

# 基于简化数值模型的高墩桥梁减隔震性能研究

马振霄, 贾少敏

(广州大学 工程抗震研究中心, 广东 广州 510405)

**摘要:** 针对高墩桥梁基本周期长、墩身响应大的特点, 该文侧重附加装置的耗能能力, 基于简化数值模型计算了摩擦摆支座(FPI)与黏滞阻尼器(FVD)组合方案在高墩桥梁上的减隔震效果。通过减隔震装置参数、地震动幅值和频谱影响分析表明: FPI与FVD组合方案虽然可进一步提高该高墩模型的墩底剪力减震效果, 但综合考虑优势并不明显; 地震动幅值和频谱特性对高墩桥梁的减隔震效果影响明显, 高烈度地区更应重视高墩桥梁的减隔震设计。

**关键词:** 高墩桥梁; 减隔震; 数值分析

丘陵山区由于地形地质条件复杂, 桥梁结构占比大且高墩桥梁日益增多。高墩的长细比和墩身自重通常都比较大, 90 m 桥墩墩身自重与上部结构自重之比可达 2.38。高墩桥梁的结构特点使其与常规桥梁的抗震性能存在较大不同。在地震作用下, 高墩震害多表现为墩梁相对位移过大导致的支座移位、活动支座脱落, 上部结构位移过大导致的墩台破坏以及墩身的弯矩破坏, 其中又以墩身弯矩所造成的破坏最为严重, 因此高墩桥梁的抗震性能研究越来越受到设计人员和学者的重视。

高墩桥梁抗震性能研究主要集中在 3 个方面: ①增加结构自身的强度和变形能力以抗震; ②选择适当的塑性铰位置进行延性设计; ③引入附加装置进行减隔震设计。相比前两种方法, 减隔震措施主要通过特

定构件消耗体系中的能量或改变体系的动力特性以减弱结构地震响应, 一定程度降低抗震方案设计验算的困难和延性设计方案震后修复的代价。文献[9]主要讨论了高墩桥梁中使用滑动支座、黏滞阻尼器等减隔震装置的必要性; 文献[10]通过对采用铅芯橡胶支座、盆式橡胶支座和双曲面滑动支座高墩桥梁的减隔震性能分析表明, 减隔震支座具有一定控制震动效果, 但与墩高和频谱特性紧密相关, 抗震设计中应根据具体情况谨慎分析。

为进一步分析强震区高墩桥梁减隔震装置的适用性及其控制效果, 该文结合高墩桥梁基本周期长的特点, 着重考虑附加装置的耗能能力, 提出摩擦摆支座(FPI)与黏滞阻尼器(FVD)的组合减隔震方案, 并进行该组合装置的参数分析和地震动幅值、频谱影响分析。

量的时间。

## 5 结语

桥面高程计算是中小桥梁设计中一个重要环节, 斜交桥梁桥面高程计算过程繁琐, 结合路线软件提供的接口, 开发适合于工程的小程序, 可极大地提高工作效率。AutoCAD.NET 提供了良好的平台, 使软件开发变得容易, 降低了对编程知识的要求, 路桥设计人员可根据需要开发自己的程序。

## 参考文献:

- [1] 张雨化. 道路勘测设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- [2] 闻道秋. 复合曲线坐标计算及程序设计[J]. 工程勘察, 1997(2).
- [3] 黄雪冬, 王身高, 赵海燕. 基于道路集成 CAD 系统弯坡斜桥坐标高程计算[J]. 交通与计算机, 2000(6).
- [4] 张玲玲, 张志伟. 公路卵形曲线任意点坐标和切线方位角的计算方法[J]. 兰州交通大学学报: 自然科学版, 2007(1).
- [5] 单德山, 张俊英, 黄振兴, 等. 基于 ASP.NET 的大跨度斜拉桥管养系统[J]. 桥梁建设, 2012(3).
- [6] 曾洪飞, 卢择临, 张帆. AutoCAD VBA&VB.NET 开发基础与实例教程[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [7] JTG D20-2006 公路路线设计规范[S].

收稿日期: 2018-06-18

作者简介: 马振霄, 男, 硕士研究生, E-mail: 13265378776@163.com

## 1 研究方法

文献[6]认为规则梁桥可简化为等效单自由度模型进行抗震设计。对于高墩桥梁而言,墩身质量一般大于上部结构质量,在地震作用下墩身振型和几何非线性贡献必然加大,此时仍采用等效单自由度模型则可能过于简化,不能完全反映高墩桥梁的地震响应。文献[8]均采用单质点悬臂梁(MSC)模型,考虑墩身材料和几何非线性对地震响应的影响,使计算结果更趋合理。该文参考 MSC 的简化思路建立有限元模型,见图 1。

### 1.1 单质点悬臂梁有限元模型

桥墩采用空间梁单元(Ansys17.0 中 Beam188 单元,网分 1 m)模拟,上部结构质量堆积在支座顶点并

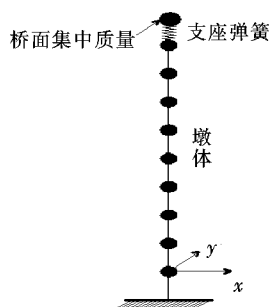


图 1 桥梁简化模型

用集中质量单元(Mass21)模拟,平动质量实常数通过文献[4]提供的质量比确定,考虑绕横轴(图 1 所示  $y$  轴)转动质量的影响。计算模型分别以 20、90 m 作为低墩和高墩桥梁的代表。两种模型的具体设计参数见表 1。

