

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2023.06.012

# 采用粘滞阻尼器的高桥墩连续 刚构桥减震控制研究

陈榕

(恒超建工集团有限公司,福建 厦门 361000)

**摘要:**为研究液体粘滞阻尼器参数对不同强度地震作用下高墩刚构桥减震控制的影响,以某墩高65 m的刚构桥为案例,采用midas Civil 2020建立有限元模型,并进行非线性时程分析。研究表明:梁端位移、墩底内力总体上均随着阻尼系数 $C$ 增加而增大,随着阻尼指数 $\alpha$ 的增大而减小,综合考虑梁端位移、墩底内力及液体粘滞阻尼器的加工制造难度等因素,一般地震作用下,建议桥的液体粘滞阻尼器参数 $C$ 取 $6\,000\text{ kN}(\text{m/s})^{-\alpha}$ , $\alpha$ 取0.4;强震时, $C$ 取 $7\,000\text{ kN}(\text{m/s})^{-\alpha}$ , $\alpha$ 取0.4。同参数阻尼器在不同强度地震作用下减震效果存在差异,强震作用下,顺桥向梁端位移、3#墩底弯矩、3#墩底剪力最大减震率为48%、23%、35%。在一般地震和强震作用下,各墩墩顶弯矩、剪力、位移的平均减震率分别为11.0%、15.9%、32.3%和46.1%、44.0%、45.1%。表明地震作用下,液体粘滞阻尼器适用于高墩刚构桥的减震设计。

**关键词:**高墩刚构桥;液体粘滞阻尼器;减震率;地震作用;减震控制

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)06-0078-07

## Seismic Control of High Pier Continuous Rigid – frame Bridges Using Viscous Dampers

CHEN Rong

(Hengchao Construction & Engineering Group Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361000, China)

**Abstract:** To investigate the influence of liquid viscous damper parameters on the seismic control of high-pier rigid frame bridges under different intensity earthquakes, a 65 m high-pier rigid frame bridge was chosen as the engineering case study. The finite element model was established using midas Civil 2020, and nonlinear time history analysis was performed. The research findings indicate that overall, the beam-end displacement and pier base internal forces increase with an increase in the damping coefficient  $C$ , while they decrease with an increase in the damping exponent  $\alpha$ . Considering factors such as beam-end displacement, pier base internal forces, and the manufacturing difficulty of liquid viscous dampers, it is recommended that for general seismic actions, the damping parameters of the bridge's liquid viscous damper be set at  $C = 6000\text{ kN}(\text{m/s})^{-\alpha}$  and  $\alpha = 0.4$ . For strong earthquakes,  $C = 7000\text{ kN}(\text{m/s})^{-\alpha}$  and  $\alpha = 0.4$  are suggested. It is observed that the same parameter damper exhibits different seismic reduction effects under different intensity earthquakes. Under strong earthquake excitation, the maximum reduction rates for the along-bridge beam-end displacement, 3rd pier base bending moment, and 3rd pier base shear are 48%, 23% and 35% respectively. Under general and strong earthquake excitations, the average reduction rates for the bending moment, shear force, and displacement at the top of each pier are 11.0%, 15.9%, 32.3% and 46.1%, 44.0%, 45.1% respectively. Overall, these findings indicate that liquid viscous dampers are suitable for seismic design in high-pier rigid frame bridges under earthquake excitation.

**Keywords:** high pier rigid bridge; liquid viscous dampers; damping rate; seismic action; seismic control

收稿日期:2023-07-20

修稿日期:2023-08-20

基金项目:福州市科技局“中小跨径桥梁无缝化改造设计方法研究”(2016-G-62)

作者简介:陈榕(1976—),男,高级工程师,主要从事工业与民用建筑及公路施工技术管理等方面工作。E-mail:385672929@qq.com

近年来,随着我国交通路网的不断加密,各类桥梁相继建成,高墩刚构桥凭借其跨越能力强、结构整体性好、力学性能优越,已成为跨越山谷沟壑等地形的首选桥型,尤其在在我国西南、西北山区公路和铁路的设计中,道路跨越深沟峡谷或大江大河往往采用高墩刚构桥。高墩连续刚构桥采用墩梁固接、不设伸缩缝,通过多个刚构墩共同承受地震作用,具有较好的抗震性能<sup>[1]</sup>,但受其高墩结构影响,使得桥梁整体刚度较柔,强震作用下桥墩部位将会形成多个塑性铰,尽管通过合理的抗震设计可以一定程度的保证结构的安全性,但墩身的损伤无法避免,震后对桥梁结构整体的维修加固工作十分繁琐<sup>[2-3]</sup>。

