

考虑碰撞效应曲线桥非线性响应及减隔震分析

李 进,刘松波,张娇磊,张淑齐

(西安建筑科技大学土木工程学院,陕西 西安 710055)

摘 要 目的 研究陕西省镇巴县一座人字形曲线桥,展开相关受力性能分析,为此类桥梁的抗震设计提供设计参考。方法 首先通过考虑桩-土相互作用,建立了精细化的人字形曲线桥有限元模型,并与振动台试验的位移响应验证;基于直接积分法输入多向地震动,对比分析曲线桥在有无考虑碰撞效应下主梁、墩顶与墩底的力学性能;最后通过安装黏滞阻尼器进一步研究该曲线桥的减隔震性能。结果 考虑碰撞效应,地震波输入方向为 150° 时碰撞力最大;随着伸缩缝宽度的增加,主梁间的碰撞力不断减小;主梁和墩顶受碰撞力影响位移皆明显减小,墩底内力则受碰撞力影响很小;黏滞阻尼器有效减小了桥梁的碰撞力与主梁位移,对提高人字形曲线桥的抗震性能有明显影响。结论 地震波输入方向与伸缩缝宽度对主梁间的碰撞力影响明显,且人字形曲线桥在碰撞作用下主梁与墩顶易发生破坏,可以安装黏滞阻尼器限制主梁与墩顶位移。

关键词 曲线桥;碰撞效应;时程分析法;黏滞阻尼器

中图分类号 TU997

文献标志码 A

Nonlinear Responses and Seismic Isolation Analysis of a Curved Bridge Considering Pounding Effect

LI Jin, LIU Songbo, ZHANG Jiaolei, ZHANG Shuqi

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, China, 710055)

Abstract: A herringbone curved bridge in Zhenba County, Shaanxi Province is studied, and the relevant mechanical performance analysis is carried out to provide reference for the seismic design of such bridges. Firstly, a refined finite element model of the herringbone curved bridge is established by considering the pile-soil interaction. It is verified by the displacement response of shaking table test. Multiple direction ground motion input is used based on direct integration method, the mechanical properties of main girder, pier top and pier bottom of curved bridge with or without considering pounding effect were compared and analyzed. Finally, the seismic isolation performance of the curved bridge is further studied by installing viscous dampers. The results show

收稿日期:2020-10-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51678474)

作者简介:李进(1965—),男,副教授,博士,主要从事桥梁结构工程方面研究。

that if considering the pounding effect, the pounding force is the largest when the input direction of seismic wave is 150° ; with the increase of the width of the expansion joint, the pounding force between the main girder decreases; the displacement of the main girder and pier top is significantly reduced by the pounding force, while the internal force of the pier bottom is little affected by the pounding force; the viscous damper can effectively reduce the pounding force and displacements of the girder, which has obvious influence on improving the seismic performance of the herringbone curved bridge. The direction of seismic wave input and the width of expansion joint have obvious influence on the pounding force between main beams. The main girder and pier top of herringbone curved bridge are easy to be damaged under the pounding, and viscous dampers can be installed to limit the displacement of girder and pier top.

Key words: curved bridge; pounding effect; time history analysis method; viscous dampers

近年来,国内外学者对桥梁碰撞问题展开了一系列研究^[1-5],但由于曲线桥梁的弯扭耦合效应,导致了其地震响应的复杂性,进而增加了地震作用下碰撞分析的难度。俱海蕾^[6]通过一座高墩曲线桥模型,采用时程分析法,在不同的墩高、曲率半径、伸缩缝间隙、临梁周期比等参数下,探究影响曲线桥碰撞响应的因素及规律。李正英等^[7]以双柱式桥墩曲线梁桥为研究对象,通过非线性动力时程方法分析,发现曲线梁桥在强震作用下瞬间产生很大的碰撞力,导致相邻构件损伤。王天利等^[8]以一座城市立交为研究对象,建立分叉桥模型进行时程分析,对比分析各分支梁桥的动力响应,发现分叉点处桥梁的地震位移增加,伸缩缝处碰撞、落梁震害概率加大。王强^[9]针对地震作用下曲线梁桥主梁与切向桥台和径向挡块碰撞的现象,以一座三跨预应力混凝土梁桥为例,分析曲线桥双向碰撞作用,发现下部结构明显增加,主梁转动现象变得复杂。

已有研究表明,目前针对于人字形立交桥在地震作用下碰撞效应的研究还比较少,基于此,笔者以实际工程为背景,选取陕西省镇巴县一座人字形立交桥为研究对象,建立动力计算模型。工程设计地震分组为第二组,地震设防烈度为 8 度,设计基本地震加速度值为 0.2 g ,场地为 II 类,通过考虑碰撞效应,进一步分析地震作用下人字桥抗震性能及地震响应。研究表明,在碰撞作用下,主梁