表 1 两种模型有限元参数设计表

模型参数	墩梁间距/m	墩截面形状	墩梁质量比	梁绕横轴的质量惯性矩/( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	弹性模量/GPa	质量密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比	参考模型基本频率/Hz
20 m 模型	0.5	圆形等截面	0.33	3 227 618.56	130	2 500	0.2	1.347
90 m 模型	0.5	圆形等截面	2.38	4 206 416 868	130	2 500	0.2	0.427

为达到利用附加装置耗散体系内地震能量的目的,选用以摩擦耗能为主的支座 FPI 和以黏滞耗能为主的装置 FVD。FPI 双线性滞回模型如图 2 所示。

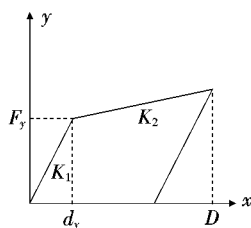


图 2 FPI 双线性滞回模型

FPI 参数参考文献[13],其中:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{F_y}{d_y} = \frac{\mu W}{d_y} \\ K_2 &= \frac{W}{R} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $K_1$  和  $K_2$  分别为屈服前、后刚度; $F_y$  和  $d_y$  分别为屈服力和屈服位移; $\mu$  为摩擦系数(取动静摩擦系数相等); $W$  为上部结构静重; $R$  为支座半径。

FVD 是一种速度型阻尼器,力学模型如下:

$$F = C |v|^n \text{sgn}(v) \quad (2)$$

式中: $F$  为阻尼力; $C$  为阻尼系数; $v$  为关注点间相对

速度; $n$  为速度指数。

研究仅考虑纵桥向地震响应。减隔震装置安装在墩顶和主梁间(即简化模型质点与墩顶之间)。FPI 和 FVD 分别通过非线性弹簧单元 Combin40 和 Combin37 模拟。Combin40 单元由相互平行的弹簧滑动器和阻尼器组合而成,每一个节点有一个自由度。利用该单元模拟 FPI 时释放纵桥向自由度,并赋予相应的刚度  $K_1$ 、 $K_2$  和阻尼系数  $C$ 。值得注意的是,该单元工作弹性阶段的刚度为  $K_1$  与  $K_2$  之和,进入塑性阶段后  $K_1$  变为 0,  $K_2$  参与工作。 $K_1$ 、 $K_2$  可根据滞回曲线简单计算得到,  $C$  可通过式(3)确定。Combin37 单元是具有打开和关闭性能的单向单元,每个节点只有一个自由度。通过适当的参数调节该单元可以模拟黏滞阻尼器。需要的速度可通过控制节点计算得到,该文算例中控制节点为墩梁连接处对应节点。支座竖向通过大刚度法模拟,其转动方向与墩梁对应节点主从约束。参考抗震模型的墩梁连接以固结简化。

体系采用前两阶模态频率确定的 Rayleigh 阻尼,振型阻尼比为 0.05。

$$C = 2\zeta_{eq}\sqrt{K_{eq}W/g} \quad (3)$$

式中: $\zeta_{eq}$  和  $K_{eq}$  分别为等效阻尼比和等效刚度; $g$  为重

力加速度,取  $9.8 \text{ m/s}^2$ 。

## 1.2 有限元模型精度控制

利用 Ansys17.0 进行瞬态动力分析时,系统矩阵处理采用完全矩阵法(Full Method);避免因振型参与程度不同和质量近似产生的误差;方便同时考虑材料和几何非线性。梁单元形函数采用 3 阶多项式。动力控制方程求解采用 Newmark- $\beta$  法,激活自动计算积分步长选项(AUTOS,ON)。高墩模型在地震作用下的二阶效应不容忽视,激活大变形效应(NLGEOM,ON)。

利用文中研究方法进行非线性时程分析时隐含以下假设:① 墩梁为弹性构件;② 上部结构纵桥向刚度无穷大;③ 被简化桥梁的形制规整且墩高一致;④ 硬土地条件下土结方式按固结简化。

## 2 减隔震分析

激励选择 EL Centro 波,假定峰值加速度为  $3.124 \text{ m/s}^2$ ,持时 31.2 s。在模型纵桥向直接输入该加速度进行时程分析。

### 2.1 摩擦摆支座

摩擦摆支座(FPI)的本构关系如图 2 所示。初始支座参数参考文献[13]确定,其中支座初始刚度取  $d_y$  为 2.5 mm 时的刚度,减隔震位移量  $D$  取 100 mm。FPI 半径和摩擦系数分别取工程中常见的范围:0.5~2.5 m(以 0.5 m 为一阶)和 0.01~0.09(以 0.02 为一阶)。

