

文章编号: 1000-4750(2016)02-0074-07

连续梁桥锁死销减震机理及影响参数研究

陈士通^{1,2}, 张文学¹, 杜修力¹, 刘海陆¹

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 2. 石家庄铁道大学河北省交通应急保障工程技术研究中心, 石家庄 050043)

摘 要: 连续梁桥为满足温度荷载引起的变形需求, 一般只设一个固定墩, 这致使在地震作用下上部结构的纵向地震荷载只由固定墩承担, 这极易引起固定墩和伸缩缝破坏, 甚至造成引桥落梁。针对这一问题, 提出利用滑动墩的抗震潜能, 协同固定墩共同承受地震作用的思想, 研发了一种以地震动加速度激活的锁死销装置, 通过在墩梁间设置锁死销实现在地震时限制滑动墩和梁体的相对位移, 使滑动墩和固定墩协同受力, 减小结构的整体地震响应, 并以具体工程为例, 分析了锁死销的减震原理及其参数对减震效果的影响。研究表明, 在滑动墩上设置锁死销可以有效地减小固定墩和梁体的纵向地震响应, 明显提高连续梁桥的整体抗震性能; 其减震效果受锁死销加速度激活阈值和锁死间隙等参数影响较大。

关键词: 连续梁桥; 减震; 锁死销; 加速度阈值; 锁死间隙

中图分类号: U442.5; U441.3 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.07.0669

DAMPING MECHANISM AND EFFECT PARAMETERS ANALYSIS OF LOCKING DOWEL FOR CONTINUOUS BRIDGES

CHEN Shi-tong^{1,2}, ZHANG Wen-xue¹, DU Xiu-li¹, LIU Hai-lu¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Hebei Engineering Research Center for Traffic Emergency and Guarantee, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to meet the demand of temperature deformation, generally only one fixed-pier is set in a continuous bridge. As a result, unfortunately, all the longitudinal seismic loads are applied to one fixed pier, which may result in the damage of the fixed pier and the expansion joint, and even lead to a falling-off. For this reason, an acceleration activating locking dowel is developed. The device is designed to be installed between the piers and beams, which can prohibit the relative displacement between the sliding piers and the bridge once the earthquake occurs and help the piers to collaboratively bear the longitudinal seismic force, thus reduce the seismic response. Meanwhile, a case study of a practical project is conducted to illustrate the damping effect of the locking dowel and its influence factors. According to the research results, the locking dowel can significantly reduce the seismic actions on the fixed pier and the relatively displacement between the sliding piers and the bridge, and thus improve the seismic performance of a continuous bridge. Besides, the damping effect of the device is mainly determined by the acceleration activating threshold and locking clearance.

Key words: continuous bridge; reducing seismic response; locking dowel; acceleration activating thresholds; locking clearance

收稿日期: 2014-07-30; 修改日期: 2015-01-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51378034/E080505); 北京市自然科学基金面上项目(8122007)

通讯作者: 张文学(1975—), 男, 吉林人, 副教授, 博士, 主要从事桥梁抗震及体系优化研究(E-mail: zhw@bjut.edu.cn).

作者简介: 陈士通(1977—), 男, 河北人, 博士生, 主要从事桥梁抗震研究(E-mail: chst2011@emails.bjut.edu.cn);

杜修力(1962—), 男, 四川人, 教授, 博士, 博导, 主要从事重大工程结构抗震研究(E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn);

刘海陆(1988—), 男, 山东人, 硕士生, 主要从事桥梁抗震研究(E-mail: 505297655@qq.com).

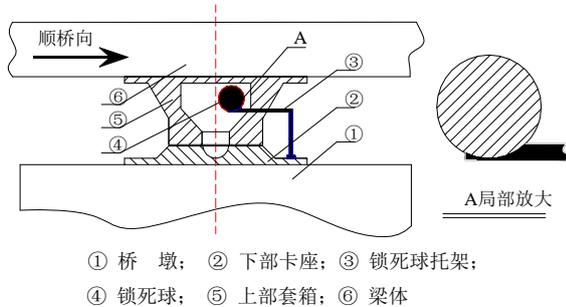
连续梁桥因其行车舒适、技术成熟、维护费用较低等优点，而被广泛采用。然而连续梁桥为满足温度荷载引起的变形需求，一般一联只设一个固定墩，这致使在地震作用下上部结构的纵向地震荷载只由固定墩承担，这不仅使固定墩的抗震能力难以满足地震需求，而且也使得连续梁桥纵向地震位移响应较大，极易引起伸缩缝和支座的破坏，甚至导致引桥落梁等严重的震害。为降低连续梁桥的震害，广大学者对延性设计或减隔震技术进行了较为深入系统的研究^[1-14]，开发研制了粘滞阻尼器、双曲面球型减隔震支座和拉索减震支座等装置，但以往的研究均没有使得滑动墩的抗震能力得到充分发挥。