与墩顶的位移皆变小,而桥梁墩底的内力变化较小,碰撞作用下,主梁与墩顶易发生破坏。

1 工程背景及有限元模型

1.1 工程概况

笔者研究对象为陕西省镇巴县一座人字形立交桥,由主桥和两个匝道桥组成。选用其中人字桥分叉处的 3 联梁进行分析(见图 1)。

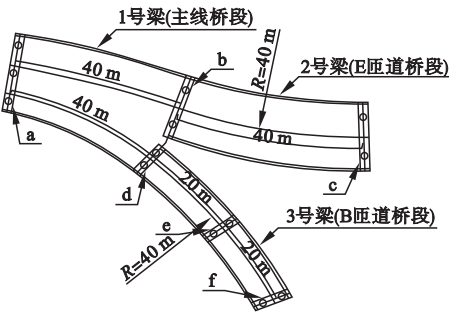


图 1 人字桥平面图

Fig. 1 Plan of herringbone bridge

其中 1 号桥为 40 m 主线桥,2 号桥为 40 m E 匝道桥,3 号桥为 20 m B 匝道桥;上下结构由固定支座和滑动支座共同连接,支座布置形式如图 2。上部结构为现浇预应力混凝土连续箱梁,采用 C50 混凝土,横截面见图 3。桥墩为柱式墩,墩柱、桥墩盖梁、桩基皆采用 C30 混凝土,桥梁下部结构截面见图 4。钢筋采用直径 16 mm 的 HRB400,预应力钢绞线采用抗拉强度标准值 $1\ 860\text{ MPa}$ 、

公称直径 16 mm 的低松弛高强度钢绞线。

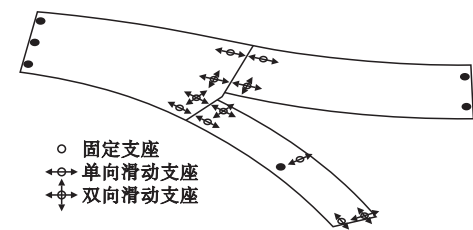
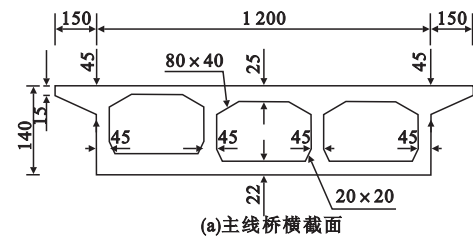
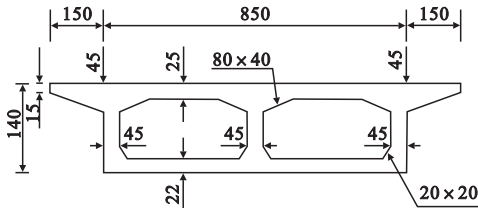


图2 人字桥支座布置图

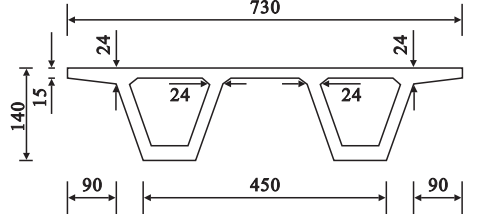
Fig. 2 Bearing arrangement of herringbone bridge



(a)主线桥横截面



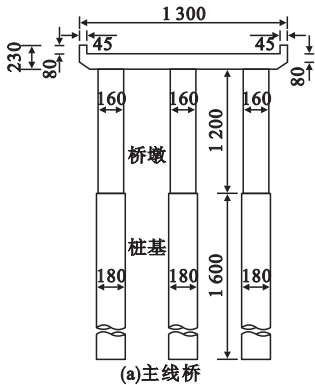
(b)E匝道横截面



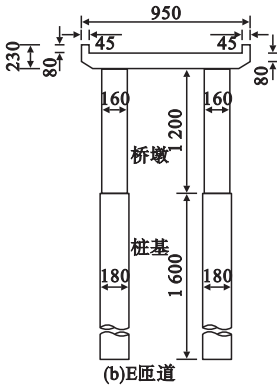
(c)B匝道横截面

图3 人字桥主梁横截面尺寸

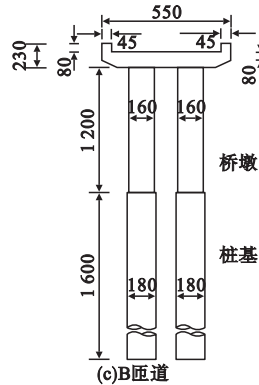
Fig. 3 Cross section dimension of herringbone bridge girder



(a)主线桥



(b)E匝道



(c)B匝道

图4 人字桥下部结构截面尺寸

Fig. 4 Section dimension of herringbone bridge substructure

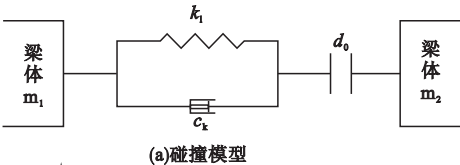
1.2 有限元模型

有限元模型中混凝土本构模型采用 Mander^[10-11]模型,该模型考虑了有效约束混凝土面积的相对大小、体积配箍率及箍筋屈服强度等因素对约束混凝土力学性能的影响,应用较广泛。钢筋本构模型采用 Menegotto-Pionto^[12]模型,该模型可以通过调整卸载和再加载之间圆弧过渡段的曲率,更好地考虑钢筋的包辛格效应。