对 20、90 m 简化模型分别进行纵桥向 FPI 的减隔震分析,结果如图 3、4 所示。

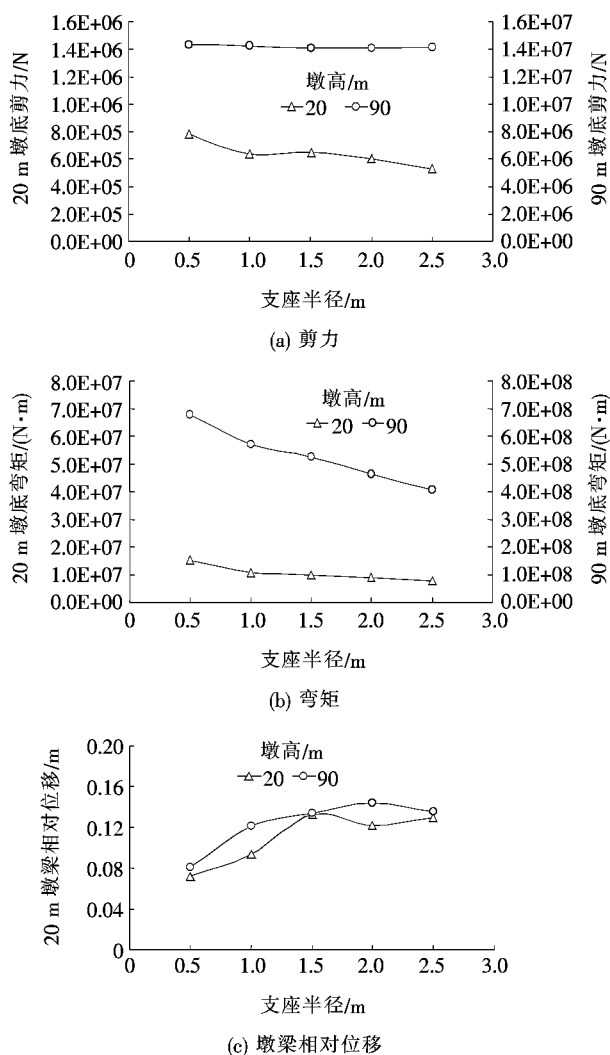


图3 两种模型采用 FPI 时力学性能随支座半径变化图(摩擦系数 0.01)

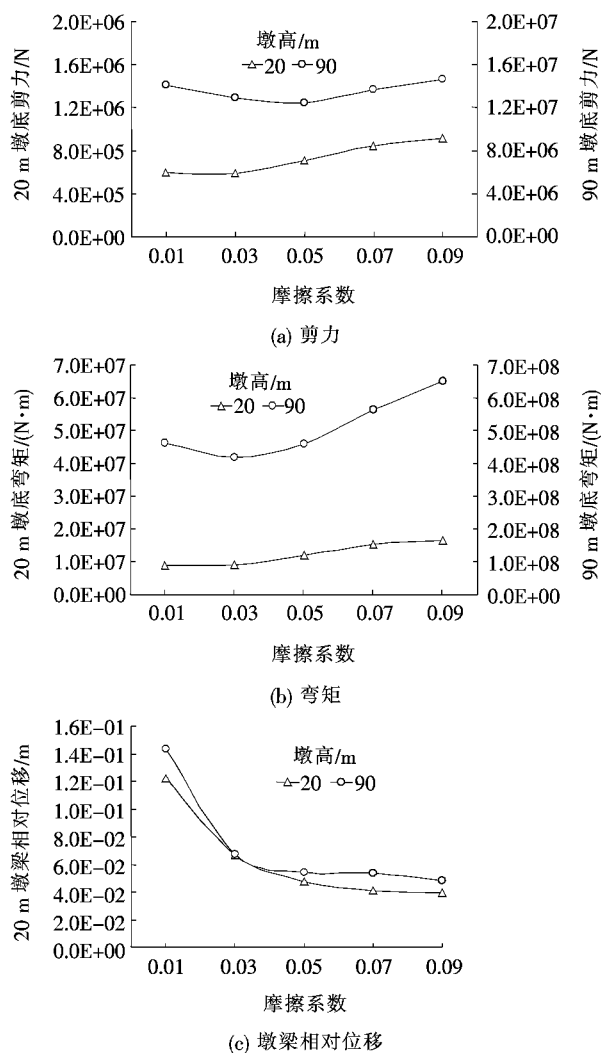


图4 两种模型采用 FPI 时力学性能随支座摩擦系数变化图(支座半径 2 m)

从图 3、4 可以看出:采用 FPI 的两种模型随支座半径的增大,剪力、弯矩存在一定差异;20 m 模型单调递减而 90 m 模型先减小后增大;墩梁相对位移变化相对一致。两种模型随支座摩擦系数的增大变化规律整体相似:剪力、弯矩先减小后增大,墩梁相对位移单调递减。内力与变形存在竞争关系。

## 2.2 黏滞阻尼器

对 20、90 m 简化高墩桥梁模型纵桥向采用黏滞阻尼器 FVD 进行减震分析。20 m 模型阻尼系数  $n$  分别取 1、10、100、1 000 和 2 000  $\text{kN}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^n$ , 90 m 桥梁分别取 200、2 000、4 000、8 000 和 10 000  $\text{kN}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^n$ ; 速度指数分别取 0.25、0.3、0.5、0.7 和 0.9。

图 5、6 为 20、90 m 模型分别采用 FVD 时力学性

能随阻尼系数变化图,图 7 为两种模型采用 FVD 时力学性能随速度指数变化图。从图 5、6 可以看出:采用 FVD 时随阻尼系数的增大,剪力、弯矩先减小后增大,墩梁相对位移递减;90 m 模型随阻尼系数的变化影响更大。从图 7 可以看出:随速度指数的增大,墩梁相对位移先减小后增大。同样地,内力与变形存在竞争关系。