基于连续梁桥的结构形式及地震响应特点，提出了一种构造简单、维护方便，以地震动加速度激活的锁死销减震技术，即在连续梁桥的滑动墩与梁体间安装锁死销装置。在正常运营状态，该装置不限制滑动墩与梁体的相对位移，地震时滑动墩墩顶加速度达到锁死销激活阈值后，锁死销将限制梁体和桥墩的相对位移，实现滑动墩与固定墩共同承受纵向地震荷载的目的。以七跨连续梁桥为例，分析了锁死销的减震机理和减震效果，同时研究了锁死销参数对减震效果的影响。

1 锁死销单元本构及分析模型

1.1 锁死销设计

锁死销是一种利用地震动加速度激活的锁死装置，主要由锁死球、锁死球托架、上部套箱和下部卡座构成，其材质均为钢材，上部套箱底部开孔半径与下部卡座球槽半径略大于锁死球半径，如图1所示。上部套箱和下部卡座分别与梁体和墩顶相连，锁死球托架刚性连接于下部卡座。



① 桥墩；② 下部卡座；③ 锁死球托架；
④ 锁死球；⑤ 上部套箱；⑥ 梁体

图1 锁死销结构

Fig.1 Configuration of locking dowel

正常状态下，锁死球位于托架弧面球槽内，与上部套箱内壁之间预留间隙，上部套箱与下部卡座

间无任何约束，从而保证连续梁桥在正常使用状态下满足墩梁之间的相对位移需求。地震突发时，当墩顶加速度达到锁死销激活阈值 a_k 时(可通过调整锁死球托架弧形槽切线与水平方向的角度进行调整)，锁死球从托架弧面球槽内滚动、脱落，卡入下部卡座球槽内，限制梁体与滑动墩之间的相对位移，促使滑动墩与固定墩共同承担地震引起的上部结构纵向地震作用，提供连续梁桥的整体抗震性能。

1.2 锁死销单元本构

根据锁死销的结构及工作原理，地震加速度锁死销的单元模型如图2所示。

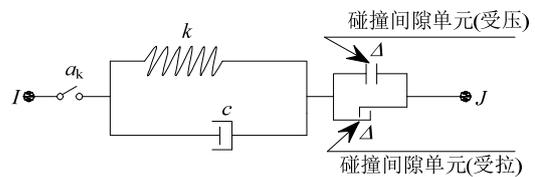


图2 力学模型

Fig.2 Dynamical model

图中： a_k 为加速度激活阈值； k 为连接刚度； c 为单元阻尼系数； Δ 为锁死间隙。

当墩顶加速度首次达到加速度激活阈值 a_k 之前，锁死销没被激活，滑动墩与梁体之间处于纵向自由滑动状态。当墩顶加速度首次达到加速度激活阈值时，锁死销被激活，锁死球卡入锁死销上部套箱和下部卡座的卡槽内；此时如果梁体与滑动墩之间的相对位移小于锁死销的间隙 Δ ，则锁死销仍然没发挥作用；只有梁体与滑动墩之间的相对位移欲大于锁死销的间隙 Δ 时，上部套箱、锁死球和下部卡座三者之间才发生碰撞，将梁体和滑动墩顶之间的相对位移控制在 Δ 范围内。为表述方便设：

$$a(t^*) = a_k \quad (1)$$

式中， $a(t^*)$ 为 t^* 时刻墩顶加速度， t^* 为墩顶加速度值首次达到加速度激活阈值 a_k 的时刻。根据锁死销工作原理得锁死销单元的本构方程如下：

$$F_{(t)} = \begin{cases} 0 ; & t < t^* \\ 0 ; & t \geq t^*, |d_i| < \Delta \\ k \cdot (|d_i| - \Delta) ; & t \geq t^*, |d_i| \geq \Delta \end{cases} \quad (2)$$

式中： d_i 为墩顶与梁体相对位移； Δ 为锁死间隙； k 为连接刚度。

碰撞过程中的能量损失由阻尼器模拟，其阻尼的大小与碰撞过程中的恢复系数 r 有关，根据相关研究结论阻尼器的阻尼系数 c 按式(3)计算^[15]，式中

m_{pi} 和 m_{bi} 分别为锁死销安装位置桥墩和对应梁体的质量。

$$c = \frac{-2 \ln r}{\sqrt{\pi^2 + (\ln r)^2}} \cdot \sqrt{k \left(\frac{m_{bi} \cdot m_{pi}}{m_{bi} + m_{pi}} \right)} \quad (3)$$

