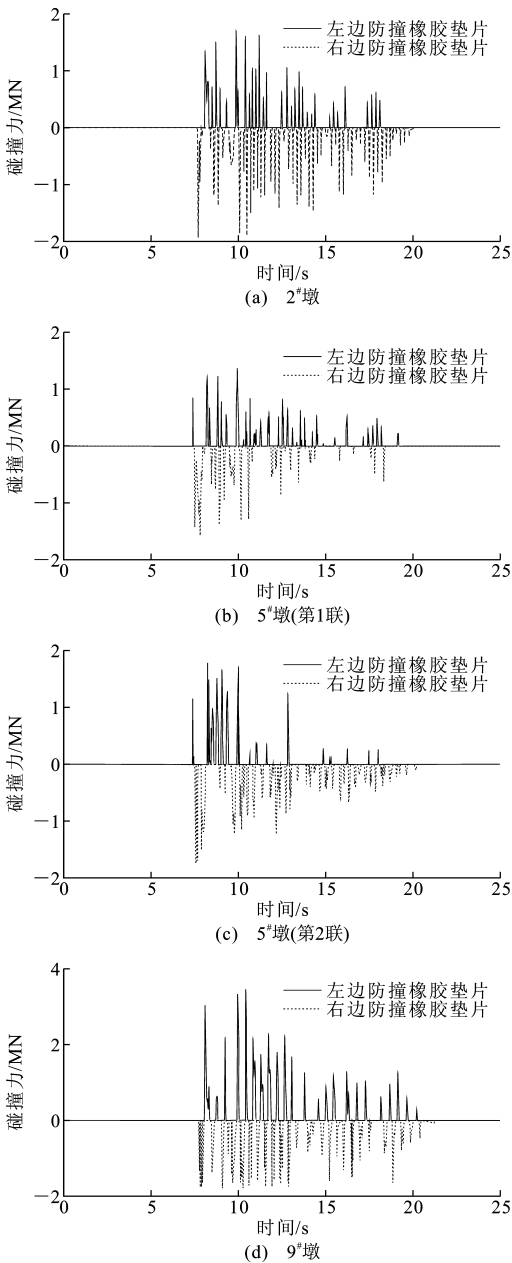


图 7 防撞橡胶垫片碰撞力

Fig. 7 Collision Forces of Anti-collision Rubber Gaskets

3.3 有无橡胶垫片的墩底曲率对比

由于防撞橡胶垫片避免了曲线桥横桥向的碰撞,减小了曲线桥横向位移,曲线桥墩底曲率呈整体减小的趋势,其重点变化部位集中在 2[#], 3[#], 7[#] 墩

处的墩底,其曲率分别减小 65%, 18%, 10%。通过设置橡胶垫片,有效减小了 3[#], 7[#] 墩的塑性开展,耗散了梁体与挡块碰撞所形成的能量。曲线桥大部分桥墩墩底的截面曲率延性系数降低,延性需求系数最大为 7[#] 墩,但相比无橡胶垫片其减小了约 7%;值得注意的是,4[#] 墩处延性需求系数增大,但仍满足延性能力要求。有无防撞橡胶垫片的墩底截面曲率延性需求系数如表 2 所示。

表 2 有无防撞橡胶垫片的墩底截面曲率延性需求系数

Tab. 2 Section Curvature Ductility Demand Coefficients of Pier Bottom with or Without Anti-collision Rubber Gasket

墩号	有无橡胶垫片	最大曲率/ m ⁻¹	屈服曲率/ m ⁻¹	曲率延性 需求系数
3 [#]	无	0.003 4	0.002 1	1.637 7
	有	0.002 7	0.002 1	1.273 8
4 [#]	无	0.001 7	0.001 7	1.023 9
	有	0.001 8	0.001 7	1.076 1
6 [#]	无	0.004 3	0.001 7	2.531 6
	有	0.004 2	0.001 7	2.486 9
7 [#]	无	0.006 5	0.002 1	3.115 3
	有	0.006 0	0.002 1	2.872 0