## 2.3 摩擦摆支座与黏滞阻尼器组合方案

定义减震率(负数表示减震):

$$\text{减震率} = \frac{\text{减隔震响应} - \text{非减隔震响应}}{\text{非减隔震响应}} \quad (4)$$

根据式(4)计算得到 20、99 m 桥梁简化模型的减震率见表 2。

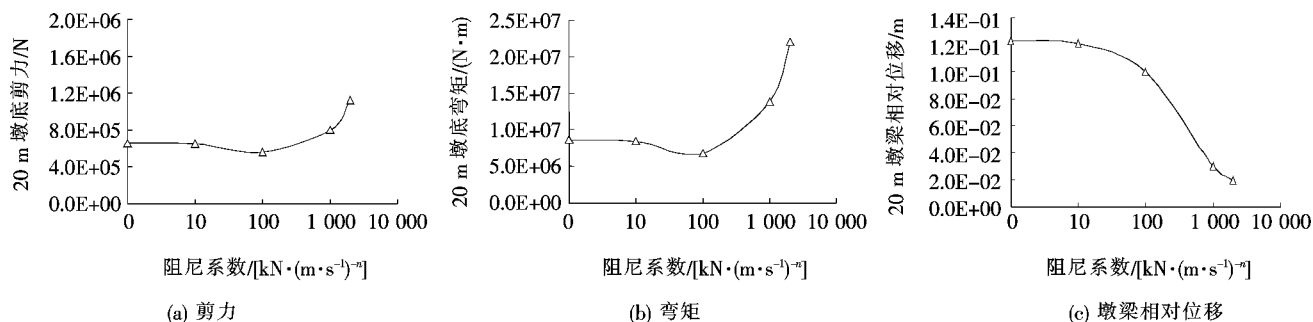


图 5 20 m 模型采用 FVD 时力学性能随阻尼系数变化图

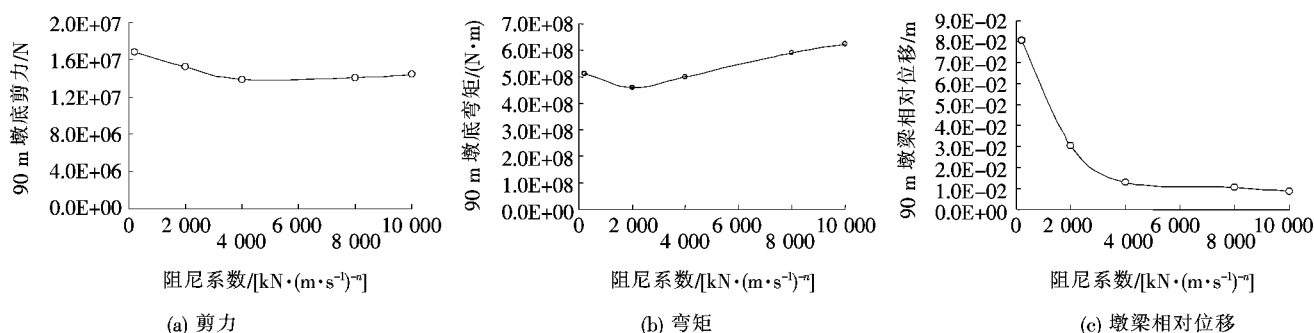


图 6 90 m 模型采用 FVD 时力学性能随阻尼系数变化图

从表 2 可以看出:90 m 模型的减隔震控制效率明显低于 20 m,与理论判断一致,但墩梁相对位移有所降低。如何有效提升减隔震装置对内力的控制是高墩桥梁减隔震设计的重点之一。为进一步提高高墩桥梁的减隔震效果,该文侧重考虑附加装置的耗能能力,设计了 FPI+FVD 的组合方案。以下重点研究这种组合方案。

为研究该文提出的 FPI+FVD 组合减隔震方案的可行性,设计以下研究方法:首先取 FVD 速度指数

为常量 0.5,以 FVD 阻尼系数、FPI 支座半径和摩擦系数为变量,分析  $5^3=125$  种工况下响应;在以上优化参数的基础上分析当速度指数分别为 0.1、0.3、0.7 和 0.9 时响应的变化趋势。具体计算结果见图 8~13(限于篇幅只给出部分图示)。

从图 8~10 可知:组合工况中 FPI 支座半径对剪力的影响不甚敏感,阻尼系数较小时支座半径对弯矩的影响较大;随 FVD 阻尼系数  $C$  的增大,摩擦系数对剪力、弯矩的影响趋势由先减小后增大变为单调递增