传统的简支梁和连续梁桥通过在墩梁间设置减隔震支座等减隔震元件,以达到消能减震效果,而高墩刚构桥受墩梁固结限制,仅能在桥台-主梁间设置阻尼器进行减震控制,液体粘滞阻尼器是消能减震技术中常用的减震元件,在大跨度连续梁桥、斜拉桥以及悬索桥等桥型中均体现了显著的减震效果<sup>[4-8]</sup>。文献[9-14]表明在刚构连续梁桥中设置液体粘滞阻尼器仍是当下解决刚构桥梁抗震的较好方法。

本文以某高墩大跨刚构桥为工程背景,通过在刚构桥过渡墩处模拟桥台,在桥台-主梁连接处沿纵桥向设置液体粘滞阻尼器来提高连续刚构桥的抗震性能,从减小主墩的地震响应方面考虑,讨论阻尼器的参数取值对结构减震效果,探讨不同地震强度作用下高墩刚构桥中阻尼器参数的合理取值。

## 1 有限元建模

### 1.1 基本桥况

以主跨 212 m (56 m + 100 m + 56 m) 的变截面预应力混凝土连续刚构桥为工程背景,全桥总体布置如图 1 所示。其中,主梁采用 C55 混凝土,桥墩采用 C40,1#、4#墩为过渡墩,2#、3#墩为固定墩,其墩高分别为 57 m、65 m。主梁箱梁和桥墩截面见图 2 所示。

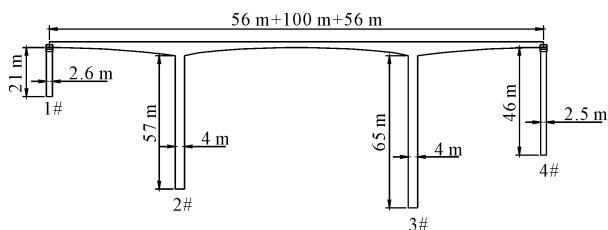


图 1 全桥布置图

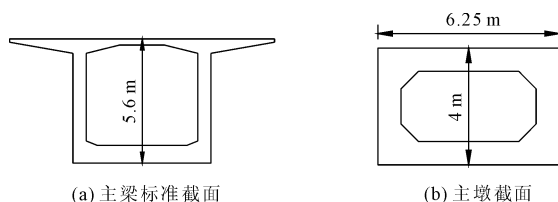


图 2 主梁、主墩标准截面

### 1.2 单元划分

采用 midas Civil 2020 有限元软件建立全桥有限元模型,共划分 126 个节点、113 个单元。主梁和横梁均采用空间梁单元模拟,每个单元包含 2 个节点,每个节点考虑 3 个平移自由度和 3 个转动自由度。

### 1.3 边界条件

在桥梁模型中,两侧过渡墩每一过渡墩均设置两个支座,其中一个支座的约束条件为  $D_y, D_z$ ,另一支座约束  $D_x$ ,两侧过渡墩支座约束条件保持一致,墩顶与支座采用刚性连接,并通过弹性连接中的刚性来模拟箱梁顶部和桥墩的连接。阻尼器布置在模拟的桥台节点-梁端节点连接处,采用一般弹性连接进行模拟。各墩采用墩底固接,主梁两端各增数个固定节点用于布置液体粘滞阻尼器。整体桥梁布置有限元模型如图 3。

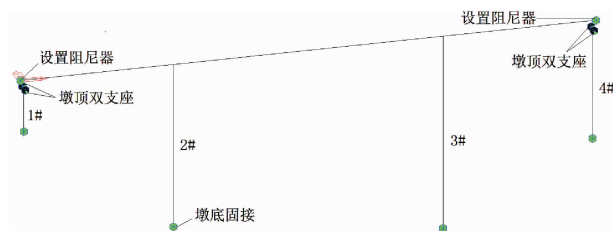


图 3 高墩连续刚构桥有限元模型

### 1.4 荷载情况

模型中考虑以下静力荷载工况。自重: C50 混凝土,在实际工程中重度  $\gamma = 2.6 \text{ kN/m}^3$ ;二期恒载: 采用均布荷载模拟,荷载  $q = 100 \text{ kN/m}$ 。自重采用集中质量模型,并将二期恒载转换为节点质量,用于后续的结构自振特性分析。

### 1.5 结构自振特性分析

采用子空间迭代法对结构进行特征值分析,迭代次数为 20,得到结构第一阶自振周期为 2.08 s,振型为主梁正对称横弯,说明桥梁结构横桥向柔性较大,振型在纵桥向的振型质量参与系数为 69.15%,表明此时结构处于非塑性状态,无需进行专门研究。结构主要振型情况见表 1,结构前 25 阶