恢复系数 r 按式(4)计算^[16]:

$$r = \frac{v_{01} - v_{02}}{v_1} \quad (4)$$

式中: v_1 为锁死销安装位置桥墩撞向对应梁体的速度; v_{01} 和 v_{02} 为碰撞分离后锁死销安装位置桥墩和对应梁体的运动速度。

锁死单元的阻尼矩阵如下式:

$$C_e = \begin{cases} 0; & t < t^* \\ c \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}; & t \geq t^*, |d_i| \geq \Delta \end{cases} \quad (5)$$

2 锁死销减震效果及参数影响分析

以某大跨连续梁桥为例,对锁死销的减震效果及不同的加速度激活阈值和锁死间隙对减震效果的影响进行了分析,分析中没有考虑碰撞过程中的能力损失,即取 $c=0$ 。

2.1 某连续梁桥概况

某连续梁桥如图3所示,其跨径组合为 $62.5 \text{ m} + 5 \times 96 \text{ m} + 62.5 \text{ m}$,主梁重 36300 t ,桥墩高度为 20 m ,其纵向抗弯惯矩 30 m^4 ,截面面积 15 m^2 ,混凝土的弹性模量取 $3.45 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 。

原设计4号墩为固定墩,其它墩均设纵向滑动支座。采用 ANSYS 软件建模,梁、墩采用线性单元模拟,锁死销采用图2所示锁死销单元模拟,桥墩与地面固接处理。

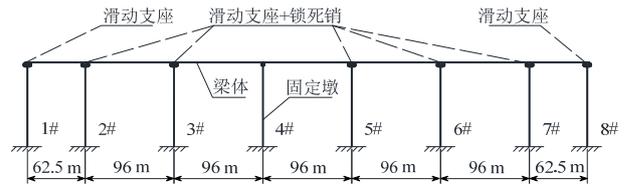


图3 某大跨连续梁桥计算简图

Fig.3 Calculating model of a large-span continuous bridge

2.2 减震效果分析

为对比分析锁死销的减震效果,建立两种分析模型:模型1为原桥设计模型,即4#桥墩与主梁铰接,其他桥墩上梁体可沿桥纵向自由滑动;模型2为设置加速度激活锁死销模型,即4#桥墩与主梁铰接,2#、3#、5#~7#梁墩间设加速度激活的锁死销。为方便分析锁死销利用各滑动墩能力储备的减震机理,本次分析中不考虑其弹性变形效应,取锁死销单元刚度 $k=2 \times 10^{11} \text{ kN/m}$,加速度激活阈值 $a_k=1 \text{ m/s}^2$,锁死间隙 $\Delta=0.005 \text{ m}$ 。

通过两种计算模型的对比分析来验证加速度激活的锁死销在地震动发生时对固定墩的减震效果。为便于说明,以固定墩墩底剪力、墩底弯矩和梁端位移减震率 λ 来表示减震效果。减震率定义为:

$$\lambda = \frac{R_{\max} - R_{c,\max}}{R_{\max}} \times 100\% \quad (6)$$

其中: R_{\max} 为模型1所得结构最大地震响应; $R_{c,\max}$ 为模型2所得结构最大地震响应。

地震动输入考虑 II 类场地的 El-Centro 波、TAR_TARZANA 波和 III 类场地的兰州波、CPC_TOPANGA 波,计算时,加速度最大峰值调整为 0.4 g 。计算结果如表1所示。