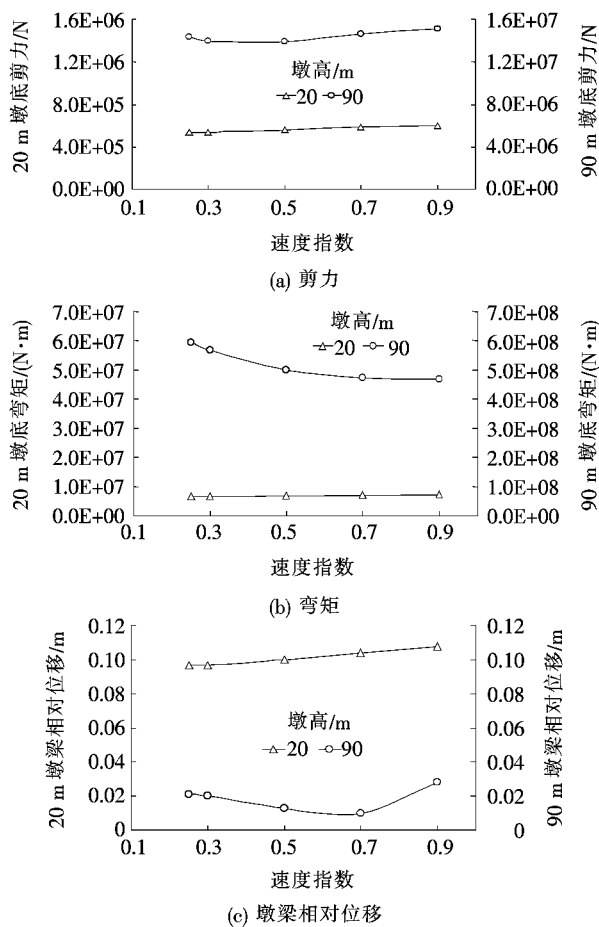


图7 两种模型采用FVD时力学性能随速度指数变化图

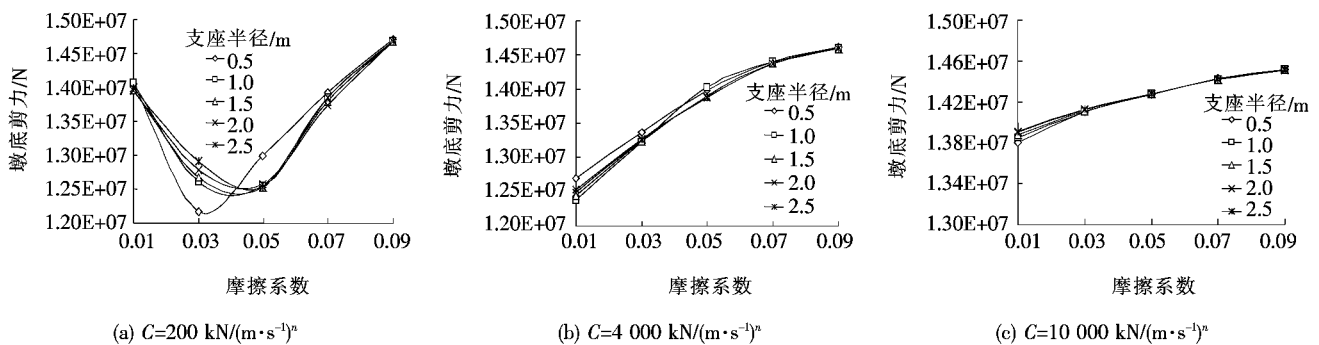


图8 90 m模型采用组合装置时墩底剪力随摩擦系数变化图(速度指数0.5)

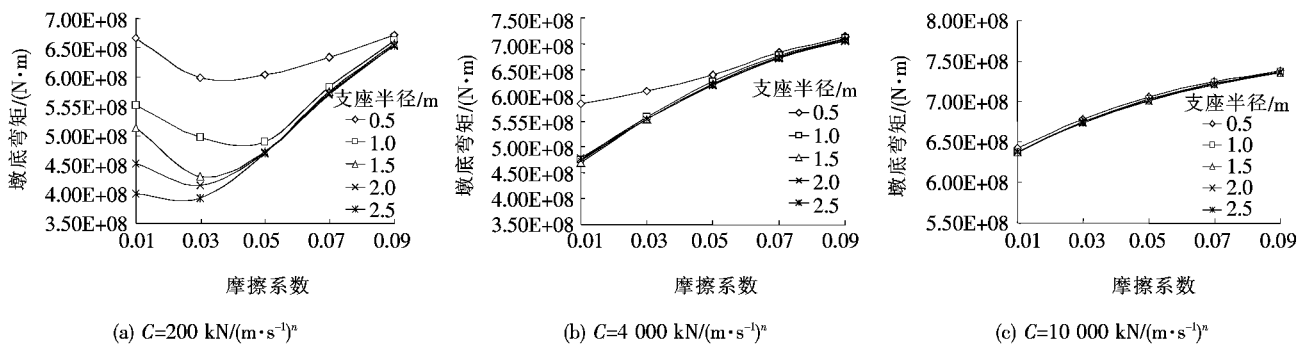


图9 90 m模型采用组合装置时墩底弯矩随摩擦系数变化图(速度指数0.5)

表2 FPI和FVD减震率统计

墩高/ m	减隔 震装 置	考虑不同因素的减震率/%				相对 位移
		剪力	弯矩	墩顶 位移	桥面 位移	
20	FPI	-74.79	-80.82	-81.69	25.92	0.067
	FVD	-76.70	-85.94	-87.86	67.80	0.096
90	FPI	-19.75	-38.72	-43.03	-21.47	0.054
	FVD	-10.26	-33.21	-48.65	-43.54	0.013

(绝对值逐渐增大);墩梁相对位移则随支座半径的增加单调递减,与剪力、弯矩形成竞争关系。图 11~13 亦有类似规律。总的来看,在速度指数为 0.5 时组合参数存在一定范围的优解。综合考虑内力和位移的减震效果,选择 FPI 摩擦系数  $\mu=0.03$ 、支座半径  $R=1 \text{ m}$ 、FVD 阻尼系数  $C=2\,000 \text{ kN}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^n$  进行速度指数  $n$  的确定(图 14)。

从图 14 可以看出:在其他参数一定的情况下,剪力、弯矩随 FVD 速度指数的增加先减小后增大,墩梁相对位移则单调递增。整体来看:相对位移得到了有效控制,速度指数为 0.7 时内力取得极小值;此时剪力、弯矩、墩顶位移和桥面位移的减震率分别为  $-20.72\%$ 、 $-35.57\%$ 、 $-36.05\%$  和  $-11.73\%$ 。