振型参与质量总和为 90%，其主要模态形状如图 4 所示。

一般来说,低阶振型贡献大,高阶振型贡献小,从桥梁主要振型图、表可知,桥梁前十阶振型中,3#高墩出现了纵弯和横弯,说明该刚构桥高墩结构纵向和横向上的刚度较小,桥梁结构整体变形响应贡献较大,需重点关注。

表 1 结构自振特性参数

模态号	周期/s	频率	振型特性
1	2.08	0.48	主梁正对称横弯
2	1.16	0.86	一阶纵飘
3	1.04	0.96	主梁反对称横弯
6	0.42	2.39	3#墩一阶纵向侧弯
7	0.33	3.01	3#墩一阶横弯
12	0.22	4.48	2#、3#墩反向横弯
14	0.20	4.94	2#、4#墩纵向侧弯
18	0.14	7.12	2#、3#墩反对称纵弯
25	0.09	10.57	3#反对称横弯

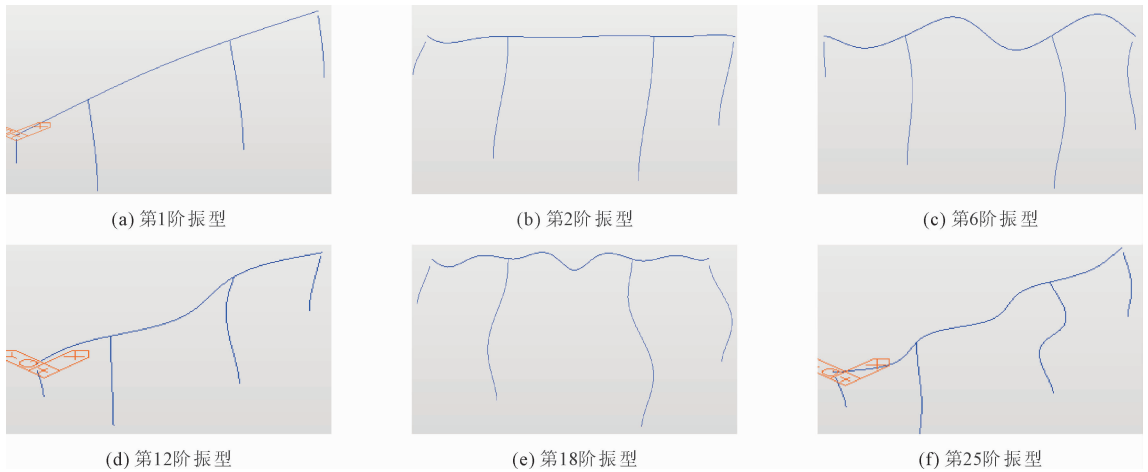


图 4 桥梁结构主要振型图

根据桥址场地要素计算设计反应谱,在 midas Civil 数据库选取两条与桥梁匹配的实录地震波作为输入,其设计反应谱与所选地震波加速度时程反应谱对比、地震波加速度时程曲线见图 5、图 6。将所选实录波按设防地震和罕遇地震进行规格化处理,将峰值加速度调至  $0.1g$  和  $0.32g$ 。将设计加速度时程沿纵向输入到桥梁有限元模型,并进行桥梁非线性时程抗震分析。

## 2.2 计算参数及工况

液体粘滞阻尼器采用 midas Civil 2020 中基于 Kelvin (Voigt) 模型开发的弹性双线性阻尼器模拟,如图 7 所示,该模型由一个线性弹簧与一个阻尼器并联而成,其力-变形关系式如下所示:

## 2 计算参数

### 2.1 地震动输入

本文旨在探讨地震作用下高墩刚构桥液体粘滞阻尼器的减震控制效果,分析合适的阻尼器参数取值。根据相关桥梁工程抗震细则中三水设防要求,结合该桥桥址场地要素设定设防地震和罕遇地震两种工况。该桥位于 7 度区的二级公路上,桥址场地类别为 II 类,场地特征周期为  $0.40\text{ s}$ ,依据相关规范根据不同设防标准计算设计加速度反应谱。设计反应谱  $S(T)$  计算公式如下:

$$S(T) = \begin{cases} S_{\max}(0.6T/T_0 + 0.4) & T \leq T_0 \\ S_{\max} & T_0 < T \leq T_g \\ S_{\max}(T_g/T) & T_g < T \leq 10 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T$  为周期,  $s$ ;  $T_0$  为反应谱直线上升段最大周期,取  $0.1\text{ s}$ ;  $T_g$  为特征周期;  $S_{\max}$  为设计加速度反应谱最大值,  $g$ 。