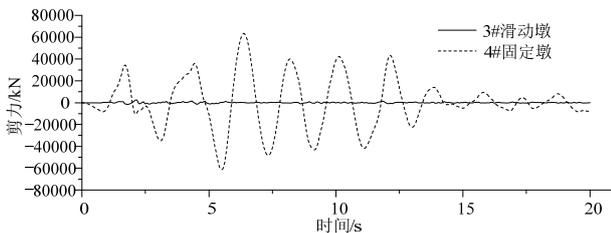
表1 减震效果分析

Table 1 Damping effect analysis

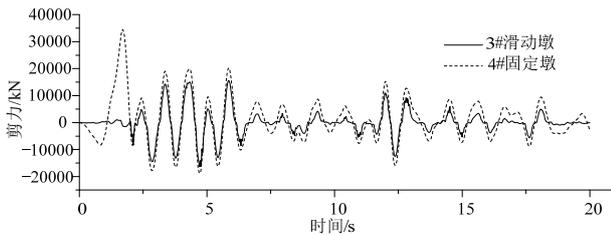
场地	地震波(代号)	工况	固定墩墩底内力响应		3#滑动墩墩底内力响应		固定墩/滑动墩		梁端位移/ m
			剪力/kN	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	弯矩/(kN·m)	
II 类	EL-CENTRO (A 波)	1	6.341×10^4	1.266×10^6	0.252×10^4	0.025×10^6	25.16	50.64	0.165
		2	3.449×10^4	0.698×10^6	1.634×10^4	0.330×10^6	2.11	2.12	0.092
		$\lambda(\%)$	45.6	44.9	-549.0	-1198.8	—	—	44.2
	TAR_TARZANA_90_nor (B 波)	1	2.688×10^4	0.542×10^6	0.176×10^4	0.018×10^6	15.27	30.11	0.070
		2	1.540×10^4	0.308×10^6	1.108×10^4	0.228×10^6	1.39	1.35	0.040
		$\lambda(\%)$	42.2	43.1	-529.9	-1140.7	—	—	43.3
III 类	LANZHOU2 (C 波)	1	2.926×10^4	0.590×10^6	0.131×10^4	0.014×10^6	22.34	42.14	0.077
		2	2.102×10^4	0.415×10^6	1.371×10^4	0.270×10^6	1.53	1.54	0.054
		$\lambda(\%)$	28.1	29.7	-943.2	-1859.0	—	—	28.9
	CPC_TOPANGA CANYON_16_nor (D 波)	1	10.377×10^4	2.078×10^6	0.254×10^4	0.026×10^6	40.85	79.92	0.272
		2	4.672×10^4	0.935×10^6	2.583×10^4	0.499×10^6	1.81	1.87	0.122
		$\lambda(\%)$	55.0	55.0	-916.9	-1837.3	—	—	55.0

由表 1 可知: 1) 工况 1, 即连续梁桥不设置锁死销模型, 固定墩墩底内力响应远大于滑动墩墩底内力响应, 其中弯矩比值为 30.11~79.92, 剪力比值为 15.27~40.85; 工况 2, 即连续梁桥设置锁死销模型, 固定墩墩底内力响应大幅度下降, 其值与滑动墩墩底内力响应接近, 弯矩和剪力比值为 1.35~2.12。2) 加设锁死销后, 对于 II 类场地, 在 A 波和 B 波激励作用下, 固定墩剪力、弯矩及梁端位移减震率分别为 45.6%(42.2%)、44.9%(43.1%)及 44.2%(43.3%), 平均减震率为 43.4%; 对于 III 类场地, 在 C 波和 D 波激励作用下固定墩剪力、弯矩及梁端位移减震率分别为 28.1%(55.0%)、29.7%(55.0%)及 28.9%(55.0%), 平均减震率为 42.0%。上述两类场地采用锁死销减震技术, 减震效果均非常明显。

为了进一步说明锁死销的作用机理, 对比列出 A 波作用时, 两种计算工况下 3#滑动墩和 4#固定墩的墩底剪力(图 4)和弯矩(图 5), 3#滑动墩顶及墩顶对应梁体节点位移(图 6)及梁端相对位移(图 7)的时程曲线。