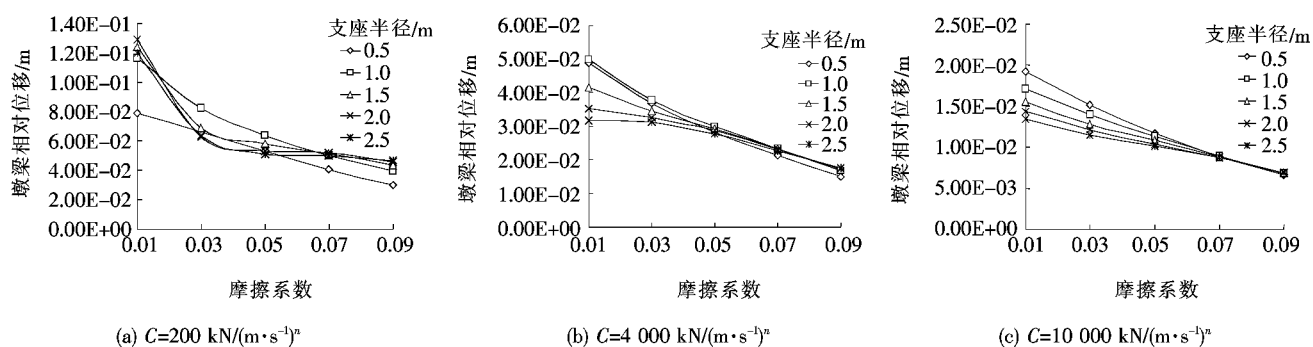


图 10 90 m 模型采用组合装置时墩梁相对位移随摩擦系数变化图(速度指数 0.5)

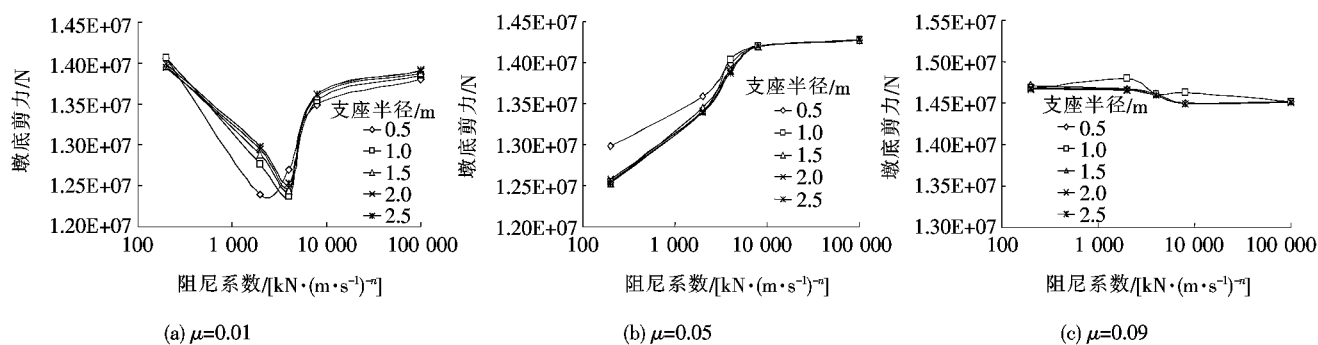


图 11 90 m 模型采用组合装置时墩底剪力随阻尼系数变化图(速度指数 0.5)

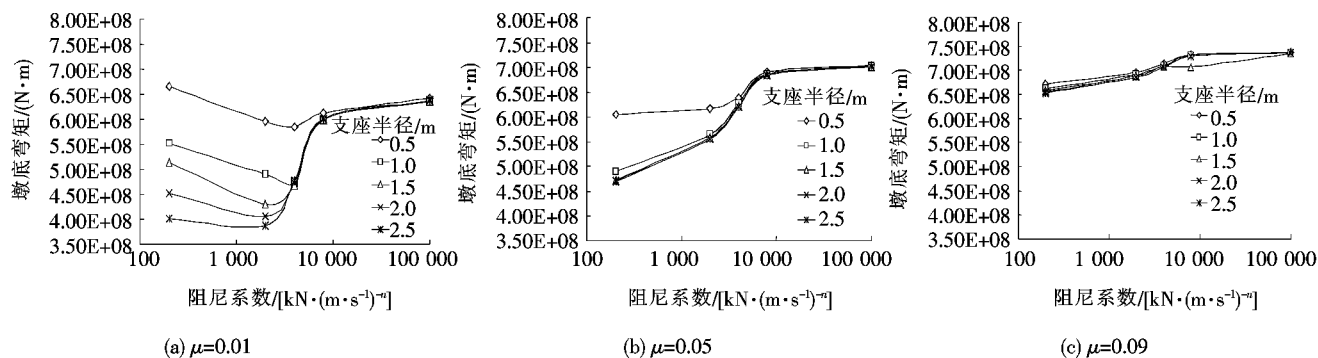


图 12 90 m 模型采用组合装置时墩底弯矩随阻尼系数变化图(速度指数 0.5)