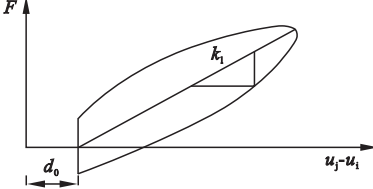
滑动支座采用一般连接中的“滞后系统”来模拟,竖直方向上的刚度采用一个数值较大的弹簧连接来模拟,通过参阅文献[13],刚度取值为 10⁹ kN/m。固定支座用刚性连接模拟。

选用 Kelvin 模型来模拟相邻桥梁间的

碰撞作用(见图5),考虑碰撞过程中的能量损耗,经 R. Jankowski^[14]等论证,单元的模拟效果比较理想。



(a)碰撞模型



(b)碰撞力与位移的关系

图5 Kelvin 碰撞模型

Fig. 5 Pounding model of Kelvin

为使碰撞模拟更加准确,采用李忠献等^[15]提出的计算 Kelvin 碰撞模型弹簧刚度与阻尼系数的方法,给出碰撞刚度取值为 $3 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5$ kN/m,碰撞恢复系数取值为 0.7~0.95。

墩底和桩基础采用固定连接,桩基础考虑桩土相互作用^[16-17],采用集中质量法模拟桩-土作用,采用“*m*”法确定土弹簧刚度系数,用土弹簧来模拟周围土体对桩的作用。

在 Midas FEA 软件中建立实体单元,而后再将实体单元用四面体网格进行划分,得到桥梁三维实体模型如图 6 所示。

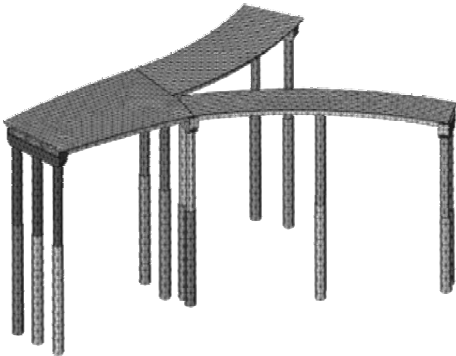


图 6 人字桥有限元模型

Fig. 6 Finite element model of herringbone bridge

2 人字桥地震响应分析

2.1 地震波选取与输入

该桥梁结构的基本周期为 1.089 s,因此,在地震动作用下进行桥梁动力分析时,地震加速度时程曲线的持续时间可统一为 12 s。根据计算地震波特征值周期的原则,选取的地震波信息见表 1。

表 1 地震波信息表

Table 1 Seismic wave information table

地震名称	加速度 峰值/g	地震波特 征周期/s	场地特 征周期/s
James RD.	0.478 4	0.395	0.4
El Centro			

罕遇地震的情况下,地震影响系数最大值为 0.9,根据文献^[18]对已选取的地震波

进行加速度峰值调整,调整后加速度峰值 0.523 g,调整后的地震波的加速度时程曲线如图 7 所示。

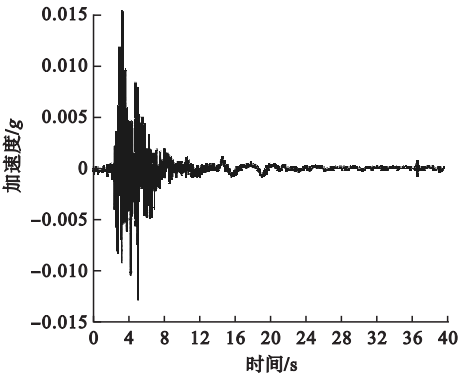


图 7 调整后的地震波

Fig. 7 Adjusted seismic wave

以主线桥的梁端为坐标原点,纵向为 *Y* 方向,横向为 *X* 方向,以地震波与 *X* 轴正方向的夹角作为地震波的输入方向,对桥梁结构在 4 种工况下分别进行时程分析。具体工况为工况 I:*X* 向地震作用;工况 II:*Y* 向地震作用;工况 III:双向地震作用;工况 IV:三向地震作用。

2.2 主梁位移计算结果

模型分别输入 4 种工况,主梁位移计算结果见表 2。由工况 I 和工况 II 可知,单向地震作用下,地震波输入方向对桥梁跨中位移有明显影响。桥梁跨中位移的方向与波的方向一致时,位移较大;桥梁跨中位移的方向与波的方向垂直时,位移较小。在工况 III 和工况 IV 作用下,桥梁结构各个梁的 *Y* 方向位移均大于 *X* 向位移,由此说明 *Y* 方向地震作用对该桥主梁位移的影响更强烈。通过对比工况 I、II 和工况 III、IV 可以看出,多向地震力作用下结构总体位移大于单向地震力作用下结构总体位移,该桥主梁位移受到多向地震力作用的影响大于单向地震力作用的影响。双向和三向地震作用产生的位移相差不大,因此,该结构可不考虑竖向地震力作用。