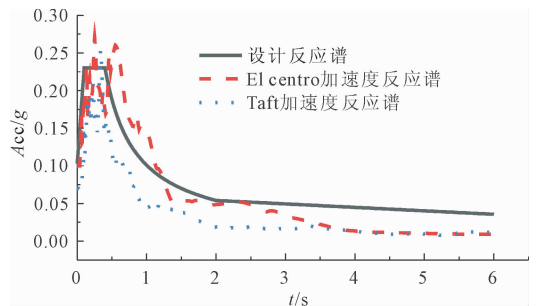


图 5 设计反应谱与加速度时程反应谱对比

$$F = Kd + C \text{sign}(\dot{d}) |\dot{d}|^\alpha \quad (2)$$

式中: $F$  为阻尼力,  $\text{kN}$ ;  $C$  为阻尼系数,  $\text{kN}(\text{m/s})^{-\alpha}$ ;  $d$  为连接阻尼器  $i, j$  节点间的距离变化;  $\dot{d}$  为阻尼器的

相对速度; $\alpha$ 为阻尼指数; $K$ 为阻尼器材料刚度,为保证阻尼器不改变桥梁结构特性,不予考虑液体粘滞阻尼器的连接刚度,即为0。

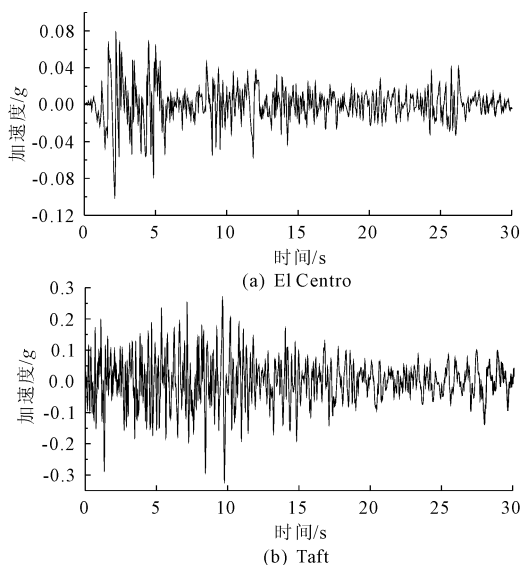


图6 地震波加速度时程

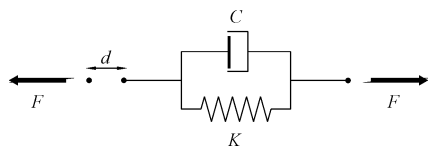


图7 Kelvin (Voigt) 模型

参考国内外液体粘滞阻尼器常见设计参数以及以往分析经验,阻尼指数 $\alpha$ 设置为0.3~0.8,步长0.1,阻尼系数 $C$ 设置为 $2\ 000\ \text{kN}(\text{m}/\text{s})^{-\alpha} \sim 8\ 000\ \text{kN}(\text{m}/\text{s})^{-\alpha}$ ,步长为 $1\ 000\ \text{kN}(\text{m}/\text{s})^{-\alpha}$ 。

## 3 结果讨论

### 3.1 阻尼器数量

高墩刚构桥受其结构特性影响,无法应用传统的隔震支座进行减震控制,一般在桥台或梁-过渡墩处设置阻尼器进行减震控制,现有的阻尼器多为单向耗能型阻尼,因此,对于高墩刚构桥阻尼器布设数量的把握尤为重要。本文在梁端处布设液体粘滞阻尼器,考虑多种阻尼器设置方案,阻尼器阻尼系数 $C = 5000\ \text{kN}(\text{m}/\text{s})^{-\alpha}$ 、阻尼指数 $\alpha = 0.5$ ,输入 El Centro 地震波进行地震响应分析,讨论梁端处布设液体粘滞阻尼器个数的合理性。El Centro 地震作用下高墩刚构桥响应情况如表2所示。表中减震率为设置阻尼器前、后结构响应值之差与未设置阻尼器结构响应值之比。

表2 桥梁结构地震响应随阻尼器数量变化

阻尼器数量	1#梁端位移/mm	减震率/%	3#墩底弯矩/(MN·m)	减震率/%	3#墩顶剪力/MN	减震率/%
0	31.00	0.0	77.20	0.0	1.48	0.0
1	29.61	4.5	75.87	1.7	1.47	0.4
2	28.22	9.0	74.49	3.5	1.47	0.5
3	24.31	21.6	71.44	7.5	1.45	2.3
4	23.64	23.9	69.14	10.5	1.42	4.2

由表2可知,El Centro 地震作用下,梁端位移、墩底弯矩、墩顶剪力均随着阻尼器个数的增加而减小,阻尼器增至3个时,梁端位移、墩底弯矩减小幅度下降,表明此时液体粘滞阻尼器减震率接近临界值,再增设阻尼器无法发挥阻尼器全部效能,本着经济适用原则,本文通过在两端桥台处各布设3个液体粘滞阻尼器对桥梁进行减震控制。