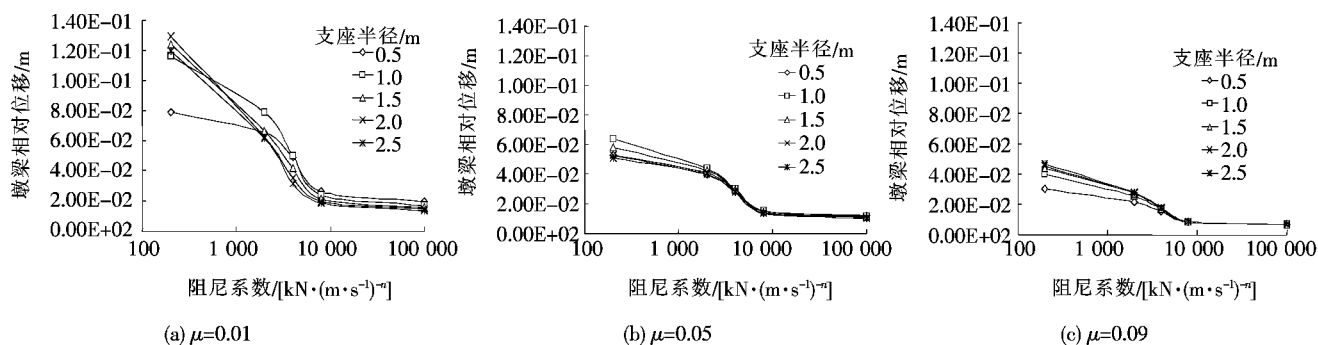


图 13 90 m 模型采用组合装置时墩梁相对位移随阻尼系数变化图(速度指数 0.5)

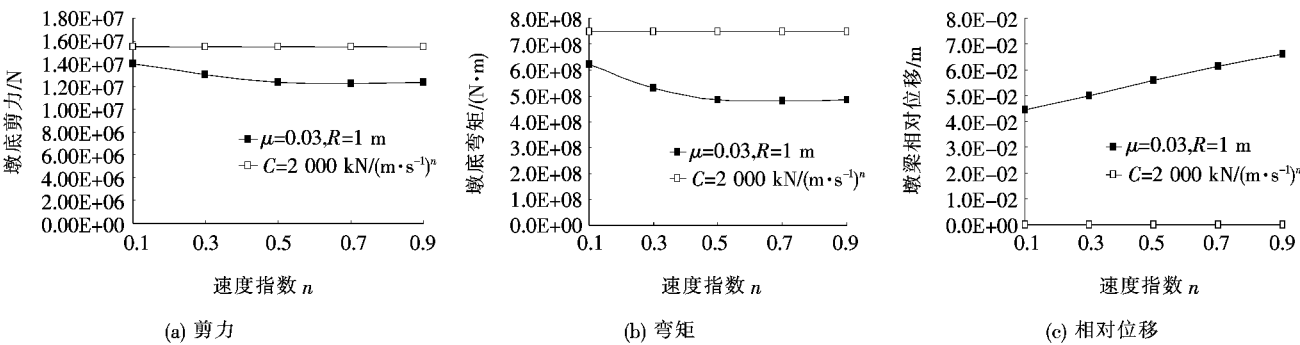


图 14 90 m 模型采用组合装置时响应随速度指数变化图

表 3 为 FPI、FVD 和 FPI+FVD 等 3 种减隔震方案的减震效果对比情况。从表 3 可看出:除剪力外组合方案在该模型中的优势并不明显。整体而言,FVD 方案可能更具竞争性。

表 3 3 种减隔震方案的减震效果对比表

减隔震装置	考虑不同因素的减震率/%		墩梁相对位移/m
	剪力	弯矩	
FPI	-19.75	-38.72	0.054
FVD	-10.26	-33.21	0.013
FPI+FVD	-20.72	-35.57	0.061

2.4 地震动幅值和频谱分析

以上节优化后模型为研究对象,另选取具有代表性的 KERN 波、NORTHR 波、DUZCE 波和 KOBE 波进行频谱分析(PGA 均调为 EL Centro 的  $3.124 \text{ m/s}^2$ ),一定程度上体现地震动的随机性;以 EL Centro 原波为底波试算当 PGA 分别为 0.8、0.6、0.4 和 0.2 倍时 90 m 桥梁模型的地震响应。所选用地震动特性见表 4。表 5 为 EL Centro 波幅值对 90 m 桥梁模型响应的影响,表 6 为不同地震动对 90 m 模型响应的影响。

表 4 选用地震动特性

选用波	地震事件、测站、方向及记录时间	PGV/PGA/s	卓越周期/t
EL Centro_NS	Imperial Valley	0.115	0.50
	EL Centro NS, 5/18/1940		
KERN_TAF021	Kern County Taft Lincoln School 21, 7/21/1952	0.098	0.35

续表 4

选用波	地震事件、测站、方向及记录时间	PGV/PGA/s	卓越周期/t
NORTHR_SCS052	Northridge-01	0.190	0.75
	Sylmar - Converter Sta 52, 1/17/1994		
DUZCE_SKR090	Duzce Turkey	0.214	0.10
	Sakarya 90, 11/12/1999		
KOBE_KJM000	Kobe Japan	0.111	0.20
	KJMA 0, 1/16/1995		

从表 5 可以看出:随地震动幅值的减弱,各响应绝对值降低的同时减震率也下降。幅值对该模型地震响应的影响明显,强震区高墩桥梁采用该文提出的组合方案减隔震效果尚可。

从表 6 可以看出:不同地震动频谱特性对模型地震响应影响明显,剪力、弯矩、墩顶位移和桥面位移的平均减震率分别为 4.19%、-12.53%、-21.19%、4.70%,墩梁相对位移为 66 mm。该模型的鲁棒性仍有待提高。