相邻主梁间的 *Y* 方向相对位移如图 8 所示。

表 2 主梁跨中峰值位移表

Table 2 Peak displacement table of main girder in midspan

m

工况	位置	X 向位移		Y 向位移	
		最小值	最大值	最小值	最大值
I	主线桥跨中	-0.127 5	0.109 7	-0.013 4	0.019 9
	E 匝道跨中	-0.158 8	0.137 4	-0.012 1	0.094 4
	B 匝道左跨中	-0.138 4	0.119 0	-0.012 9	0.012 8
	B 匝道右跨中	-0.116 0	0.095 4	-0.019 6	0.021 0
II	主线桥跨中	-0.006 7	0.071 2	-0.263 0	0.191 8
	E 匝道跨中	-0.019 1	0.020 3	-0.267 8	0.195 4
	B 匝道左跨中	-0.034 2	0.034 6	-0.230 4	0.168 7
	B 匝道右跨中	-0.101 7	0.092 2	-0.166 2	0.128 5
III	主线桥跨中	-0.133 0	0.117 5	-0.290 3	0.209 2
	E 匝道跨中	-0.168 8	0.146 5	-0.296 3	0.216 1
	B 匝道左跨中	-0.160 6	0.134 4	-0.253 2	0.178 5
	B 匝道右跨中	-0.174 6	0.137 0	-0.185 7	0.147 8
IV	主线桥跨中	-0.130 0	0.114 8	-0.283 5	0.205 6
	E 匝道跨中	-0.160 0	0.135 9	-0.289 2	0.212 9
	B 匝道左跨中	-0.156 0	0.119 8	-0.284 8	0.177 0
	B 匝道右跨中	-0.170 8	0.136 6	-0.181 5	0.144 8

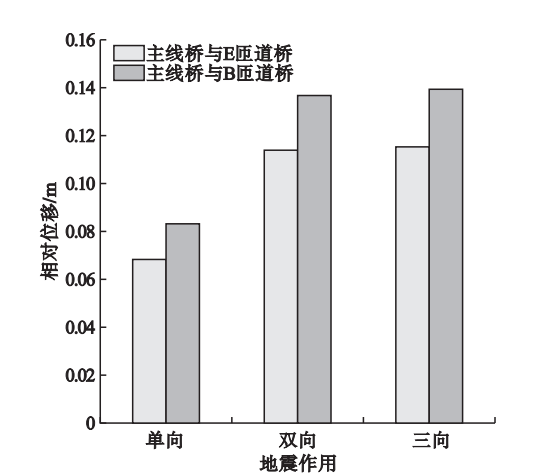


图 8 主梁相对位移

Fig. 8 Relative displacement of main girder

从图 8 中可以看出,相比于单向地震作用,双向和三向地震作用下相邻桥梁间的相对位移更大;在同一种地震作用下,主线桥与 B 匝道间的相对位移大于主线桥与 E 匝道间的相对位移。相比于 B 匝道,主线桥与 E 匝道在截面形式、几何外形、构件质量、边界条

件都更为相似,因此两者的动力特性相对来说较为接近,相对位移也较小。

2.3 有限元与试验位移响应对比验证

将上述结果与课题组前期展开的分叉形曲线桥振动台试验结果进行对比。振动台试验试件如图 9 所示^[19]。模型桥梁的构造、布置形式等与文中所建立的有限元模型基本相似,通过相关位移响应规律来验证有限元模型的正确性(见表 3)。



(a)曲线桥试件

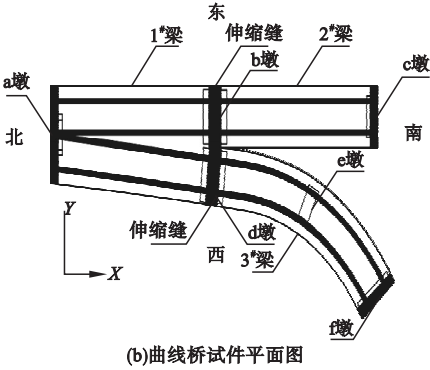


图 9 曲线桥振动台试验

Fig. 9 Shaking table test of curved bridge

表 3 主梁相对位移

Table 3 Relative displacement of main girder

梁	主梁相对位移/mm		
	工况 I	工况 II	工况 III
1 号梁与 2 号梁	10. 25	12. 97	13. 26
1 号梁与 3 号梁	5. 31	5. 64	6. 63

分析三种工况可知,三向地震作用下,主梁间的相对位移最大,双向地震作用次之,单向地震作用最小。在同种工况下,1 号梁与 2 号梁的相对位移大于 1 号梁与 3 号梁。

上述结论与图 8 有限元模型的主梁相对位移分析结果基本吻合,两者结构相对位移的变化规律基本一致,可认为笔者建立的有限元模型基本准确。

2.4 碰撞响应分析

在上述验证后的有限元模型中,进行碰撞响应分析。在主线桥和 E 匝道之间的伸缩缝处设置碰撞单元,一个在桥梁外侧,一个在桥梁内侧;同样在主线桥和 B 匝道之间设置两个碰撞单元。将地震波以横桥向输入对模型进行动力分析,得到 1~4 号单元处的最大碰撞力,结果见表 4。