4 橡胶垫片设计参数对曲线桥动力响应影响

4.1 橡胶垫片间隙值对曲线桥动力响应影响

图 8 为不同间隙值所对应的梁体与墩顶相对径向位移。由图 8 可知:不同间隙值的曲线桥变化规律一致,相对径向位移均较无橡胶垫片时整体减小,7[#] 墩处支座未发生剪切破坏,梁体与墩顶未分开;随着间隙值的增大,与无橡胶垫片相比,梁体与墩顶的相对径向位移变化基本一致,减小 22%~60%,相对径向位移随间隙值增大而增加。在不同地震动作用下,曲线桥上部梁体与墩顶的相对径向位移基本都包络在无橡胶垫片的曲线内;随着间隙值的增大,相对径向位移的变化规律一致,呈非线性增长,且间隙值越大,其增长趋势越明显。

为明确横桥向防撞橡胶垫片的作用机理,针对曲线桥 2[#], 5[#], 9[#] 墩处梁体与挡块之间加设的橡胶垫片作用力进行分析,防撞橡胶垫片利用率(橡胶垫片作用力与其极限承受力的比值)如图 9 所示。对于天津波,同各墩防撞橡胶垫片的利用率极限值相比,随着间隙值的生长,2[#] 墩处曲线桥偏右移动,右边橡胶垫片承担负荷较大;第 1 联 5[#] 墩处左边橡胶垫片未得到充分利用,而右边橡胶垫片利用率一直维持在 0.9 附近,第 2 联 5[#] 墩处左右橡胶垫片均得

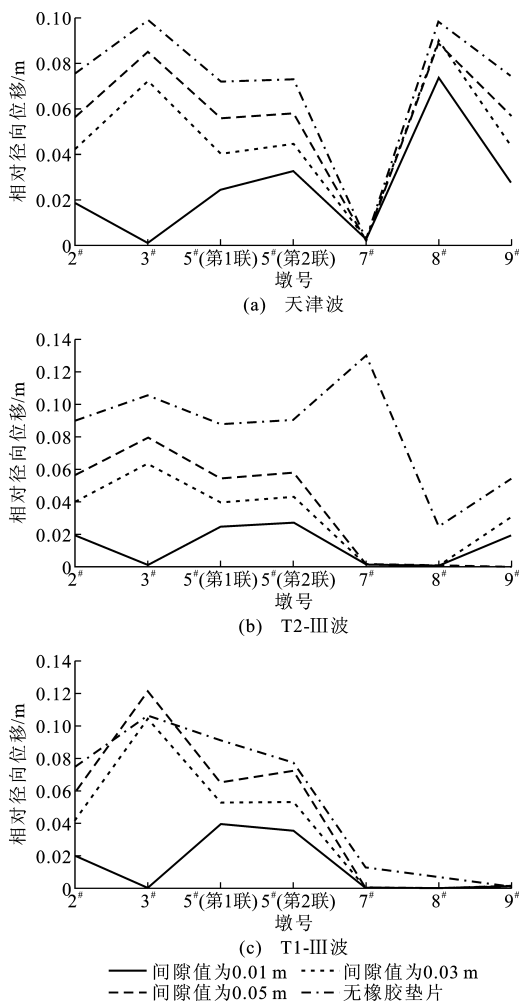


图8 不同间隙值时梁体与墩顶的相对径向位移

Fig. 8 Relative Radial Displacements of Beam and Pier Top with Different Gap Values

到充分利用,其利用率在0.95以上;9#墩与第2联5#墩处的规律相同。由此分析得到,随着间隙值的增大,第1联的梁体存在背离径向的偏移,右边橡胶垫片负荷增大,而左边橡胶垫片未得到充分利用,第2联梁体左右橡胶垫片均得到充分利用。另外,对于T2-Ⅲ, T1-Ⅲ地震波,仅9#墩处由于地震频谱特性的影响而未与防撞橡胶垫片发生碰撞,其余各墩变化规律基本一致。随着间隙值的增大,一些设置的橡胶垫片利用率明显下降,增大了该墩处相对橡胶垫片的负荷,这在曲线桥横桥向防落梁设计时是极为不利的,应当予以避免。

4.2 橡胶垫片硬度对曲线桥动力响应影响

沿各墩分别提取不同橡胶垫片硬度所对应的梁体与墩顶的相对径向位移,如图10所示。天津波作用下除7#墩外其余各墩相对径向位移均随着橡胶垫片硬度的增大而减小,7#墩处相对径向位移较无橡胶垫片时增大;T1-Ⅲ波作用下各墩相对径向位