### 3.2 阻尼器参数分析

为了解阻尼器参数对刚构桥减震效应的影响,采用前述天然地震波对刚构桥进行时程分析,在分析中,按顺桥向输入地震波,对比设置阻尼器前、后结构的地震响应,进而讨论阻尼器参数对结构安全性能的影响。设置阻尼器后,桥梁结构体系未发生改变,但各墩位移、内力均发生变化。在上述2条地震波作用下,不同参数阻尼器对高墩刚构桥1#梁端纵向位移的影响情况如图8—图10。

计算结果表明:(1)梁端位移的减震率随着阻尼系数增加而增大,随着阻尼指数的增大而减小。由图8可知,两种设计地震下,结构梁端位移在不同参数阻尼器消能减震下,梁端纵向位移响应值均有所减小,最大减震率为0.48,可见液体粘滞阻尼器在控制刚构桥位移响应方面效果显著;(2)同一阻尼器在不同强度地震作用下减震效果存在差异,例如阻尼系数 $2\ 000\ \text{kN}(\text{m}/\text{s})^{-\alpha}$ 、阻尼指数0.3的阻尼器在 $\text{PGA} = 0.32g$ 下的梁端位移减震率远大于 $\text{PGA} = 0.1g$ 工况,其他不同参数阻尼器在两种工况下减载率均存在相同变化,可见,液体粘滞阻尼器减震效应在强震环境中表现更明显;(3)增大阻尼系数所达到的减震效果要大于降低阻尼指数,工程应用中,可通过选用合适参数的阻尼器控制刚构桥梁端位移。

两种设计地震下,液体粘滞阻尼器参数对3#固定墩墩底纵向弯矩响应值的影响如图9所示,限于篇幅因素,仅针对3#墩进行分析。

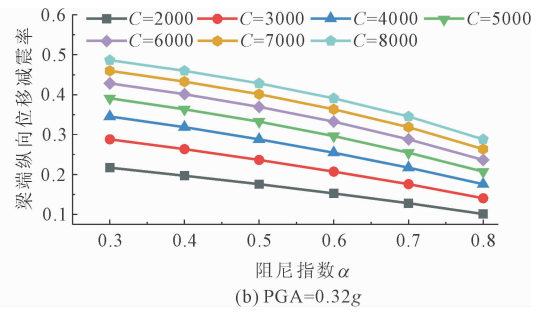
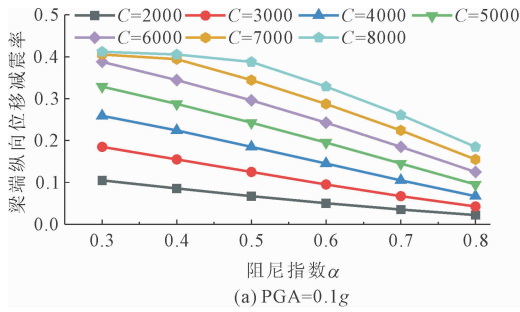


图 8 不同阻尼参数梁端位移减震率

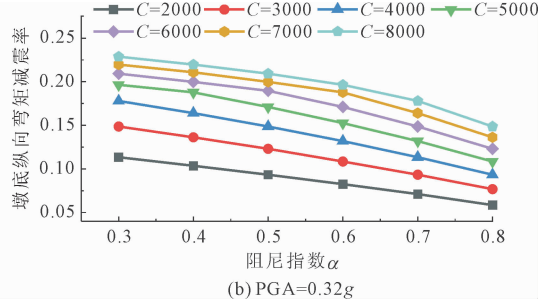
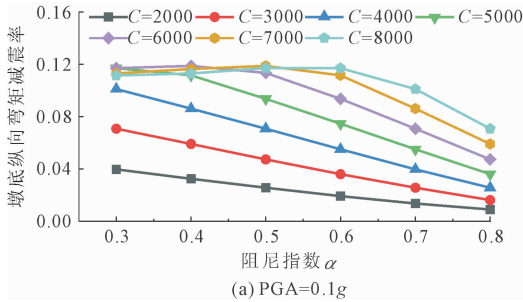


图 9 不同阻尼参数墩底弯矩减震率

由图 9 可知:3#墩底弯矩减震率随阻尼系数和阻尼指数的变化规律与梁端位移相似,存在差异的是,设计地震  $PGA = 0.1g$  工况下,如图 9(a) 所示:当阻尼系数  $C$  小于  $6\,000\text{ kN}(\text{m/s})^{-\alpha}$  时,墩底纵向弯矩减震率随着阻尼系数的增大而增大,随着阻尼指数的增大而减小,当  $C$  大于  $6\,000\text{ kN}(\text{m/s})^{-\alpha}$  时,阻尼指数小于 0.6 时,弯矩减震率变化不大,且以阻尼系数为  $6\,000\text{ kN}(\text{m/s})^{-\alpha}$  减震率最大;而设计地震  $PGA = 0.32g$  工况下,由图 9(b) 可知,墩底纵向弯矩减震率随着阻尼系数的增大而增大,随着阻尼指数的增大而减小。出现这种情况的原因可能是地震动特性和地震强度不一致导致的阻尼器减震规律发生改变,因此,工程应用中选取阻尼器参数时需关注