表 4 碰撞力峰值

Table 4 Peak pounding forces

单元编号	最大碰撞力/kN	碰撞/次
1	1 660. 95	33
2	6 054. 46	49
3	4 484. 31	90
4	2 315. 28	76

通过表 4 可以看出,在地震作用下,桥梁发生碰撞作用时,同一伸缩缝处桥梁内侧受到的最大碰撞力与碰撞次数大于桥梁外侧。

2.5 碰撞效应影响因素

2.5.1 地震波作用方向对碰撞力的影响

确定地震波输入角度分别为 0°、30°、60°、90°、120°、150°和 180°七个分析工况,得出各个工况下的碰撞力峰值如图 10 所示。

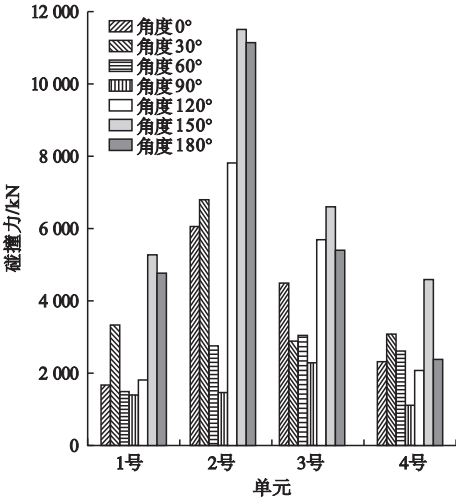


图 10 最大碰撞力随地震波作用方向变化图

Fig. 10 The maximum pounding forces varies with the seismic wave direction

从图 10 可以看出,在地震波输入角度为 90°时,每个碰撞单元的碰撞力皆为最小,可以反映出人字桥在纵向地震作用下,发生的碰撞次数最多。对每个单元来说,随着地震力输入角度的增加,1 号单元和 2 号单元碰撞力的变化趋势相同,90°时碰撞力最小,150°时碰撞力最大;3 号单元和 4 号单元的碰撞力同样在 90°时最小,150°时最大。因此在地震波输入角度为 150°时,该人字桥整体结构受到的碰撞力最大。

2.5.2 伸缩缝的宽度对碰撞力的影响

为了研究伸缩缝的宽度对碰撞力的影响,将桥梁模型伸缩缝调整为不同的宽度,分别选用 5 cm、8 cm、12 cm、15 cm、20 cm 和 30 cm 宽度的伸缩缝,桥梁其他参数保持不变,以最不利角度 150°方向输入,对结构进

行动力分析,得到最大碰撞力随伸缩缝宽度变化的结果如图 11 所示。

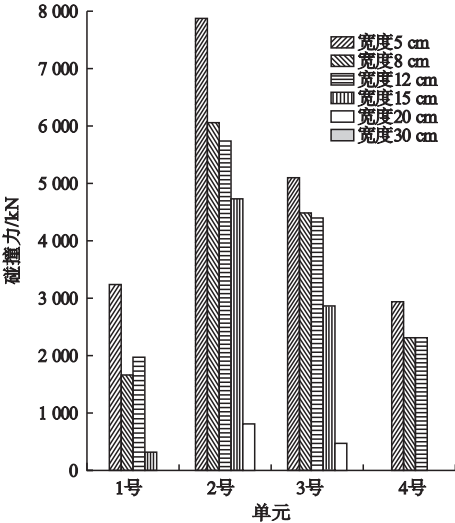


图 11 最大碰撞力随伸缩缝宽度变化图
Fig. 11 The maximum pounding forces varies with the width of expansion joint

从图 11 可以看出,随着伸缩缝宽度的增加,相邻主梁之间的碰撞力峰值不断减小,碰撞次数也随之减少,当增大到一定宽度时,将不再会发生碰撞。伸缩缝宽度相同时,2 号单元碰撞力大于 1 号单元,3 号单元碰撞力大于 4 号单元,且当伸缩缝宽度达到 15 cm 时,4 号单元不再发生碰撞,宽度达到 20 cm 时,1 号单元不再发生碰撞。主线桥和 E 匝道、主线桥和 B 匝道之间的相对位移均不超过 30 cm,因此当伸缩缝的宽度为 30 cm 时,主线桥和两个匝道桥均不发生碰撞。

2.6 碰撞对桥梁动力响应的影响

2.6.1 碰撞对桥梁位移的影响

分别对考虑碰撞效应和不考虑碰撞效应两种桥梁模型进行动力时程分析,得到在地震作用下的动力响应,只考虑伸缩缝的顺桥向的碰撞,因此只计算纵向位移,主梁在地震波作用下的纵向峰值位移结果如图 12 所示。从图 12 可以得出,主梁在碰撞效应下峰值位移减小,主线桥峰值位移减小了 18.5%,E 匝道桥峰值位移减小了 15.5%,B 匝道桥峰值位移减少了 62.3%。

