

不同阻尼器对连续梁桥横向抗震性能的影响

项长生,赵 竞

(兰州理工大学土木工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘要 目的 研究现有连续梁桥在横向地震作用下的抗震性能,对比分析在桥梁结构上安装不同阻尼器后对桥梁结构抗震性能的影响。方法 运用 OpenSees 软件建立三维模型,利用非线性时程分析法,以位移作为损伤指标,对一典型连续梁桥进行分析。结果 在地震作用下,不同的阻尼器对连续梁桥抗震性能的影响不同,设置阻尼器能够使桥墩与主梁之间的最大相对位移降低 89%~95%,且并不显著提升桥墩顶部的位移响应,能够有效提升桥梁结构的抗震性能。结论 将黏滞阻尼器的阻尼指数设置为 0.6,阻尼系数设置为 3 000(kN·s)/m;X 形钢阻尼器的屈服力设置为 15% N_d ,屈服位移设置为 0.05 m;摩擦阻尼器的摩擦力设置为 10% N_d 时,阻尼器能够发挥最优值。

关键词 板式橡胶支座;混凝土挡块;黏滞阻尼器;X 形钢阻尼器;摩擦阻尼器

中图分类号 TU997;U442.55 文献标志码 A

Influence of Different Dampers on Transverse Seismic Performance of Continuous Beam Bridges

XIANG Changsheng, ZHAO Jing

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, China, 730050)

Abstract: The purpose of this paper is to explore seismic performance of existing continuous girder bridges under transverse seismic action. The influence of different dampers on the seismic performance of the bridge structure is compared and analyzed. The OpenSees software was used to establish a 3D model, and nonlinear time history analysis was used to analyze a typical continuous girder bridge with displacement as damage index. The results show that under the action of earthquakes, different dampers have different effects on the seismic performance of continuous beam bridges. Setting dampers can reduce the maximum relative displacement between pier and main girder by 89% to 95%, and does not significantly improve the displacement response of the top of the bridge pier, which can effectively improve the seismic performance of the bridge structure. For the examples in this article, it is recommended to set the damping index of the viscous damper to 0.6 and the damping coefficient to 3 000(kN·s)/m; the yield force of the X-

收稿日期:2021-09-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51868045)

作者简介:项长生(1976—),男,副教授,主要从事桥梁结构健康监测、桥梁抗震等方面研究。

shaped steel damper to 15% normal pressure and the yield displacement to 0.05 m; the friction of the damper is set to 10% normal pressure. the damper is able to perform optimally.

Key words: laminated rubber bearing; concrete shear key; viscous damper; X-shaped steel dampers; friction damp

我国的现役公路桥梁大多为连续梁桥,此类桥梁的横向减隔震系统基本为板式橡胶支座与钢筋混凝土挡块组合,支座放置在盖梁或者桥墩上^[1],支座与下部结构通过螺栓连接,而主梁梁体直接放置在支座顶部,同时设置混凝土挡块作为主梁梁体的限位措施。此类桥梁的抗震性能在汶川地震中得到检验,其典型震害表现为主梁移位、支座及挡块破坏、桥墩损伤^[2-3]。

对连续梁桥在地震作用下的横向位移响应进行限制一直是研究热点^[4]。传统的方式为增加上部结构与下部结构之间的连接刚度,如增大挡块的刚度等,但增加连接刚度能够使得主梁的位移响应降低,却会使桥墩顶部的位移响应增加,导致桥墩出现损伤。因此需要寻找一种方法,能够让桥梁的抗震性能在墩梁相对位移与墩柱顶部位移之间取得平衡,在满足墩柱顶部极限位移需求的前提下尽可能降低墩梁相对位移。

笔者针对地震中桥梁易出现的震害,并结合阻尼器技术的发展,提出将阻尼器与橡胶支座、混凝土挡块三者组成新型减隔震体系,将三种常见类型的阻尼器(X形钢阻尼器、摩擦阻尼器、黏滞阻尼器)应用于连续梁桥横向抗震性能的研究中;并考虑墩柱的弹塑性、支座的摩擦滑移效应以及混凝土挡块的非线性,在主梁与下部结构之间设置不同的阻尼器,分析地震作用下挡块、支座、阻尼器组合体系下连续梁桥的受力特性,以探究阻尼器对连续梁桥横向抗震性能的影响;同时,对比了几种阻尼器对桥梁抗震性能的影响,试图为旧桥的加固或新建连续梁桥的设计提供一种新的思路;研究表明:对比原有体系,新型减隔震体系能有效提升桥梁的横向