桥址所在地多年地震强度变化,同时,两种设计地震工况下,当  $\alpha$  一定时,且当  $C$  小于  $6\,000\text{ kN}(\text{m/s})^{-\alpha}$  时,墩底弯矩的减震率随阻尼系数  $C$  的变化幅值较小。

3#固定墩墩底剪力减震率如图 10 所示,由图 10 可知:地震强度较小时 ( $PGA = 0.1g$ ),墩底纵向剪力减震率随阻尼系数  $C$  的增大而增大,值得注意的是,当  $C$  小于  $3\,000\text{ kN}(\text{m/s})^{-\alpha}$  时,阻尼指数  $\alpha$  几乎不影响墩底剪力,且随着  $C$  和  $\alpha$  的增大,最终墩底剪力减震率趋于相等;地震强度较大时 ( $PGA = 0.32g$ ),不同阻尼参数下的墩底剪力减震率均远大于  $PGA = 0.1g$  工况,且不同参数阻尼器下墩底剪力减震率呈线性规律变化。

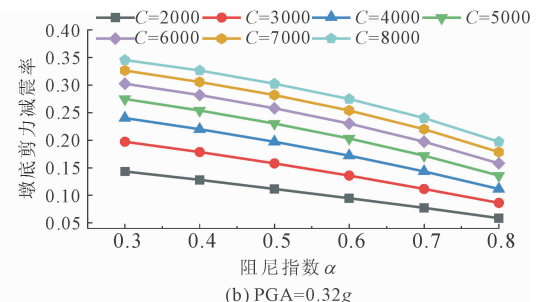
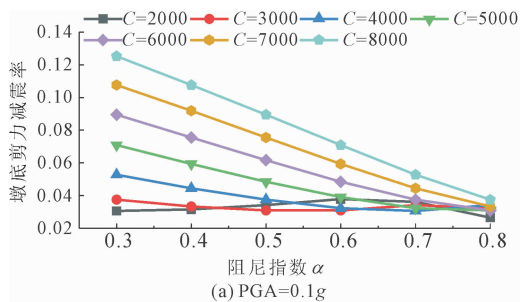


图 10 不同阻尼参数墩底剪力减震率

综上所述表明,相同阻尼器在不同地震强度下的减震效果存在差异,基于所选高墩刚构桥,不同的

设防要求决定结构内力减震效率与阻尼器的关系单调与否,因而,阻尼器各项参数的选取需要结合刚构

桥自身结构特性和桥址所在地的地震烈度、设防要求等确定阻尼器参数。基于计算条件,考虑到墩底的内力及梁端位移响应不宜过大, $C$  应取较大值, $\alpha$  应取较小值,而文献[15]指出  $C$  越大,其输出力就越大,对结构锚固安装的难度就越大, $\alpha$  越小,其加工制造的难度越大,因此,以梁端位移为目标,综合固定墩墩底结构内力减震率变化,一般地震时 ( $PGA = 0.1g$ ) 高墩刚构桥阻尼参数  $C$  取  $6\,000\text{ kN}(\text{m/s})^{-\alpha}$ ,  $\alpha$  取  $0.4$ ; 强震下 ( $PGA = 0.32g$ ), 阻尼参数  $C$  取  $7\,000\text{ kN}(\text{m/s})^{-\alpha}$ ,  $\alpha$  取  $0.4$ 。

### 3.3 阻尼器减震效果分析

为了进一步分析液体粘滞阻尼器对结构响应的影 响,以及阻尼器对刚构桥整体的减震效果,选取上述两种参数阻尼器设置到桥台处,进行地震响应分

析。图 11、图 12 分别给出了两种设计地震下 3#固定墩墩顶内力及位移的时程对比曲线,图 13 给出了有/无液体粘滞阻尼器下梁端位移对比时程曲线,表 3、表 4 分别给出了结构各墩墩顶顺桥向内力及位移的减震率。

由图 11 和图 12 可知:两种设计地震下桥梁有无阻尼器,3#墩墩顶内力时程曲线变化规律是一致的,仅峰值响应存在差异。值得注意的是,两种地震条件下,均存在:有阻尼工况某时刻的内力值要大于无阻尼工况,这在墩顶剪力和弯矩响应时程变化上表现明显,出现这种情况与阻尼器所设置的位置有关。从顺桥向位移上看,响应时程内,阻尼器对高墩墩顶顺桥向位移均在 10% 以上。