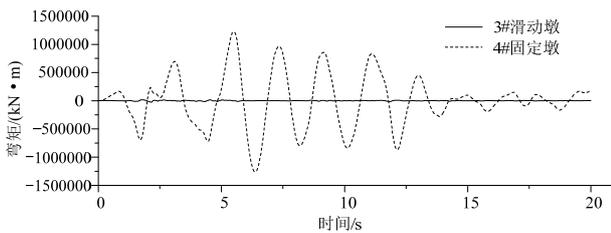


(a) 模型 1

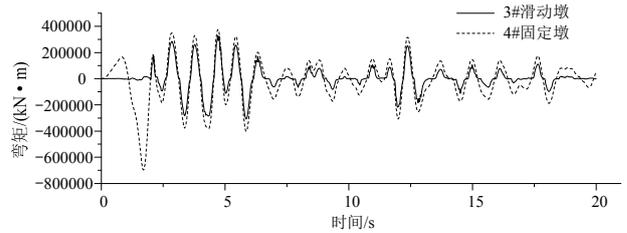


(b) 模型 2

图 4 剪力时程曲线
Fig.4 Shear time-history curves



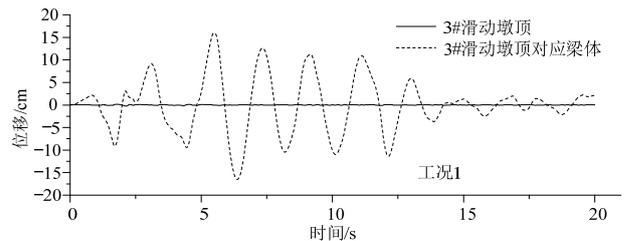
(a) 模型 1



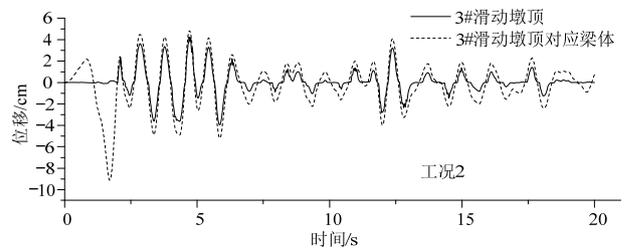
(b) 模型 2

图 5 弯矩时程曲线

Fig.5 Moment time-history curves



(a) 模型 1



(2) 模型 2

图 6 位移时程曲线

Fig.6 Displacement time-history curves

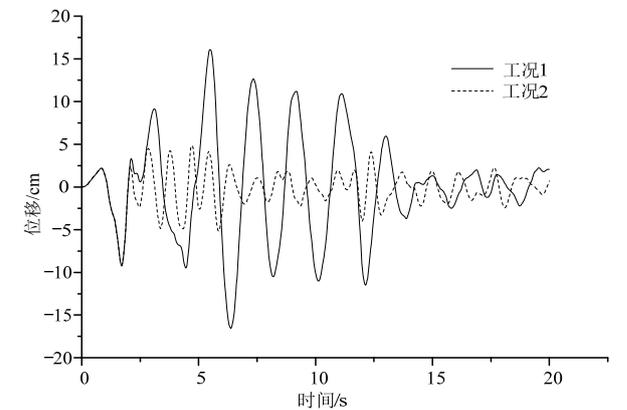


图 7 相对位移时程曲线

Fig.7 Relatively displacement time-history curves

由图 4~图 7 可知, 1) 原设计连续梁桥(模型 1) 在地震作用下, 纵向地震水平力完全由固定墩承受, 4#固定墩墩底地震响应远大于 3#滑动墩墩底地震响应, 3#滑动墩不承担梁体纵向地震水平力。2) 设置锁死销后, 随着地震动加速度的增大, 4#固定墩的地震响应逐渐增加, 约 2.4 s 左右滑动墩墩顶激

励加速度达到锁死销加速度激活阈值, 锁死销瞬间将滑动墩和梁体锁死, 纵向地震水平力由设置锁死销的滑动墩和固定墩共同承担, 固定墩墩底剪力、弯矩峰值大幅降低。3) 由于锁死销锁死间隙的存在, 滑动墩墩顶与对应梁体节点始终存在位移差, 其差值与预设锁死间隙接近。4) 锁死销激活后, 上部结构的纵向地震位移响应降幅约 50%, 这对保护伸缩缝和滑动支座、防止引桥落梁等均非常有利。

2.3 加速度激活阈值影响

锁死销加速度激活阈值 a_k 的取值决定着地震发生时锁死销被激活的条件, 即决定着滑动墩何时开始与固定墩共同分担纵向地震荷载, 因此有必要分析阈值的变化对减震效果的影响。取锁死销单元刚度 $k=2 \times 10^{11}$ kN/m, 锁死间隙 $\Delta=0.005$ m, 以表 1 所示的地震波为地震输入, 分析了加速度阈值 a_k 对锁死销减震效果的影响, 得到了固定墩剪力和弯矩的最大响应及梁端位移与加速度激活阈值的关系, 如图 8 所示。