抗震性能。

1 计算条件及数值模拟

1.1 实例背景

以一座典型的3跨连续梁桥为例(见图1)。其中,桥长90 m,单跨跨径30 m,主梁梁体为混凝土小箱梁。主梁及盖梁的混凝土标号均为C50,桥墩的混凝土标号为C40。主梁宽12 m;盖梁设置为1.4 m × 1.3 m的矩形截面;桥墩为高7.5 m,直径1.2 m的双柱式桥墩,桥墩钢筋选用16根Φ32 mm的HRB400钢筋,混凝土保护层厚度5 cm;盖梁处的每个小箱梁下方设置普通板式橡胶支座,两侧桥台处的每个小箱梁下方设置聚四氟乙烯滑板式橡胶支座,桥墩盖梁两端分别设置钢筋混凝土挡块。同时,将阻尼器设置在盖梁两端,通过箱梁与盖梁链接。

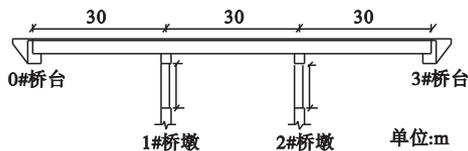


图1 桥型图

Fig. 1 Basic bridge prototype

1.2 地震波的选取

从太平洋地震工程研究中心的地面动数据库按Ⅲ类场地选取3条实际地震波记录,如表1所示。其中,PGA为峰值加速度。将这些地震波的峰值加速度统一调整为0.4 g。对3条地震波作用下的计算结果进行分析,按照《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01-2020)^[5]要求,取3组计算响应中的最大值。地震波只沿Y向(横桥向)输入。

表1 实际地震波

Table 1 Seismic waves

序号	地震名称	记录站点	震级	PGA/g
No. 1	Kern County	Taft Lincoln School	7.3	0.16
No. 2	Humbolt Bay	Ferndale City Hall	5.8	0.04
No. 3	San Fernando	Via Tejon PV	6.6	0.03

1.3 全桥有限元模拟

全桥采用 OpenSees 程序来构建全桥的三维分析模型,图2展示了全桥的简化计算模型。主要研究上部结构和下部结构之间的连接部位的性能,故简化对主梁与盖梁的模拟,采用线弹性梁-柱单元,通过将整根主梁的截面特征值输入到程序中对主梁加以模拟,同时,支座模拟也相应简化,将支座并联,简化为一个支座单元;桥墩由于考虑其塑性变形,故采用纤维单元进行模拟,桥墩混凝土采用 Concrete01(不考虑混凝土受拉),钢筋采用 steel02,基础部分固结。

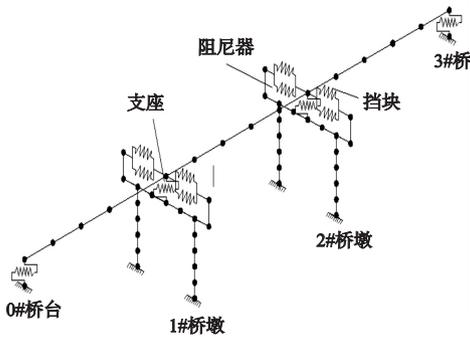


图2 OpenSees 全桥有限元模型

Fig. 2 The finite element model of the bridge with OpenSees

《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020)^[5]指出:支座发生位移时的临界滑动摩擦力 F_{cr} 与临界位移 u_e 可按照下式确定:

$$\begin{cases} K_e = \frac{G_d A_r}{\Sigma t}, \\ F_{cr} = N\mu, \\ u_e = \frac{F_{cr}}{K_e} = \frac{\mu N \Sigma t}{G_d A_r}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_{cr} 为临界滑动摩擦力; N 为支座的反力; μ 为支座的动摩擦系数; G_d 、 A_r 、 t 分别代表板式橡胶支座的动剪切模量、剪切面积、橡胶的厚度。支座初始刚度 K_e 与临界滑动位移 u_e 可根据式(1)确认。在 OpenSees 中采用平滑滑动支座单元,摩擦系数 μ 采用 Coulomb 摩擦假定,摩擦系数在滑动过程中不发生改变。建模时将聚四氟乙烯滑板式橡胶支座的摩擦系数设置为 0.03^[6],普通板式橡胶支座的摩擦系数设置为 0.1^[7]。

混凝土挡块在 OpenSees 软件中的模拟是通过将滞回材料与弹性单压材料赋予两节点连接单元来实现,表2给出了数值模拟时混凝土挡块的参数。

表2 挡块简化模型参数值

Table 2 The simplified model parameters of the shear key

节点	强度 F/kN	位移 Δ/mm	混凝土贡献值 V_c/kN	钢筋贡献值 V_s/kN
1	795	3.8	590	642
2	1 232	14.6	590	642
3	642	31.3	590	642
4	0	37.6	590	642