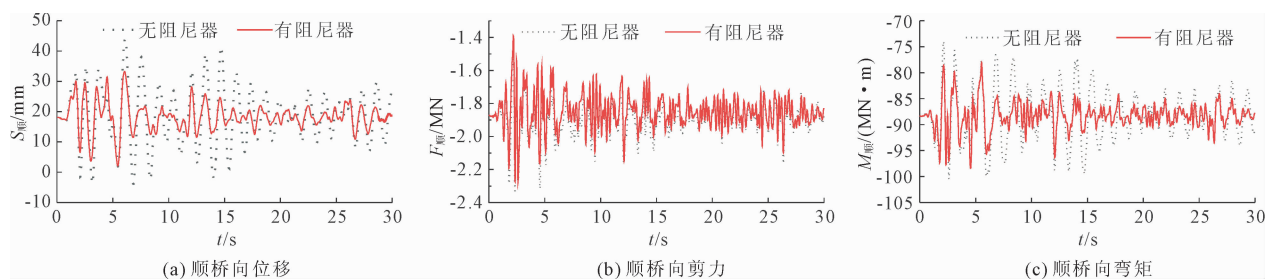


图 11 3#墩墩顶响应时程曲线(0.1g)

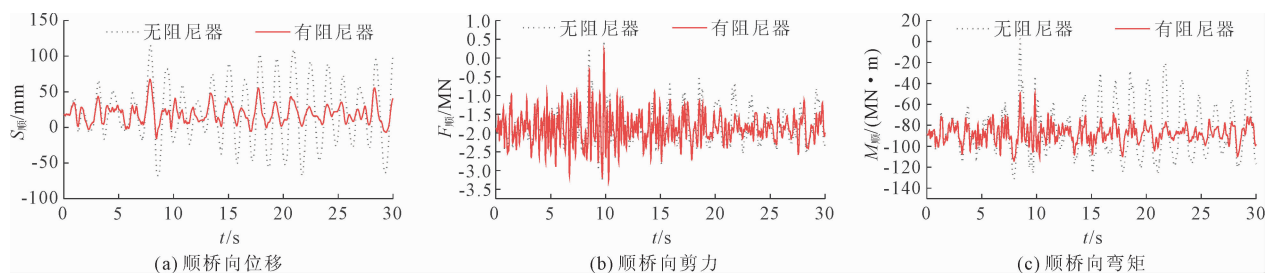


图 12 3#墩墩顶响应时程曲线(0.32g)

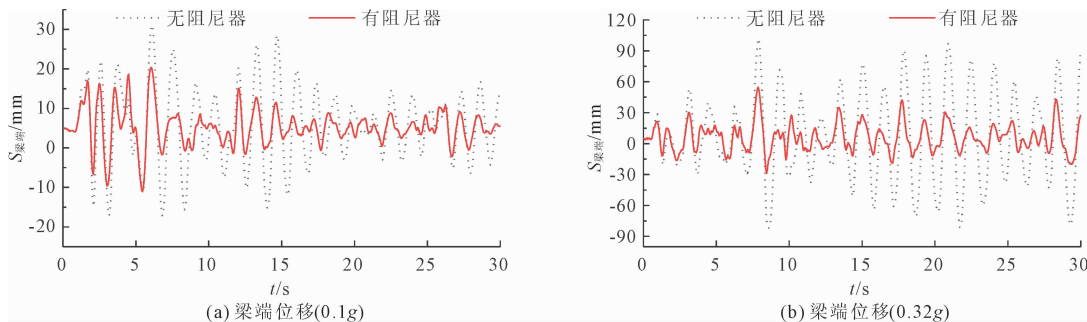


图 13 梁端响应时程曲线

根据图 13 可知,有无阻尼情况下,梁端位移时程变化差异很大,其中,两种设计地震工况中,梁端顺桥向位移响应时程内其减震率均在 10% 以上,某

一时刻下的最大减震率高达 95.6%;液体粘滞阻尼器在控制桥梁主梁顺桥向位移上具有良好效果。

由表 3 和表 4 可知:一般地震时,无阻尼工况

下,刚构桥各墩墩顶纵向弯矩、剪力之和分别为 218.68 MN·m、7.56 MN,其中 3#高墩承受了 49.1% 的总弯矩和 35.6% 的总剪力;强震作用下,3#高墩承受了 58.5% 的总弯矩和 32.6% 的总剪力,同时,

两种地震条件下其墩顶位移均最大,可见,水平地震作用下,与边墩相比,高墩承受了主要地震荷载,受墩身长度影响,各墩刚度不一导致各墩身承受的地震荷载极不均衡。

表 3 各墩墩顶内力及位移减震率(0.1g)