3 结论

基于简化数值方法分析了摩擦摆支座(FPI)和黏滞阻尼器(FVD)装置在桥梁中的适用性。为进一步提高高墩桥梁模型的减隔震效果,侧重附加装置的耗能能力设计了 FPI 与 FVD 的组合减隔震措施,并进行了相关参数分析和地震动幅值、频谱影响分析。可得如下结论:

表 5 EL Centro 波幅值对 90 m 桥梁模型响应的影响

EL 波幅值	剪力/( $\times 10^6$ N)		减震率/%	弯矩/( $\times 10^8$ N·m)		减震率/%	墩顶位移/m		减震率/%	桥面位移/m		减震率/%	相对位移/mm
	减震前	减震后		减震前	减震后		减震前	减震后		减震前	减震后		
1.0	15.49	12.28	-20.72	7.479	4.819	-35.57	0.252	0.161	-36.05	0.252	0.223	-11.7	61.0
0.8	12.39	9.864	-20.39	5.979	3.902	-34.74	0.202	0.137	-32.29	0.202	0.182	-9.90	45.0
0.6	9.291	7.634	-17.83	4.484	3.205	-28.52	0.151	0.112	-25.96	0.151	0.143	-5.68	31.0
0.4	6.195	5.325	-14.04	2.989	2.508	-16.09	0.101	0.086	-14.55	0.101	0.103	2.48	17.0
0.2	3.097	2.788	-9.98	1.494	1.439	-3.68	0.050	0.050	-1.47	0.050	0.052	3.45	0.2

表 6 不同地震动对 90 m 模型响应的影响

地震波	剪力/( $\times 10^7$ N)		减震率/%	弯矩/( $\times 10^8$ N·m)		减震率/%	墩顶位移/m		减震率/%	桥面位移/m		减震率/%	相对位移/mm
	减震前	减震后		减震前	减震后		减震前	减震后		减震前	减震后		
EL	1.549	1.228	-20.72	7.479	4.819	-35.57	0.252	0.161	-36.05	0.252	0.223	-11.73	61
TAF021	1.303	1.290	-1.00	4.957	5.353	7.99	0.118	0.106	-10.36	0.118	0.139	18.00	33
SCS025	2.337	2.472	5.78	1.633	1.230	-24.68	0.522	0.331	-36.52	0.522	0.505	-3.12	174
SKR090	1.013	1.036	2.27	4.985	5.012	0.54	0.143	0.130	-9.35	0.143	0.179	24.91	49
KJM000	1.143	1.539	34.65	5.006	4.459	-10.93	0.136	0.118	-13.67	0.136	0.130	-4.56	12
平均值			4.19			-12.53			-21.19			4.70	66

(1) 90 m 高墩模型分别采用 FPI、FVD 的减隔震效果均明显低于 20 m 矮墩桥梁。

(2) 组合设计方案虽然可进一步提高该高墩模型的墩底剪力减震效果,但考虑到造价等问题整体效果并不十分理想,FVD 方案可能更具可行性。

(3) 对高墩组合减隔震模型的频谱影响分析表明,该减隔震模型的鲁棒性仍有待提高。

(4) 高烈度地区更应重视高墩桥梁的减隔震设计。

该文基于一定假设进行了高墩简化模型的减隔震研究,难以与实际工程相符。下一阶段将基于高墩实桥数值模型,考虑墩身塑性铰和高低墩间可能产生的响应分配现象进行深入研究。

参考文献:

[1] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述·2014[J].中国公路学报,2014(5).  
[2] 胡连军,杨吉忠.高墩铁路桥梁减震技术进展研究[J].铁道工程学报,2016(6).  
[3] 王克海.桥梁抗震研究[M].北京:中国铁道出版社,2006.  
[4] 宗周红,夏坚,徐绰然.桥梁高墩抗震研究现状及展望[J].

东南大学学报:自然科学版,2013(2).  
[5] 刘林.高墩大跨铁路桥梁抗震设计与减震控制研究[D].北京交通大学博士学位论文,2004.  
[6] 叶爱君,管仲国.桥梁抗震[M].2 版.北京:人民交通出版社,2011.  
[7] 李睿,宁晓骏,叶燎原,等.高墩梁桥的地震反应分析[J].昆明理工大学学报,2001(5).  
[8] 夏修身.铁路高墩抗震设计方法研究[D].兰州交通大学博士学位论文,2012.  
[9] 徐秀丽,于兰珍,王曙光,等.高墩连续梁桥减震设计研究[J].工程抗震与加固改造,2005(5).  
[10] 陈兴冲,商耀兆,张永亮,等.高墩大跨度铁路简支钢桁梁桥的减震性能分析[J].世界地震工程,2008(1).  
[11] 梁智垚,李建中.桥梁高墩合理计算模型探讨[J].地震工程与振动,2007(2).  
[12] M.C.Kunde,R.S.Jangid.Effects of Pier and Deck Flexibility on the Seismic Response of Isolated Bridges[J].Journal of Bridge Engineering,2006,11(1):109-121.  
[13] JT/T 852-2013 公路桥梁摩擦摆式隔震支座[S].  
[14] 刘怀林,兰海燕.Ansys 在大跨径桥梁阻尼器选型中的应用[J].公路交通技术,2011(6).  
[15] A. Ghobarah,H.M.Ali.Seismic Performance of Highway Bridges[J].Eng.Struct,1988,(10):157-159.