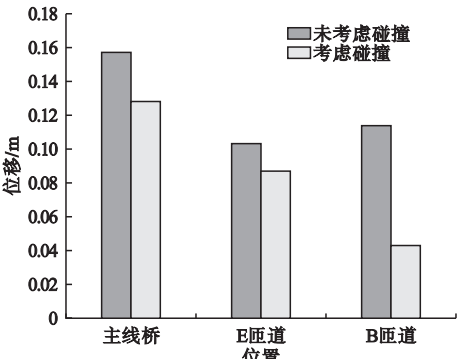


图 12 主梁位移

Fig. 12 Displacements of main girder

2.6.2 碰撞对墩顶位移的影响

地震作用下的各个桥墩顶的峰值位移如图 13 所示。从图 13 可以得出,在碰撞作用下墩顶位移峰值减小,a 墩位移峰值减小了 15.8%,b 墩位移峰值减小了 19.1%,c 墩位移峰值减小了 15.7%,d 墩位移峰值减小了 18.9%,e 墩位移峰值减小了 21.1%,f 墩位移峰值减小了 21.2%。

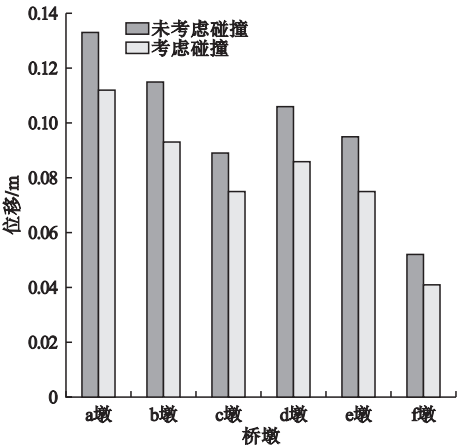


图 13 墩顶位移

Fig. 13 Displacements of pier top

2.6.3 碰撞对墩底内力的影响

地震作用下的各个墩底的内力响应如图 14 所示。从图 14 可以得出,碰撞对桥墩墩底的内力影响十分有限。a 墩剪力增加了 15.0%,弯矩增加了 12.5%,c 墩剪力增加了 11.3%,弯矩增加了 10.4%。因为 a 墩和 c 墩位置处布置的是固定支座,没有减隔震的能力,上部结构中产生的碰撞力大部分能传

递到桥墩,在碰撞作用下墩底剪力与弯矩皆

有所增加。

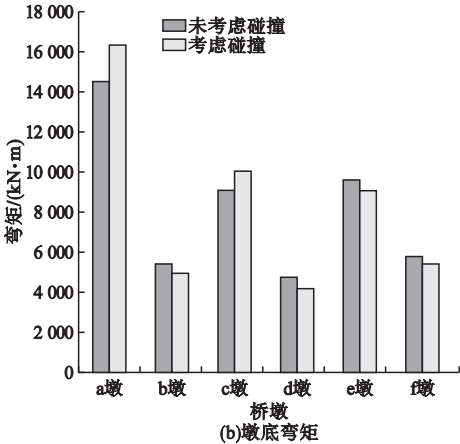
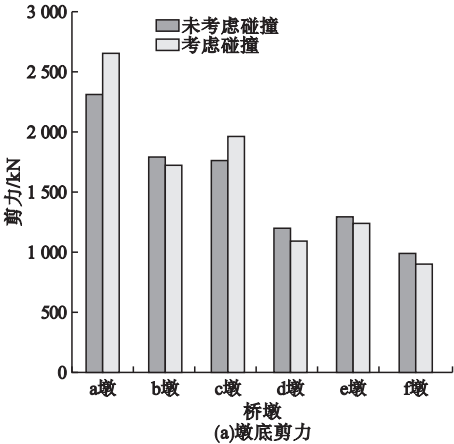


图 14 墩底剪力与弯矩

Fig. 14 Shear forces and bending moments of pier base

3 黏滞阻尼器减震效果

为进一步研究该曲线桥在阻尼器减隔震下的抗震性能,在主线桥和 E 匝道、主线桥和 B 匝道梁之间安装黏滞阻尼器^[20],其中阻尼器采用 Kelvin(Voigt)模型,进行动力时程分析。

3.1 桥梁碰撞力的影响

在碰撞模型的基础上,分别对安装黏滞阻尼器的桥梁模型和无阻尼的桥梁模型进行动力分析,提取伸缩缝间的最大碰撞力,结果如图 15 所示。

力。通过对其峰值的比较,1 号单元的最大碰撞力降低了 29.4% 左右,2 号单元的最大碰撞力降低了 59.6%,3 号单元的最大碰撞力降低了 37.2%,4 号单元最大碰撞力降低了 42.5%。

3.2 主梁位移的影响

黏滞阻尼器对主梁位移的减震效果如图 16 所示。

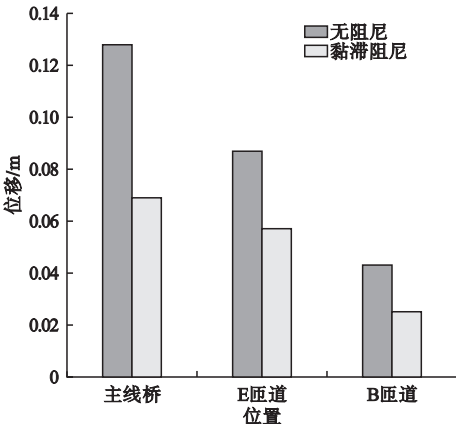
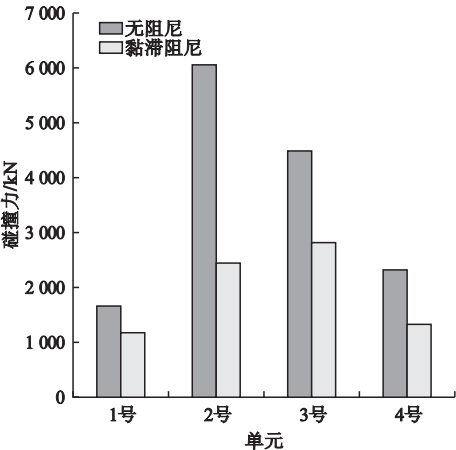