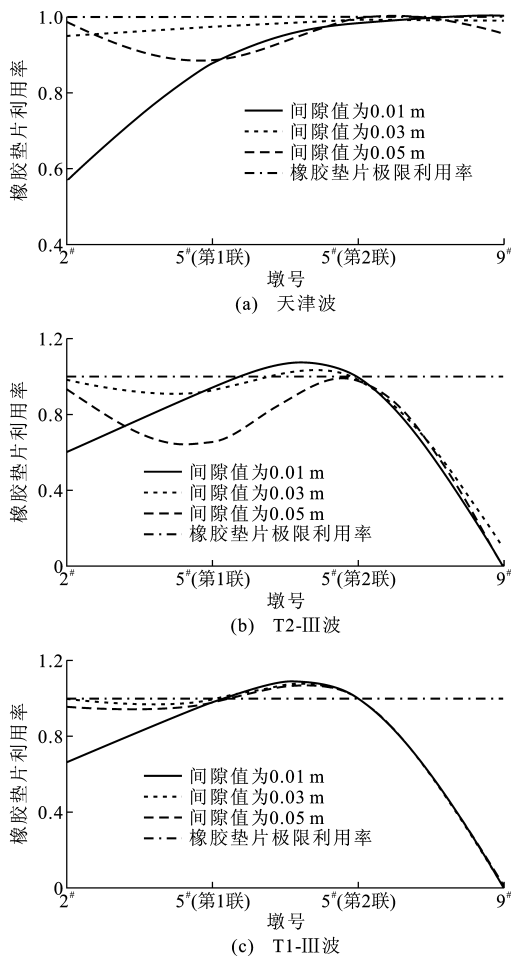


图9 不同间隙值时防撞橡胶垫片利用率

Fig. 9 Using Rates of Anti-collision Rubber Gaskets with Different Gap Values

移基本随着橡胶垫片硬度的增大而减小,相对径向位移减小值最大出现在2#墩处,减小52.3%。在不同地震动作用下,曲线桥上梁体与墩顶的相对径向位移基本都包络在无橡胶垫片的曲线内,随着橡胶垫片硬度的增大,梁体与墩顶的相对径向位移基本呈减小的规律,但个别墩处易发生突变,选取橡胶垫片硬度值时应着重考虑这类突变对曲线桥整体动力特性的影响。

不同橡胶垫片硬度时防撞橡胶垫片利用率如图11所示。同各墩防撞橡胶垫片的利用率极限值相比,随着硬度的增大,2#墩处曲线桥保持偏右的运动,右边橡胶垫片承担负荷大;第1联5#墩处左右两边橡胶垫片的作用力同极限值比值的最小值分别为0.28,0.55,表明在该处曲线桥仍偏右运动,第2联5#墩处该比值分别为0.65,0.56;9#墩与第2联5#墩处的规律相同。随着橡胶垫片硬度增大,梁体与挡块间橡胶垫片作用力最大值同极限值的比值呈减小趋势,即随着硬度的增大,橡胶垫片强度增大,

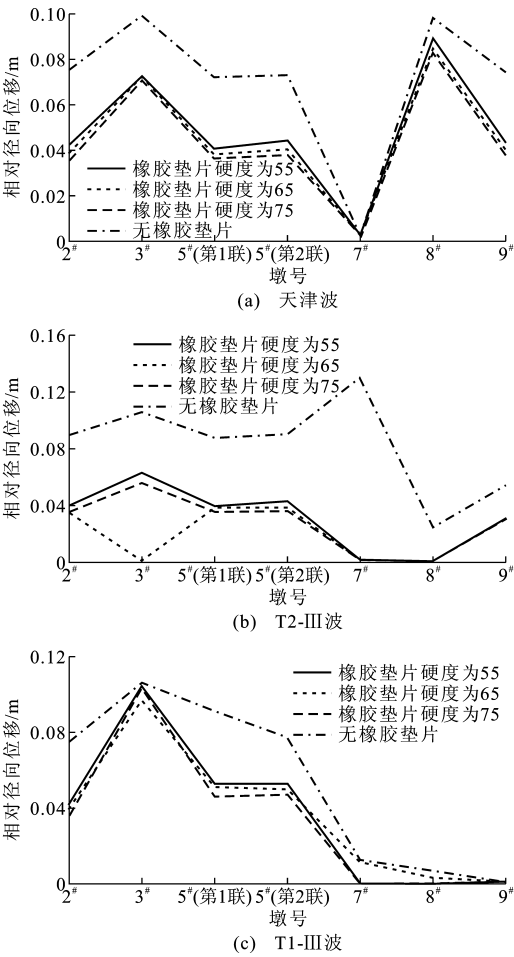


图 10 不同橡胶垫片硬度时梁体与墩顶的相对径向位移
Fig. 10 Relative Radial Displacements of Beam and Pier Top with Different Hardness Values of Rubber Gaskets
变形能力减弱,进而造成橡胶垫片利用率降低。