黏滞阻尼器^[8]采用 Maxwell 模型模拟,通过将黏滞阻尼材料赋予两节点连接单元,从抗震角度来看^[9]:阻尼指数 α ,取值范围为 0.2 ~ 1.0;阻尼系数 C 的取值范围为 1 000 ~ 5 000 (kN·s)/m。

X 形钢阻尼器的模拟通过将 OpenSees 中的 Steel01 材料赋予两节点连接单元,应变硬化率取 0.03^[10],X 形钢阻尼器的屈服强度 F_y ^[11] 为支座轴向压力 N_d 的 5%、10%、15%、20%、25%;屈服位移 X_y ^[11] 分别取 0.01 cm、0.02 cm、0.03 cm、0.04 cm、0.05 cm。

摩擦阻尼器的模拟是将理想弹塑性材料赋予两节点连接单元。摩擦阻尼器的摩擦力 F_d ^[11] 为支座竖向压力 N_d 的 5%、10%、15%、20%、25%。

2 桥墩和支座损伤指标的确定

2.1 桥墩损伤状态指标

国内外学者针对桥墩的损伤状态提出了多种损伤指标^[12-13]:应变指标、曲率延性、结构振动周期变化指数等。笔者以桥墩位移延性系数 μ_d 作为损伤指标,位移与延性系数的关系如下:

$$\mu_d = \frac{\Delta}{\Delta_{cy1}} \quad (2)$$

式中: Δ 为时程分析时,桥墩顶部的最大位移; Δ_{cy1} 为桥墩纵向钢筋首次屈服时,桥墩顶部位移。

桥墩损伤评价指标的划分标准如表3、表4所示。其中 μ_{cy1} 为桥墩纵向钢筋首次屈服时的位移延性比; μ_{cy} 为等效屈服时的位移延性比; μ_{cy2} 为桥墩截面边缘混凝土压应变为0.002时的位移延性比; μ_{cmax} 为破坏位移延性比,可由 $\mu_{cmax} = \mu_{cy2} + 3$ 获得。随着桥墩损伤状态的加重,桥梁的性能逐渐降低,维修难度亦随之增大,当损伤状态处于严重损伤状态时,修复困难。因此,文中实例以中等损伤与严重损伤的临界位移作为桥墩的极限位移,在桥墩出现难以修复的损伤之前,尽可能降低墩梁相对位移。

表3 桥墩损伤指标划分

Table 3 The damage index of the bridge piers

损伤状态	性能状态	损伤准则
无损伤	钢筋处于弹性,混凝土受力良好	$\mu_d < \mu_{cy1}$
轻微损伤	受拉钢筋屈服,混凝土轻微开裂,维修简单	$\mu_{cy1} \leq \mu_d < \mu_{cy}$
中等损伤	表面裂缝开展保护层剥落,可维修	$\mu_{cy} \leq \mu_d < \mu_{cy2}$
严重损伤	塑性铰完全发展,强度发生退化,修复困难	$\mu_{cy2} \leq \mu_d < \mu_{cmax}$
完全破坏	钢筋完全屈服,混凝土土压溃,不可修复	$\mu_{cmax} < \mu_d$

表4 桥墩损伤指标与关键点参数值

Table 4 The damage index and key point parameters of the piers

损伤指标	桥墩顶部位移/m	位移延性系数
μ_{cy1}	0.030	1.0
μ_{cy}	0.038	1.27
μ_{cy2}	0.079	2.6
μ_{cmax}	0.168	5.6

2.2 板式橡胶支座损伤状态评价指标

板式橡胶支座位移(即主梁与下部结构之间的相对位移),反映的是主梁相对于下部结构两者之间的位移水平,是评价桥梁损伤程度的重要参量。文献[14]指出支座的损伤程度与其最大位移密切相关(见表5)。笔者以支座的最大位移 u_B 为损伤指标, u_c 为支座临界滑动位移值, u_1 为箱梁底部内边缘到支座内边缘的间隔距离, u_2 为箱梁底部内边缘到支座中心的间隔距离, u_3 为箱梁底部内边缘到支座外边缘的间隔距离, u_4 为箱梁底部至盖梁边缘的间隔距离。表6给出了文中实例支座损伤指标关键点参数值。

表5 支座损伤指标划分

Table 5 The damage index of bearing

损伤程度	性能状态	损伤准则
无损伤	支座线弹性,主梁与盖梁未发生相对滑动	$u_B \leq u_c$
轻微损伤	支座滑动,支座始终与主梁底部接触	$u_c < u_B \leq u_1$
中等损伤	支座轻微脱空,但大部分仍与主梁底部接触	$u_1 < u_B \leq u_2$
严重损伤	支座半脱空,支座与梁体接触面积小于支座面积的一半	$u_2 < u_B \leq u_3$
支座落座	支座完全脱空,主梁从支座上滑落,濒临落梁	$u_3 < u_B \leq u_4$
落梁	支座位移超过盖梁的搭接长度,发生横向落梁	$u_4 \leq u_B$