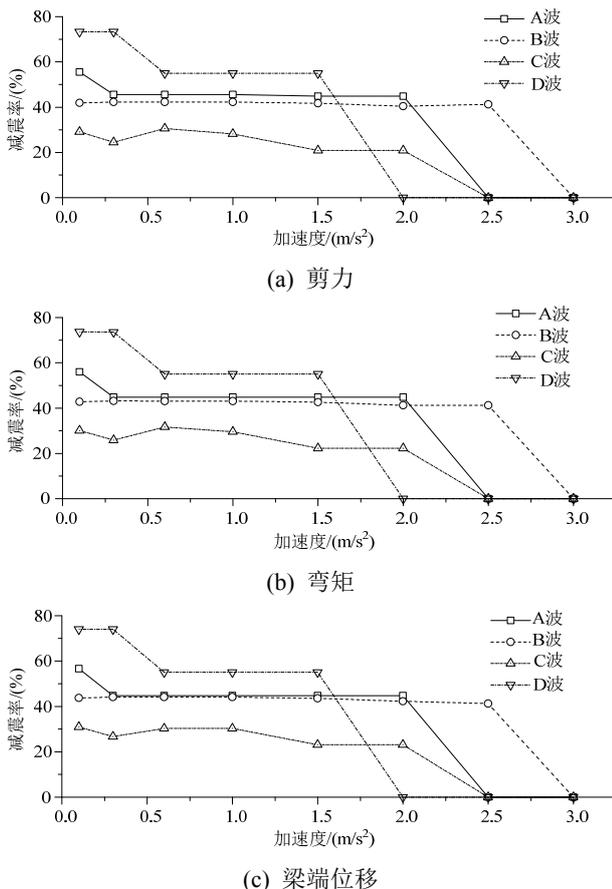


图 8 减震率与加速度激活阈值关系曲线

Fig.8 Relation curves between seismic ration and acceleration activating thresholds

分析图 8 可知: 1) 当锁死销加速度激活阈值较

低时, 地震动一发生, 锁死销即开始限制滑动墩和梁体相对纵向移动, 此时减震效果最好。2) 随着锁死销加速度激活阈值的增加, 其减震效果有所降低。当加速度激活阈值增大到一定值后, 开始出现在整个地震过程中锁死销一直未被激活现象, 即加速度激活阈值过大, 锁死销起不到减震效果。3) 不同地震波作用下, 尽管锁死销的加速度激活阈值相同, 但锁死销的减震效果却存在较大差异。其中 B 波作用下加速度激活阈值对减震效果的影响最不敏感, 而 D 波作用下加速度激活阈值对减震效果的影响最敏感。4) 当加速度激活阈值在 $0.6 \text{ m/s}^2 \sim 1.5 \text{ m/s}^2$ 范围内时锁死销的减震效果几乎不受加速度阈值的影响。因此本文所设计的锁死销减震装置具有较好的适应范围, 在具体设计时不必将加速度激活阈值取得过小。

2.4 锁死间隙影响

锁死间隙 Δ 的大小不仅对锁死销的减震效果有影响, 而且开孔过小可能导致地震过程中锁死球不能落入槽口内, 导致减震失败。

锁死间隙 Δ 对锁死销减震效果的影响如图 9 所示, 图中数值均为表 1 所示四种地震波作用下各响应减值率的平均值。

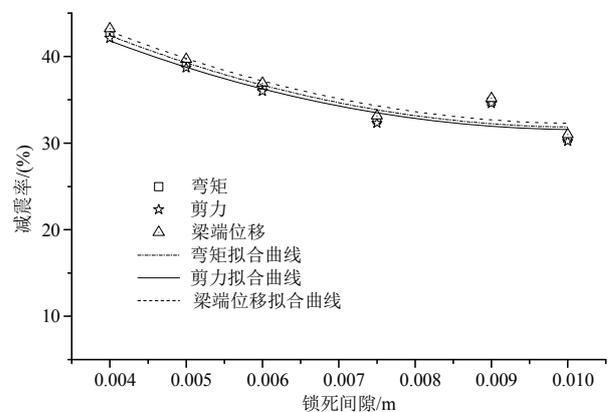


图 9 减震率与锁死间隙关系曲线

Fig.9 Relation curves between seismic ration and locking clearance

通过图 9 可知: 1) 锁死间隙对锁死销的减震效果有所影响, 随着锁死间隙的增大, 利用锁死销所取得的减震效果随之降低。2) 当锁死间隙 $\Delta=0.01$ m 时, 各项地震响应的减震率均在 30% 以上, 利用锁死销仍可以取得客观的减震效果。3) 连续梁桥利用锁死销进行减震设计时, 应在满足锁死球顺利进入球槽的前提下, 尽量减小锁死间隙, 从而获得更好的减震效果。

3 锁死销对滑动墩的影响分析

锁死销的激活改变了连续梁桥的结构体系,滑动墩与固定墩共同承担纵向地震水平力,滑动墩的受力状态如何需要研究。为此以 3#滑动墩为例进行分析。首先取 $a_k=1 \text{ m/s}^2$, $\Delta=0.005 \text{ m}$, 以表 1 中 A 波作为地震输入, 分析锁死销对滑动墩墩顶加速度的影响, 分析结果如图 10 所示。

由图 10 可知, 锁死销激活以前, 两种模型下墩顶加速度时程曲线完全重合; 但当锁死销激活后滑动墩墩顶加速度响应急剧增加。这主要是因为锁死销存在锁死间隙, 在地震过程中梁体和滑动墩之间发生碰撞所导致。