图 15 碰撞力峰值

图 16 主梁位移

Fig. 15 Peak pounding forces

Fig. 16 Displacements of main girder

从图 15 可知,黏滞阻尼器对于桥梁的碰撞作用有明显影响,降低了主梁受到的碰撞

从图 16 可以看出,黏滞阻尼器对主梁的位移具有限制作用,使得桥梁的位移减小,主线桥的位移下降了 46.1%,E 匝道的位移下降了 34.5%,B 匝道的位移下降了 41.9%。

3.3 墩底内力的影响

黏滞阻尼器对墩底内力的减震效果如图

17 所示。

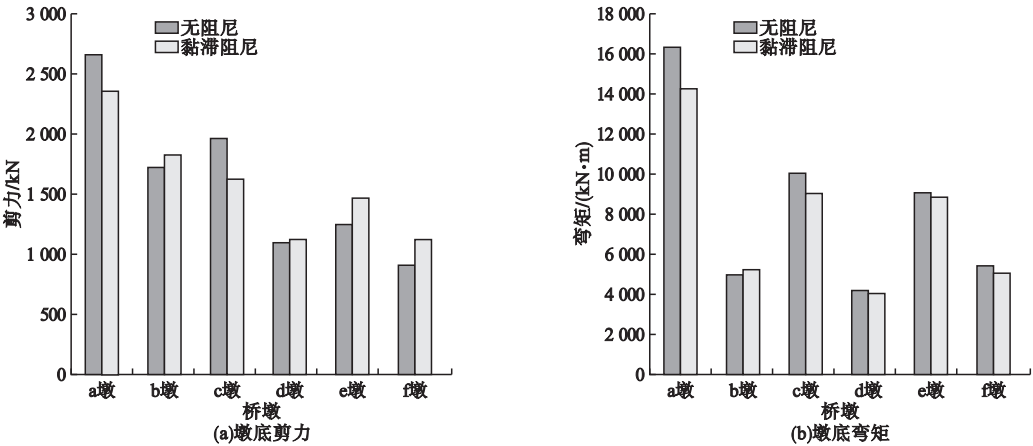


图 17 墩底剪力与弯矩

Fig. 17 Shear forces and bending moments at pier bottoms

从图 17(a)可以看出,由于 a 墩和 c 墩处布置了固定支座,在阻尼器作用下剪力值变小,其余墩处布置了活动支座,在阻尼器作用下剪力值变大。从图 17(b)可以看出,a 墩和 c 墩在阻尼器作用下弯矩略有减少,但黏滞阻尼器对其余桥墩墩底弯矩的影响并不明显。

4 结 论

(1)相邻主桥均发生碰撞,内侧位置处产生的最大碰撞力大于外侧,内侧位置的碰撞次数也多于外侧。说明在地震作用下,人字桥内侧易发生碰撞破坏,应当着重加强桥梁内侧配筋和相关构造措施。

(2)地震波的输入角度与伸缩缝宽度皆对桥梁产生的碰撞力有影响,地震波的输入角度为 150°时,桥梁产生的碰撞力远大于其他角度输入时的碰撞力;伸缩缝越宽,碰撞力就越小,当伸缩缝到达一定宽度时,就不再发生碰撞。因此进行桥梁抗震设计时,可以通过增大伸缩缝的宽度来减小地震带来的反应,但是宽度过大可能会影响行车舒适和安全,需要在合理的范围内增大。

(3)对比考虑碰撞效应与不考虑碰撞效应,得出碰撞对人字桥的影响规律:在碰撞作用下,主梁与墩顶的位移皆变小,桥梁墩底的

内力变化很小。

(4)在相邻桥梁间安装黏滞阻尼器可以有效减小主梁的位移、伸缩缝的碰撞力、墩底的剪力,但是对于墩底弯矩,黏滞阻尼器对其影响不大,因此可利用黏滞阻尼器降低桥梁的动力响应,缓解碰撞作用对桥梁造成的不利影响,提高人字桥的抗震性能。

参考文献

[1] LIN N, XU W B, CHEN Y J, et al. Experimental research on adjacent pounding effect of midspan curved bridge with longitudinal slope [J]. Engineering structures, 2019, 196: 1 – 16.

[2] ARNAB B, AVISHEK C, RAJ D. Seismic analysis of a curved bridge considering deck-abutment pounding interaction: an analytical investigation on the post-impact response [J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 2017, 46(2): 267 – 290.