表6 支座各损伤指标关键点位移
Table 6 Key displacement index of bearing damage

u_c	u_1	u_2	u_3	u_4
0.033	0.180	0.430	0.680	1.100

3 参数敏感性分析

3.1 黏滞阻尼器参数分析

阻尼系数 C 与阻尼指数 α 为影响黏滞阻尼器减震效果的重要参数。对模型输入上文所选的3条天然地震波进行分析,结构的位移响应结果如图3所示。

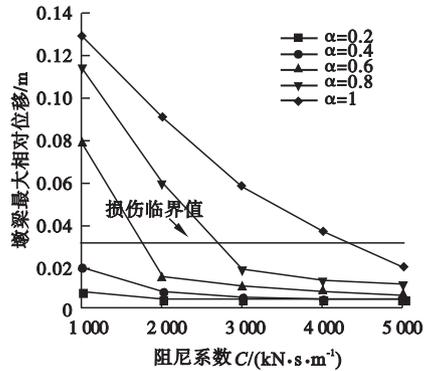
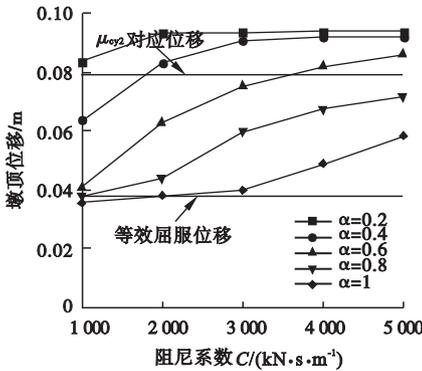


图3 黏滞阻尼器结构的位移响应

Fig. 3 Displacement response of viscous dampers

由图3可知,在阻尼指数 α 不变时,增大阻尼系数 C ,会导致桥墩顶部的位移需求增加(桥墩损伤加重),墩梁之间的最大相对位移减小(支座损伤减轻);在阻尼系数 C 不变时,增大阻尼指数 α 会导致桥墩顶部的位移需求降低(桥墩损伤减轻),墩梁之间的最大相对位移增大(支座损伤加重)。针对文中

实例,将阻尼指数 α 设置为 0.6,阻尼系数 C 设置为 3 000 (kN·s)/m 时,能够使墩顶最大位移满足极限位移要求的前提下,尽可能降低墩梁之间的最大相对位移。图4给出了No.3地震波作用下,使用黏滞阻尼器时耗能装置的力与位移的关系。

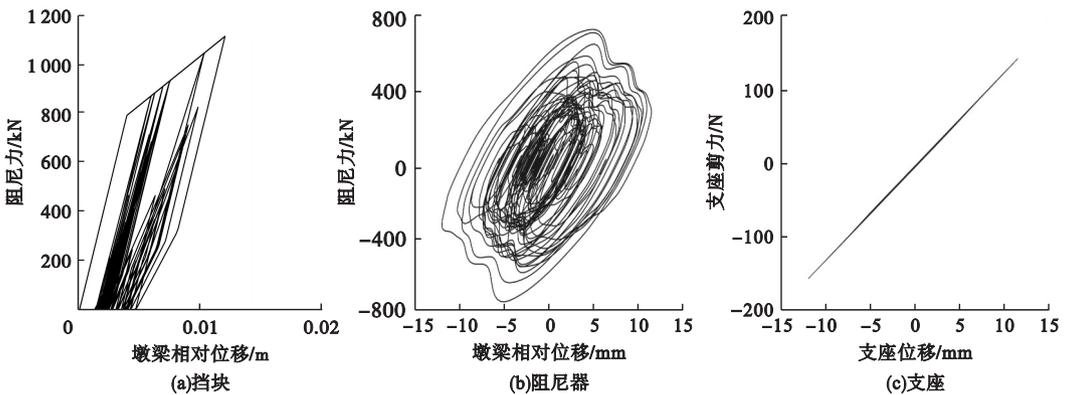


图4 耗能装置的力与位移关系(黏滞阻尼器)

Fig. 4 The relation between force and displacement of energy dissipation device(viscous dampers)

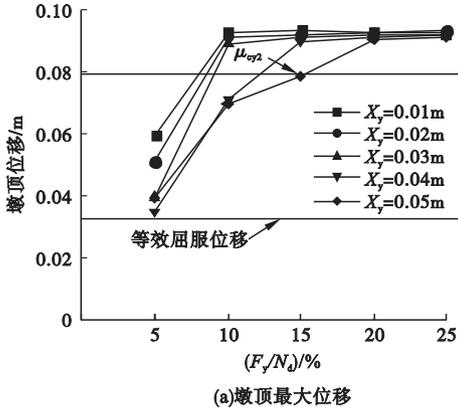
由图4可知,两侧的混凝土挡块发挥了较好的耗能能力,墩梁之间的最大相对位移未超过挡块的位移极限值,此时挡块还保留部分功