5 结 语

(1)由于横桥向防撞橡胶垫片的加设,曲线桥运动形式发生改变,梁体与墩顶相对径向位移减小明显,在设置橡胶垫片时,考虑橡胶垫片的刚度以保证橡胶垫片最大碰撞力不超过其极限值,避免梁体出现偏移;另外,通过橡胶垫片的加设可以有效减弱梁体与挡块的碰撞,耗散能量,降低墩底曲率延性需求系数。

(2)随着间隙值的增大,曲线桥梁体与墩顶的相对径向位移变化规律呈非线性增大,橡胶垫片利用率明显下降,同时增大了橡胶垫片的负荷,梁体与挡块的横向碰撞力呈增大趋势。因此,在保证曲线桥温度正常服役变形要求的前提下尽量减小间隙值的取值。

(3)随着橡胶垫片硬度的增大,梁体与墩顶的相对径向位移减小,梁体与挡块横向碰撞反应减弱,但

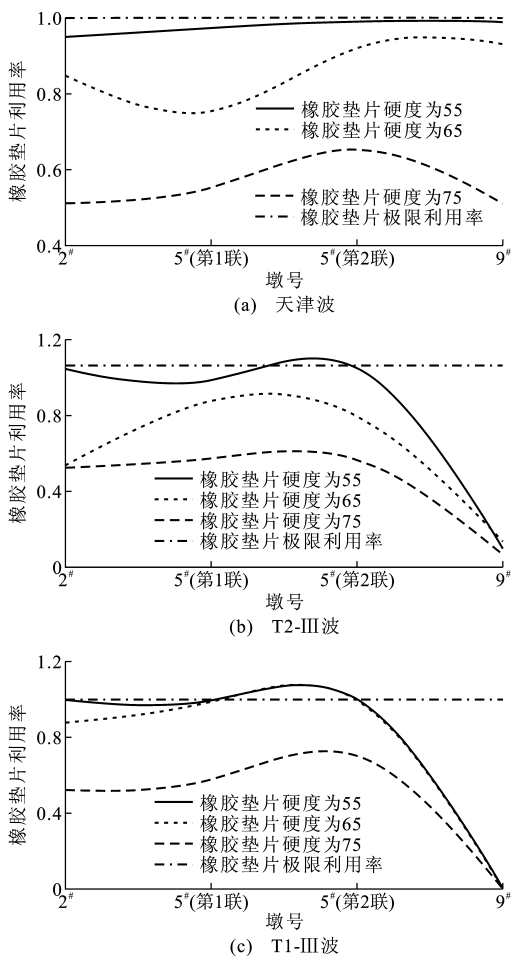


图 11 不同橡胶垫片硬度时的利用率
Fig. 11 Using Rate with Different Hardness Values of Rubber Gaskets

橡胶垫片强度增大,变形能力会相应减弱,进而造成橡胶垫片利用率降低。通过综合比选各指标,建议对于类似曲线桥,橡胶垫片邵氏硬度 55 为首选值。

参考文献:

References:

[1] 王东升,郭 迅,孙治国,等.汶川大地震公路桥梁震害初步调查[J].地震工程与工程振动,2009,29(3):84-94.
WANG Dong-sheng, GUO Xun, SUN Zhi-guo, et al. Damage to Highway Bridges During Wenchuan Earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2009, 29(3): 84-94.

[2] 朱东生,刘世忠,虞庐松.曲线桥地震反应研究[J].中国公路学报,2002,15(3):42-48.
ZHU Dong-sheng, LIU Shi-zhong, YU Lu-song. Research on Seismic Response of Curved Girder Bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(3): 42-48.