对比项	墩顶位移/mm				墩顶剪力/MN				墩顶弯矩/(MN·m)			
	1#	2#	3#	4#	1#	2#	3#	4#	1#	2#	3#	4#
无阻尼	25.69	25.22	43.88	40.44	3.05	-0.34	2.69	-1.48	23.83	-9.44	107.38	-78.03
有阻尼	16.39	14.78	33.30	29.85	2.51	-0.23	2.50	-1.39	20.40	-7.67	101.37	-73.96
减震率/%	36.2	41.3	25.3	26.2	17.7	32.4	7.2	6.3	14.4	18.8	5.6	5.2

表 4 各墩墩顶内力及位移减震率(0.32g)

对比项	墩顶位移/mm				墩顶剪力/MN				墩顶弯矩/(MN·m)			
	1#	2#	3#	4#	1#	2#	3#	4#	1#	2#	3#	4#
无阻尼	89.94	93.69	115.15	110.85	8.67	-0.84	4.21	-0.46	64.45	-11.36	161.44	-49.11
有阻尼	46.86	48.00	67.59	63.70	4.15	-0.34	3.79	-0.21	30.44	-4.16	125.05	-26.71
减震率/%	47.9	48.8	41.3	42.5	52.1	59.5	10.1	54.3	52.8	63.6	22.5	45.6

有阻尼工况下,一般地震作用时各墩墩顶弯矩、剪力和位移的平均减震率分别为 11.0%、15.9% 和 32.3%,其中,1#边墩墩顶弯矩、剪力和位移减震率分别为 14.4%、17.7% 和 36.2%;强震时的墩顶弯矩、剪力和位移的平均减震率分别为 46.1%、44.0% 和 45.1%,1#边墩墩顶弯矩、剪力和位移减震率分别为 52.8%、52.1% 和 47.9%。两种地震条件下 1#边墩墩顶内力及位移减震率均大于各墩平均减震率,可见采用液体粘滞阻尼器对高墩刚构桥进行减震控制,可较大幅度降低边墩墩顶顺桥向内力的地震响应。此外,液体粘滞阻尼器在强震环境中的减震率均要高于弱震,建议强震区桥梁布设阻尼器以避免发生破坏。

## 4 结 论

(1) 梁端位移、墩底内力总体上均随阻尼系数  $C$  的增加而增大,随阻尼指数  $\alpha$  的增大而减小,综合考虑梁端位移、墩底内力及液体粘滞阻尼器的加工制造难度等因素,当地震峰值加速度即  $PGA \leq 0.1g$  时,建议本桥的液体粘滞阻尼器参数  $C$  采用  $6\ 000\ \text{kN}(\text{m}/\text{s})^{-\alpha}$ , $\alpha$  取 0.4;高烈度强震区阻尼器参数  $C$  采用  $7\ 000\ \text{kN}(\text{m}/\text{s})^{-\alpha}$ , $\alpha$  取 0.4。

(2) 同参数阻尼器在不同峰值地震加速度下减震效果存在差异,以峰值加速度较高者减震效果明显。强震条件下,顺桥向梁端位移、墩底弯矩、墩底剪力最大减震率分别为 48%、23%、35%。

(3) 水平地震一致激励下,与矮墩相比,高墩承受了主要地震荷载,受墩身长度影响,各墩刚度不一导致各墩身承受的地震荷载极不均衡。

(4) 一般地震和强震作用下,各墩墩顶弯矩、剪力、位移的平均减震率分别为 11.0%、15.9%、32.3% 和 46.1%、44.0%、45.1%,其中,以 1#边墩和 2#高墩顶内力减小幅度较大,减震效果突出,可见采用液体粘滞阻尼器对高墩刚构桥进行减震控制,可较大幅度降桥梁顺桥向内力的地震响应。

综上所述,地震作用下,采用液体粘滞阻尼器并选择合理的阻尼器参数可以显著减小高墩刚构桥的地震响应,适用于高墩刚构桥的减震设计。

## 参考文献:

- [1] 毛玉东,李建中.大跨连续梁桥纵向减震机理和减震效果分析[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(2):185-191.
- [2] 刘尊稳,陈兴冲,王平,等.山区铁路高墩大跨刚构-连续梁桥减震研究[J].应用力学学报,2019,36(3):691-696,764-765.
- [3] 陈盈,郭祎晖,张乐,等.桥隧相连超高墩连续刚构桥地震响应特性研究[J].公路,2023,68(1):152-157.
- [4] 丁幼亮,耿方方,葛文浩,等.多塔斜拉桥风致抖振响应的粘滞阻尼器控制研究[J].工程力学,2015,32(4):130-137.
- [5] 肖开乾,徐怀兵,刘敏,等.大跨度斜拉桥抗震性能分析与减震控制研究[J].自然灾害学报,2020,29(1):57-63.