能;阻尼器的位移曲线较为饱满,能够有效地消耗地震作用下产生的能量;板式橡胶支座的位移曲线为线弹性,这是因为在地震作用下支

座的位移较小未达到支座的临界滑动位移值, 支座处于弹性状态, 未发生损伤。

3.2 X 形钢阻尼器参数分析

X 形钢阻尼器的屈服强度 F_y 与屈服位



移 X_y 对阻尼器的减震性能影响很大, 图 5 给出了在所选的 3 条地震波输入下, 结构的位移响应结果。 N_d 为板式橡胶支座所承受的轴向压力。

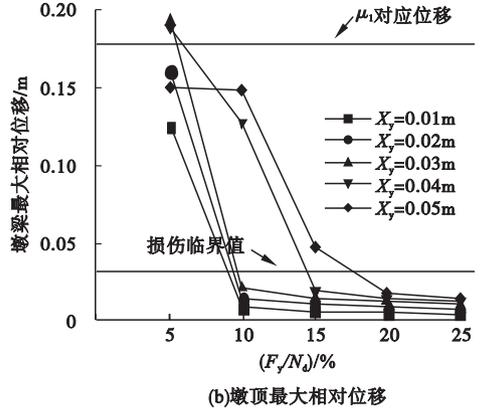


图 5 X 形钢阻尼器结构的位移响应

Fig. 5 Displacement response of X-shaped steel dampers

由图 5 可知, 当屈服位移一定时, 随着屈服力的增大, 墩顶的位移需求呈上升趋势 (桥墩损伤加重), 桥墩与主梁之间的最大相对位移则呈下降趋势 (支座损伤减轻); 当屈服力一定时, 随着屈服位移的增加, 墩顶的位移需求呈下降趋势 (桥墩损伤减轻), 墩梁之间的最大相对位移呈上升趋势 (支座损伤加重)。这是由于确定屈服强度与屈服力后, 随着屈服刚度的增加, 上部结构与下部结构的链接强度亦随之增大, 随着屈服刚度愈来愈大, 上部结构与下部结构之间, 近似于刚性

连接, 墩梁之间的相对位移趋向于 0, 又因为未达到屈服强度, 导致结构的位移响应不随屈服力的变化而变化。为了避免桥墩顶部的位移需求过大, 并能够有效降低墩梁之间的相对位移, 当将文中实例的 X 形钢阻尼器的屈服力设置为 $15\% N_d$, 屈服位移设置为 0.05 m , 此时支座发生滑动, 虽然出现轻微损伤, 但在满足桥墩极限位移的前提下, 尽可能降低了支座的损伤程度。图 6 给出了在 No.3 地震波作用下, 使用 X 形钢阻尼器时耗能装置的力与位移的关系。

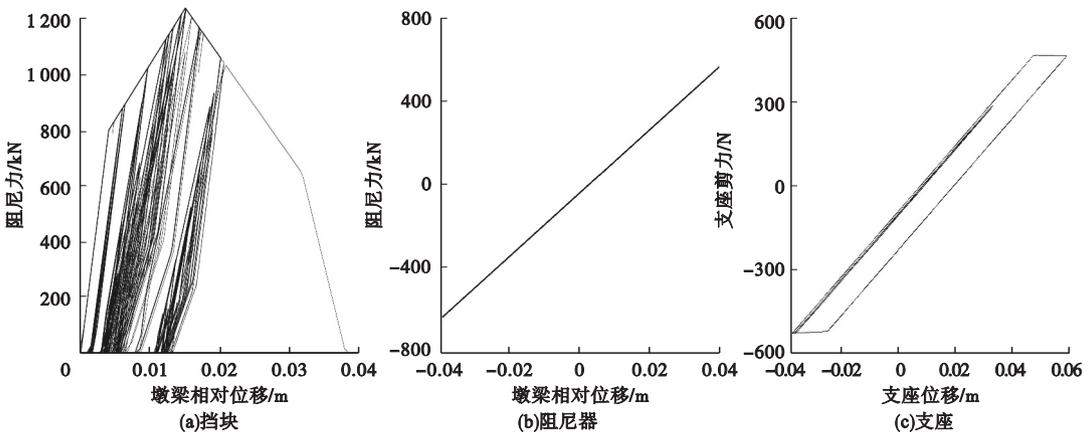


图 6 耗能装置的力与位移关系 (X 形钢阻尼器)

Fig. 6 The relation between force and displacement of energy dissipation device (X-shaped steel dampers)