[3] MOHSEN A, ANILK A. Rigid-body motion of horizontally curved bridges subjected to earthquake-induced pounding [J]. Journal of bridge engineering, 2016, 21(12): 1943 – 5592.

[4] 张海,殷华涛,方帅,等. 基于非线性有限元的桥墩防撞装置性能分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(6): 1103 – 1109. (ZHANG Hai, YIN Huatao, FANG Shuai, et al. Performance analysis of bridge pier protection device based on nonlinear finite element [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2011, 27(6): 1103 – 1109.)

[5] 嵯一,李忠献,王菲. 桥梁地震碰撞分析中不

- 同接触单元模型的对比分析[J]. 工程力学, 2014, 31(3): 11-17.
(ZHUO Yi, LI Zhongxian, WANG Fei. Comparative analysis of different contact element models in seismic pounding analysis of bridges [J]. Engineering mechanics, 2014, 31(3): 11-17.)
- [6] 俱海蕾. 强烈地震下高墩曲线桥的碰撞效应研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
(JU Hailei. Research on collision effect under the strong earthquake of curve viaduct [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.)
- [7] 李正英, 刘斌, 杨跃威. 强震作用下曲线连续梁桥碰撞响应分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(增刊1): 349-355.
(LI Zhengying, LIU Bin, YANG Yuewei. Seismic pounding analysis of curved continuous girder bridge under strong earthquake [J]. Journal of building structures, 2016, 37(S1): 349-355.)
- [8] 王天利, 李青宁. 城市立交中分叉曲线桥梁地震响应研究[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(3): 179-187.
(WANG Tianli, LI Qingning. Research on earthquake response of fork curved bridge in the city interchange [J]. Journal of natural disasters, 2018, 27(3): 179-187.)
- [9] 王强, 吴刚. 地震作用下曲线梁桥双向碰撞作用影响分析[J]. 世界地震工程, 2020, 36(2): 121-128.
(WANG Qiang, WU Gang. Analysis on the influence of bidirectional collision effect of curved bridges under seismic actions [J]. World earthquake engineering, 2020, 36(2): 121-128)
- [10] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of structural engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [11] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Observed Stress-strain behavior of confined concrete [J]. Journal of structural engineering, 1987, 114(8): 1827-1849.
- [12] 程米春, 刘华伟. 钢筋混凝土材料本构模型在ABAQUS纤维梁单元二次开发中的应用[J]. 建筑科学, 2015, 31(9): 93-97.
(CHENG Michun, LIU Huawei. Application of reinforced concrete material constitutive model based on the secondary development of ABAQUS fiber beam element [J]. Building science, 2015, 31(9): 93-97.)
- [13] 吴颖平. 地震作用下曲线连续梁桥动力性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
(WU Yingping. Analysis of dynamic performance of curved continuous girder bridge under seismic action [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.)
- [14] JANKOWSKI R. Non-linear viscoelastic modeling of earthquake-induced structure pounding [J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 2005, 34(6): 595-611.
- [15] 李忠献, 岳福青, 周莉. 地震时桥梁碰撞分析的等效 Kelvin 撞击模型[J]. 工程力学, 2008, 25(4): 128-133.
(LI Zhongxian, YUE Fuqing, ZHOU Li. Equivalent Kelvin impact model for pounding analysis of bridges during earthquake [J]. Engineering mechanics, 2008, 25(4): 128-133.)
- [16] 王凤霞, 何政, 欧进萍. 桩-土-结构动力相互作用的线弹性地震反应分析[J]. 世界地震工程, 2003, 19(2): 58-66.
(WANG Fengxia, HE Zheng, OU Jinping. The elastic seismic response analysis of pile-soil-structure interaction system [J]. World earthquake engineering, 2003, 19(2): 58-66.)
- [17] 李黎, 陈元坤, 杨金虎, 等. 桩-土-桥相互作用对隔震连续梁桥地震响应的影响[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(1): 50-56, 49.
(LI Li, CHEN Yuankun, YANG Jinhu, et al. Influences of soil-pile-structure interaction on seismic response of continuous bridge [J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2010, 32(1): 50-56, 49.)
- [18] 王亚勇. GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》和 GB 18306—2015《地震动参数区划图》反应谱对比及地震动峰值加速度应用研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(2): 1-6.
(WANG Yayong. Comparison of acceleration response spectra between GB 50011—2010 'Code for seismic design of buildings' and GB 18306—2015 'Seismic ground motion parameter zonation map of China' and studies on peak accelerations of earthquake [J]. Journal of building structures, 2020, 41(2): 1-6.)
- [19] 李青宁, 尹俊红, 闫磊, 等. 人字桥梁多维地震作用下振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(15): 103-108, 126.
(LI Qingning, YIN Junhong, YAN Lei, et al. Shaking table tests for a Y-shape bridge under multi-dimensional earthquake excitation [J]. Journal of vibration and shock, 2015, 34(15): 103-108, 126.)
- [20] 白伟. 曲线梁桥在地震作用下的碰撞反应分析[D]. 西安: 长安大学, 2015.
(BAI Wei. Analysis of the collision response of curved girder bridge under earthquake [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.)
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)