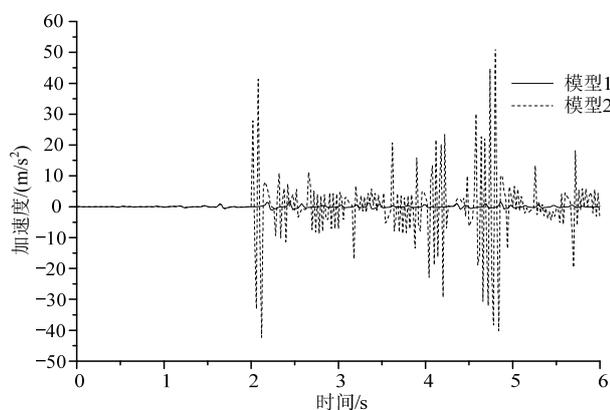


图 10 3#滑动墩加速度时程曲线

Fig.10 Acceleration time-history curves of the 3rd pier

为进一步研究锁死销减震过程中对滑动墩地震响应的影响, 仍以 3#滑动墩为例, 取 $a_k=1 \text{ m/s}^2$, 分析不同锁死间隙情况下滑动墩的地震响应。分析结果如图 11 和图 12 所示, 图中各值均为表 1 所列 4 条地震波作用下的平均值, 其中图 12 将每种地震波作用下取得的碰撞内力除以最大值进行了数据归一化处理。由此可知: 1) 采用锁死销对连续梁进行整体减震, 降低固定墩地震需求的同时, 使得各滑动墩的地震响应大幅增加, 其中滑动墩的弯矩响应增大幅度比剪力响应增大幅度更为明显; 2) 当锁死间隙较小时, 随着锁死间隙的增大滑动墩地震响应增大幅度随之增加, 当锁死间隙为 0.006 m 时, 达到极值; 而后随着间隙的变大, 滑动墩地震响应增大幅度开始逐渐变小。3) 地震过程中锁死销的碰撞力受锁死间隙影响较大, 随着锁死间隙的增大, 碰撞力表现为先震荡上升, 后震荡下降的总体趋势, 碰撞力极值出现条件因地震激励不同而有所不同。

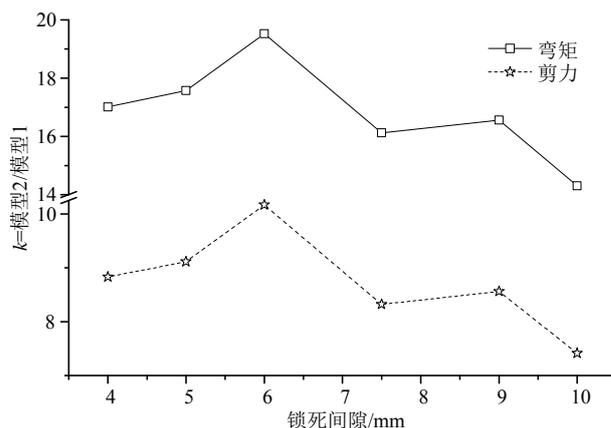


图 11 滑动墩地震响应与锁死间隙关系

Fig.11 Relation curves between sliding pier seismic response and locking clearance

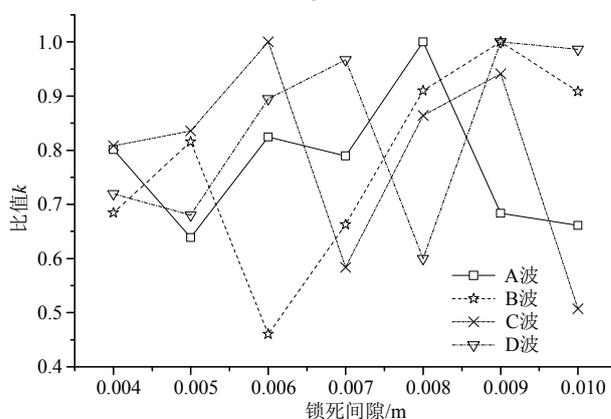


图 12 碰撞力与锁死间隙关系

Fig.12 Relation curves between collision force and locking clearance

4 结论

(1) 在连续梁桥各滑动墩设置加速度激活锁死销后, 可以有效降低固定墩的地震需求, 减小连续梁的纵向地震位移响应, 具有较好的减震效果。

(2) 锁死销加速度激活阈值对其减震效果有所影响, 但在一定范围内变化时, 对减震效果影响很小。因此进行具体工程设计时, 加速度激活阈值应在该区间内选取, 且不宜取的太小。