由图6可知,混凝土挡块发挥了较好的耗能能力,墩梁之间的最大相对位移超过挡块的位移极限值,此时挡块完全破坏;此工况下X形钢阻尼器的位移为0.04 m左右,未达到屈服位移值,X形阻尼器未发生屈服,保持线弹性;板式橡胶支座的位移大于临界滑动位移值,支座发生滑移,导致轻微损伤。

3.3 摩擦阻尼器参数分析

摩擦阻尼器的摩擦力 F_d 对阻尼器的减震性能影响很大,不同的屈服刚度会导致结构的位移需求有很大的差别。图7给出了在所选的3条地震波输入下,结构的位移响应。 N_d 为板式支座所承受的轴向压力。

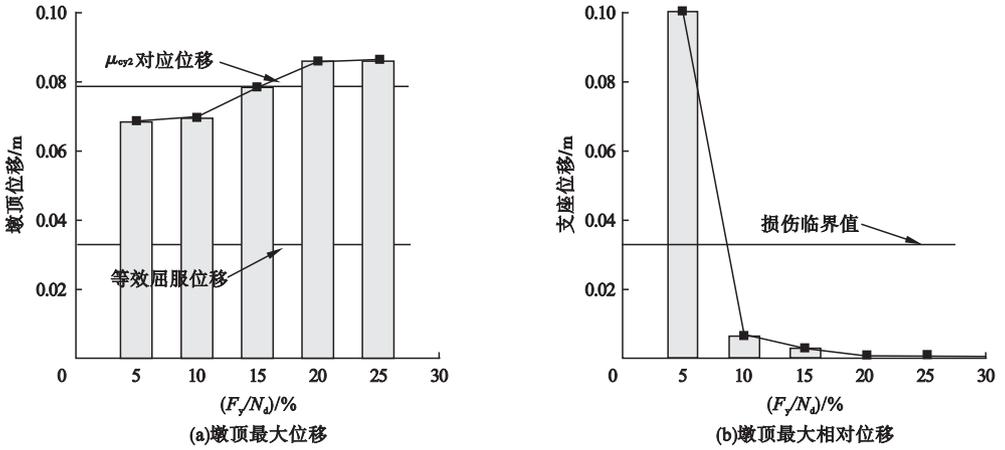


图7 摩擦阻尼器结构的位移响应

Fig. 7 Displacement response of friction dampers

由图7可知,随着摩擦阻尼器摩擦力的增大,墩顶的位移需求逐渐增加(桥墩损伤加重),墩梁最大相对位移逐渐减小(支座损伤减轻)。当摩擦阻尼器的摩擦力在 $10\% N_d \sim 20\% N_d$ 时,墩顶位移响应的增幅较大;当摩擦阻尼器的屈服力在 $5\% N_d \sim 15\% N_d$ 时墩梁之间的最大相对位移降幅较大。依据文中实例,当摩擦阻尼器的摩擦力 $10\% N_d$ 增加到 $15\% N_d$ 时,墩顶最大位移超过极

限值,导致桥墩出现难以修复的损伤,因此将摩擦阻尼器的摩擦力设置为 $10\% N_d$ 为宜,图8给出了在 No.3 地震波作用下,使用摩擦阻尼器时耗能装置的力与位移的关系。

由图8可知,混凝土挡块未充分发挥其耗能能力,依旧保留其大部分功能;摩擦阻尼器发挥了较好的滞回性能;支座的位移未到达支座的临界滑动位移值,处于弹性状态。

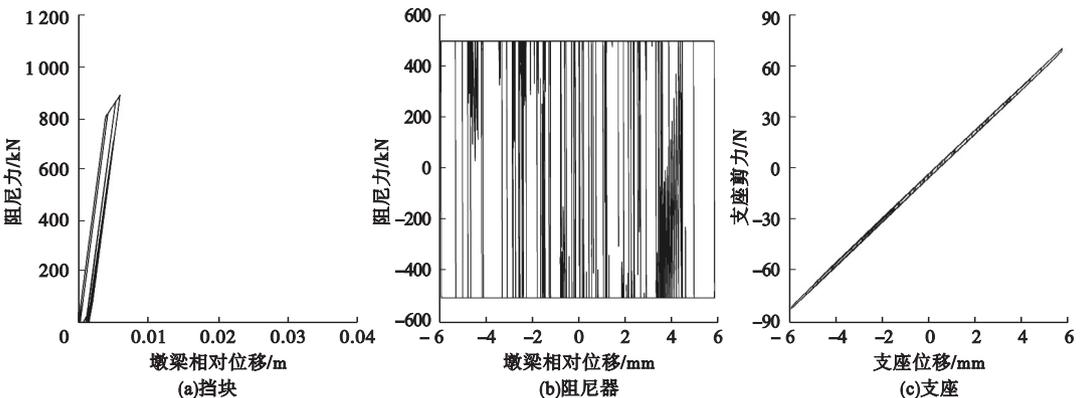


图8 耗能装置力与位移的关系(摩擦阻尼器)