- [3] 聂利英,李建中,胡世德,等. 曲线梁桥非线性分析及抗震性能评估[J]. 同济大学学报:自然科学版,2004,32(10):1360-1364.
NIE Li-ying, LI Jian-zhong, HU Shi-de, et al. Nonlinear Analysis and Seismic Estimation on Curved Beam Bridge[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(10): 1360-1364.
- [4] 魏双科,李鸿晶,罗寒松,等. 立交桥曲线箱梁动力分析模型[J]. 地震工程与工程振动,2006,26(4):168-174.
WEI Shuang-ke, LI Hong-jing, LUO Han-song, et al. A Dynamic Model of Curved Box Girder Beam in Highway Interchanges [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2006, 26(4): 168-174.
- [5] 李黎,吴璟,叶志雄. 隔震曲线桥梁碰撞研究[J]. 工程抗震与加固改造,2008,30(5):48-54.
LI Li, WU Jing, YE Zhi-xiong. Research on Pounding of Isolated Curved Bridge [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008, 30(5): 48-54.
- [6] MENDEZ GALINDO C, HAYASHIKAWA T, RUIZ JULIAN D. Curvature Effect on Seismic Response of Curved Highway Viaducts Equipped with Unseating Cable Restrainers[J]. Journal of Structural Engineering. A, 2008, 54A: 315-323.
- [7] 郭安薪,李惠,李忠军,等. 高架桥梁的地震碰撞和落梁分析及其控制[J]. 防灾减灾工程学报,2010,30(增):172-176.
GUO An-xin, LI Hui, LI Zhong-jun, et al. Analysis and Control of Seismic Collision and Beam Falling of Viaduct Bridge[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(S): 172-176.
- [8] SHRESTHA B, HAO H, BI K. Effectiveness of Using Rubber Bumper and Restrainer on Mitigating Pounding and Unseating Damage of Bridge Structures Subjected to Spatially Varying Ground Motions[J]. Engineering Structures, 2014, 79: 195-210.
- [9] KHATIWADA S, CHOUW N, BUTTERWORTH J W. A Generic Structural Pounding Model Using Numerically Exact Displacement Proportional Damping [J]. Engineering Structures, 2014, 62-63: 33-41.
- [10] 黄勇,李瑞,朱文骏. 汶川地震中小半径曲线连续梁桥震害机理分析[J]. 地震工程与工程振动,2014,34(增):383-388.
HUANG Yong, LI Rui, ZHU Wen-jun. Analysis of Damage Mechanism of Small Radius Curve Continuous Beam Bridges During the Wenchuan Earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(S): 383-388.
- [11] 王阳春,徐秀丽,李雪红,等. 小半径匝道曲线梁桥地震响应分析[J]. 世界地震工程,2014,30(1):154-159.
WANG Yang-chun, XU Xiu-li, LI Xue-hong, et al. Seismic Response Analysis of a Small-radius Curved Girder Bridge [J]. World Earthquake Engineering, 2014, 30(1): 154-159.
- [12] 王军文,李建中,范立础. 非规则梁桥横桥向地震碰撞反应分析[J]. 振动与冲击,2010,29(6):25-30,233.
WANG Jun-wen, LI Jian-zhong, FAN Li-chu. Analysis on Pounding Effect of Irregular Girder Bridges Under Transverse Earthquake [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(6): 25-30, 233.
- [13] 徐略勤,李建中,吴陶晶. 碰撞效应对非规则梁桥横向地震反应的影响[J]. 振动与冲击,2011,30(4):95-99,123.
XU Lue-qin, LI Jian-zhong, WU Tao-jing. Influence of Pounding Effects on Transverse Seismic Response of a Nonstandard Girder Bridge [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(4): 95-99, 123.
- [14] 石岩,王军文,秦洪果,等. 桥梁横向地震碰撞响应研究进展[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2012,25(1):20-24.
SHI Yan, WANG Jun-wen, QIN Hong-guo, et al. Recent Development in Pounding Response of Bridges Under Transverse Earthquakes [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University: Natural Science, 2012, 25(1): 20-24.
- [15] 邓育林,彭天波,李建中. 地震作用下桥梁结构横向碰撞模型及参数分析[J]. 振动与冲击,2007,26(9):104-107,119,173-174.
DENG Yu-lin, PENG Tian-bo, LI Jian-zhong. Pounding Model of Bridge Structures and Parameter Analysis Under Transverse Earthquakes [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(9): 104-107, 119, 173-174.
- [16] 肖俊恒. 减振橡胶设计方法的研究[J]. 中国铁道科学,2001,22(6):111-116.
XIAO Jun-heng. Study on Engineering Design of Shock Absorption Rubber [J]. China Railway Science, 2001, 22(6): 111-116.
- [17] GB 50463—2008,隔振设计规范[S].
GB 50463—2008, Code for Design of Vibration Isolation [S].