(3) 锁死间隙不仅对固定墩的地震内力和梁体纵向位移有较大影响, 而且对滑动墩的内力和锁死销的碰撞力均有影响。

(4) 采用锁死销对连续梁桥进行减震是在不改变桥梁整体设计的情况下, 充分利用了滑动墩的抗震潜力, 分担了固定墩的地震需求; 但与此同时也增加了滑动墩的地震需求, 设计时应予以重视。

参考文献:

- [1] 管仲国, 李建中, 范立础. 公路桥梁合理抗震设防理念研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(4): 99—104.
Guan Zhongguo, Li Jianzhong, Fan Lichu. Rational seismic fortification for highway bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(4): 99—104. (in Chinese)
- [2] 邓稳平, 王浩, 李爱群, 等. 高烈度区连续梁桥减震的粘滞阻尼器参数分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(16): 92—97.
Deng Wenping, Wang Hao, Li Aiqun, et al. Parametric analysis of viscous dampers for earthquake mitigation of continuous bridges in high intensity region [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(16): 92—97. (in Chinese)
- [3] 袁万城, 韦正华, 曹新建, 等. 拉索减震支座及桥梁抗震设计应用研究[J]. 工程力学, 2011, 28(增刊 2): 204—209.
Yuan Wancheng, Wei Zhenghua, Cao Xinjian, et al. Cable-sliding friction aseismic bearing and its application in bridge seismic design [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(Suppl 2): 204—209. (in Chinese)
- [4] Makris N, Chang S. Effect of viscous, viscoplastic and friction damping on the response of seismic isolated structures [J]. Earthquake Engng Struct Dynam, 2000, 29(1): 85—107.
- [5] Soneji B B, Jangid R S. Passive hybrid systems for earthquake protection of cable-stayed bridge [J]. Engng Struct, 2007, 29(1): 57—70.
- [6] Sarno L D, Chioccarelli E, Cosenza E. Seismic response analysis of an irregular base isolated building [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2011, 9(5): 1673—1702.
- [7] Eiji Takaoka, Yasuo Takenaka, Arinori Nimura. Shaking table test and analysis method on ultimate behavior of slender base-isolated structure supported by laminated rubber bearings [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2011, 40(5): 551—570.
- [8] 王克海, 李茜. 桥梁抗震的研究进展[J]. 工程力学, 2007, 24(增刊 2): 75—82.
Wang Kehai, Li Qian. Research progress on aseismic design of bridge [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(Suppl 2): 75—82. (in Chinese)
- [9] 宋子威, 蔡小培. 粘滞性阻尼器在高速铁路长联大跨连续梁中的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(8): 1102—1105.
Song Ziwei, Cai Xiaopei. Application of viscous damper devices in the seismic design of long span and long unit continuous girder bridges on high speed railway [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2012, 52(8): 1102—1105. (in Chinese)
- [10] 汤虎, 李建中. 地震动特性对公路桥梁板式橡胶支座滑动反应影响[J]. 工程力学, 2013, 30(10): 154—161.
Tang Hu, Li Jianzhong. Effect of ground motion characteristic on sliding response of elastomeric pad bearings in highway bridges [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(10): 154—161. (in Chinese)
- [11] 陈水生, 马涌泉. SRB 与 LRB 隔震连续梁桥地震响应对比研究[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(4): 358—363.
Chen Shuisheng, Ma Yongquan. A comparative study on seismic response of isolated continuous girder bridges with SRB and LRB [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(4): 358—363. (in Chinese)
- [12] Ozbulut O E, Hurlebaus S. Optimal design of superelastic-friction base isolators for seismic protection of highway bridges against near-field earthquakes [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 2010, 40(3): 273—291.
- [13] 朱宏平, 周方圆, 袁涌. 建筑隔震结构研究进展与分析[J]. 工程力学, 2014, 31(3): 1—10.
Zhu Hongping, Zhou Fangyuan, Yuan Yong. Development and analysis of the research on base isolation structures [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3): 1—10. (in Chinese)
- [14] 杨喜文, 李建中, 雷昕弋. 多孔大跨度连续梁桥减隔震技术应用研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(6): 58—65.
Yang Xiwen, Li Jianzhong, Lei Xinyi. Research on application of seismic isolation techniques to multiple and large-span continuous girder bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(6): 58—65. (in Chinese)
- [15] 王东升, 王国新, 冯启民. 桥梁结构地震响应邻梁碰撞分析等效刚体模型[J]. 工程力学, 2004, 21(4): 81—85.
Wang Dongsheng, Wang Guoxin, Feng Qimin. Equivalent rigidbody compact model of pounding between adjacent bridge girders during earthquakes [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(4): 81—85. (in Chinese)
- [16] 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. (in Chinese)