Fig. 8 Relation between force and displacement of energy dissipation device(friction dampers)

4 对比分析

为探究不同阻尼器对于连续梁桥抗震性能的影响,进一步分析使用不同阻尼器与原有结构响应对比,图9给出了在No.3地震

波作用下,结构的位移响应对比值。其中,X形钢阻尼器的屈服强度为 $15\%N_d$,屈服位移为 0.05 m ;摩擦阻尼器的屈服强度为 $10\%N_d$;黏滞阻尼器的阻尼系数 C 为 $3\ 000(\text{kN}\cdot\text{s})/\text{m}$,阻尼指数 α 为 0.6 。

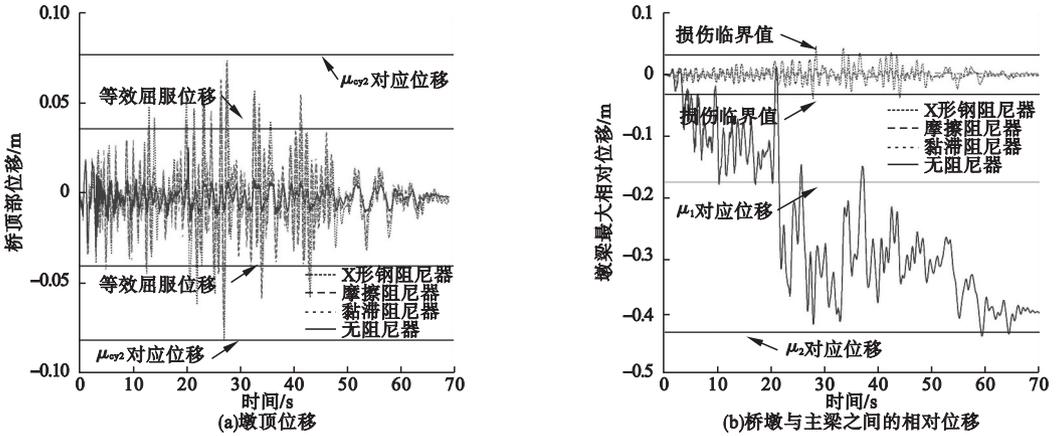


图9 结构位移响应对比

Fig. 9 The comparison results of structure displacement responses

由图9可知,对于传统无阻尼器工况,地震作用下,桥墩的损伤状态较轻,但传统支座与挡块限位体系未能有效约束墩梁之间的相对位移,导致主梁相对于桥墩的位移过大,使主梁落梁的风险大大增加,与汶川地震中桥梁实际典型震害现象吻合。由图9(a)可知,在设置阻尼器后会导致主梁与下部结构之间的连接刚度增大,使得桥墩顶部的最大位移增加,X形钢阻尼、摩擦阻尼器、黏滞阻尼器的增幅分别约为64%、59%、63%。由图9(b)可知,在地震作用下原有的桥梁结构体系未能有效约束墩梁之间的相对位移,导致主梁与下部结构之间的相对位移过大,但在设置了阻尼器后墩梁之间的最大相对位移得到有效约束。X形钢阻尼、摩擦阻尼器、黏滞阻尼器分别能够将阻尼器能够将墩梁的最大相对位移降低约89%、98%、97%。设置阻尼器能够提升桥梁的抗震性能,在保证墩顶最大位移满足极限位移要求的前提下,有效降低了墩梁之间的最大相对位移。设置X形钢阻尼器减震效果略逊于黏滞阻尼器与摩擦阻尼器。

5 结论

(1)在黏滞阻尼器中阻尼指数 α 不变时,增大阻尼系数 C 会导致桥墩损伤加重,支座损伤减轻;阻尼系数 C 不变时,增大阻尼指数 α 会导致桥墩损伤减轻,支座损伤加重;X形钢阻尼器的屈服位移一定时,随着屈服力的增大,墩顶的位移需求呈上升趋势,墩梁之间的相对位移则呈下降趋势;当屈服力一定时,随着屈服位移的增加墩顶位移需求大致呈下降趋势,墩梁最大相对位移需求呈上升趋势;随着摩擦阻尼器预设摩擦力的增大,桥墩损伤加重,支座损伤减轻。

(2)在设置不同阻尼器后,在阻尼器参数不同时,组合体系中主要的耗能装置也不同。使用黏滞阻尼器时,能够有效发挥阻尼器与挡块的耗能能力;使用X形钢阻尼器时,挡块的耗能能力得到有效发挥;使用摩擦阻尼器时,能够有效发挥阻尼器的耗能能力。

(3)设置阻尼器后,由于增强了上部结构与下部结构之间的联系,会导致桥墩与主梁之间的最大相对位移减小;虽然没有充分

发挥支座摩擦耗能的能力,但保证了上部结构的安全性。

(4)不同的阻尼器会导致耗能装置的力-位移关系产生较大差异,X形钢阻尼器减震效果略逊于黏滞阻尼器与摩擦阻尼器。

参考文献

- [1] 项乃亮,李建中.不同挡块形式对中小跨径梁桥横向抗震性能的影响[J].工程力学,2016,33(3):188-195.
(XIANG Nailiang, LI Jianzhong. Effect of different types of retainers on transverse seismic performance of small and mid-span girder bridges [J]. Engineering mechanics, 2016, 33(3): 188-195.)
- [2] 林均岐,陈永盛,王杰.汶川8.0级地震绵竹市桥梁震害分析[J].世界地震工程,2010,26(1):80-85.
(LIN Junqi, CHEN Yongsheng, WANG Jie. Analysis of seismic damage to highway bridges in Mianzhu city during Wenchuan Ms8.0 earthquake [J]. World earthquake engineering, 2010, 26(1): 80-85.)
- [3] 唐伟健,王东升,张蒙,等.桥梁震害的历史回顾(下)[J].地震工程与工程振动,2021,41(5):90-105.
(TANG Weijian, WANG Dongsheng, ZHANG Meng, et al. A review of the seismic damage history of bridges (II) [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2021, 41(5): 90-105.)
- [4] 徐略勤,傅博瑶,李建中,等.板式橡胶支座梁桥的典型横向震害及其影响因素分析[J].振动与冲击,2020,39(2):209-217.
(XU Lueqin, FU Peiyao, LI Jianzhong, et al. Typical transverse damage of girder bridges supported by laminated rubber bearings and its influential factors [J]. Journal of vibration and shock, 2020, 39(2): 209-217.)
- [5] 中华人民共和国交通运输部.公路桥梁抗震设计规范:JTG/T 2231-01—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
(Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specification for seismic design of highway bridges: JTG/T 2231-01—2020 [S]. Beijing: People's Communications Publishing House Co. Ltd., 2020.)
- [6] 中华人民共和国交通运输部.公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S].北京:人民交通出版社,2018
(Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specification for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG 3362—2018 [S]. Beijing: China Communications Press, 2018.)
- [7] 方圆.汶川地震典型简支梁桥震害分析及横向限位装置研究[D].上海:同济大学,2012.
(FANG Yuan. Seismic damage analysis and lateral limit device research of typical simply-supported beam bridges in Wenchuan earthquake [D]. Shanghai: Tongji University, 2012.)
- [8] 陈学伟,林哲.结构弹塑性分析程序OpenSEES原理与实例[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
(CHEN Xuwei, LIN Zhe. Structural nonlinear analysis program OpenSEES theory and tutorial [M]. Beijing: Building Industry Press of China, 2014.)
- [9] 赵人达,许智强,邹建波,等.大跨度斜拉桥阻尼约束体系减震优化研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(3):385-393.
(ZHAO Renda, XU Zhiqiang, ZOU Jianbo, et al. Study of optimal seismic mitigation of damping restraint systems for long-span cable-stayed bridge [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(3): 385-393.)
- [10] 项乃亮,李建中.非规则梁桥横向X形弹塑性阻尼器合理参数分析[J].同济大学学报(自然科学版),2015,43(7):980-986.
(XIANG Nailiang, LI Jianzhong. Analysis of transverse X-shaped elastic-plastic damper's proper parameters on irregular girder bridge [J]. Journal of tongji university (natural science edition), 2015, 43(7): 980-986.)
- [11] XIANG N L, LI J Z. Seismic performance of highway bridges with different transverse unseating-prevention devices [J]. Journal of bridge engineering, 2016, 21(9): 04016045.
- [12] LEHMAN D, MOEHLE J, MAHIN S, et al. Experimental evaluation of the seismic performance of reinforced concrete bridge columns [J]. Journal of structural engineering, 2004, 130(6): 869-879.
- [13] CHOI E, DESROCHES R, NIELSON B. Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones [J]. Engineering structures, 2004, 26(2): 187-199.
- [14] 汤虎,李建中,邵长宇.中小跨径板式橡胶支座梁桥横向抗震性能[J].中国公路学报,2016,29(3):55-65.
(TANG Hu, LI Jianzhong, SHAO Changyu. Seismic performance of small and medium span girder bridge with plate type elastomeric pad bearing in the transverse direction [J]. China journal of highway and transport, 2016, 29(3): 55-65.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)