

# 桥墩高度对桥梁隔震性能的影响研究

吴 迪<sup>1,2</sup> 黄泽军<sup>1</sup> 周福霖<sup>1</sup> 崔 杰<sup>1</sup>

(1. 广州大学广东省地震工程与应用技术重点实验室, 广东广州 510405; 2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东广州 510604)

**摘要:** 以我国近海交通工程某隔震连续梁桥为研究对象, 通过考虑影响隔震桥梁隔震性能的主要因素, 建立其简化隔震计算力学模型, 并采用有限元程序对隔震桥梁模型进行地震动时程响应模拟, 以验证所采用简化力学计算模型的合理性。根据该模型研究桥墩高度对混凝土桥隔震性能的影响, 分析表明: 随桥墩高度逐渐增加, 桥墩质量相应增加, 桥梁结构自振周期延长, 隔震桥的第二阶自振周期趋近于第一阶自振周期。对于低墩桥梁而言, 桥墩高度对桥梁隔震性能影响显著, 随着桥墩高度的不断增加, 桥墩高度对桥梁隔震性能仍具有影响, 但其影响程度逐渐下降。

**关键词:** 桥梁工程; 桥墩高度; 隔震性能; 地震响应; 自振周期;

**中图分类号:** U442.5<sup>+</sup>5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2014)S2-0328-06

## Study of influence on isolation performance of bridge by pier height

Wu Di<sup>1,2</sup> Huang Zejun<sup>1</sup> Zhou Fulin<sup>1</sup> Cui Jie<sup>1</sup>

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Earthquake Engineering and Advanced Technology, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;

2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** A great traffic engineering of isolated continuous girder bridge in Chinese offshore area is taken as an example. By considering the main factors influencing of isolation performance of the isolation bridge, the simplified isolation computational mechanical model is established. The general finite element program is adopted to stimulate the ground motion time history response of isolation bridge model for verifying the rationality of simplified mechanical model. Then the effect on the performance of isolation bridge by the pier height has been studied based on the simplified mechanical model. The analysis results show that the period of bridge structure is extended, the second natural periods of isolation bridge is constantly approaching to the first natural period with the height of pier and bridge pier quality gradually increasing. The height of pier have a significant effect on the isolation performance of bridge for the low pier bridge, and with the increase of the pier height, it still has an impact on the isolation performance, but the influence gradually diminishes.

**Keywords:** bridge engineering; pier height; isolation performance; seismic response; nature period

**E-mail:** 11795234@qq.com

## 引 言

国内外学者在隔震桥梁简化方面做了大量的研究。在罕遇地震作用下对一般的隔震梁桥而言, 其地震响应基本上体现为单墩独立振动的特性<sup>[1]</sup>。1995 年, Hwang 等<sup>[2]</sup> 提出了 LBR 支座的等效线性模型; 1997

年, Hwang 等<sup>[3]</sup> 把隔震桥梁等效为双自由度系统, 提出隔震支座等效线性动力特性的计算公式, 并建立规则隔震桥梁模型的等效线性设计理论; 1998 年, Iemura 等<sup>[4]</sup> 考虑桥墩进入塑性的情况, 通过建立双自由度隔震桥梁模型, 研究了采用滑动橡胶支座的桥梁地震能量分配与控制, 并给出隔震桥梁系统隔震支座和桥墩的耗能规律; Kelly<sup>[5]</sup> 推导出求解基础隔震建筑双自由度体系振动响应的简化公式; Buckle 等<sup>[6]</sup> 讨论了隔震支座在新建桥梁和既有桥梁中的应用, 研究认为引入隔震支座后, 有时可明显降低桥墩中的地震力, 折减系数可达到 0.5, 从而可显著降低对桥墩延性的需求, 降低桥墩、基础的造价, 尤其是对于使用桩基础的情况; Turkington 等<sup>[7]</sup> 对影响隔震桥梁动力特性的几个因素进行了分析, 包括隔震桥和非隔震桥动力响应的比较、墩高度变化等因素,

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2011CB013606, 2012CB723304), 国家自然科学基金 (51108105), 国家科技支撑计划项目 (2012BAJ07B02), 亚热带建筑科学国家重点实验室开放基金项目 (2011KB15), 住房和城乡建设部科学技术计划项目 (K2201219), 番禺区珠江科技新星专项项目资助 (2013- 专 15-6.05), 博士点基金项目 (20124410110004) 和地震行业基金项目 (201008006)

作者简介: 吴迪, 博士, 副研究员

收稿日期: 2014-08-24

指出桥墩高度的变化有可能影响各桥墩间惯性力的分配; Majid 等<sup>[8]</sup>对隔震桥的不同分析模型进行了比较, 包括平面、三维空间模型等, 认为分析模型对结构响应的计算结果影响较大; 朱东生等<sup>[9]</sup>对采用铅芯橡胶支座的隔震桥梁与非隔震桥梁进行了地震响应比较分析, 研究结果表明隔震支座通过延长桥梁的固有周期和隔震支座本身的耗能特性可降低桥梁的地震响应。在隔震支座滞回模型简化方面, 一些学者提出采用修正双线性分析模型, 在此类分析模型中, 初始弹性刚度、屈服后刚度及特征强度这 3 个参数不再是常数, 其用水平非线性弹簧单元模拟其工作原理, 用非线性转动弹簧模拟桥墩的塑性铰, 或通过桥墩墩顶约束刚度系数 (包括桥面系统的约束和支座的约束) 来反映支座的动力特性对桥墩延性地震响应的影响<sup>[10-12]</sup>。周锡元等<sup>[13]</sup>推导隔震桥梁简化双自由度模型的动力特性近似解, 并与精确解进行了

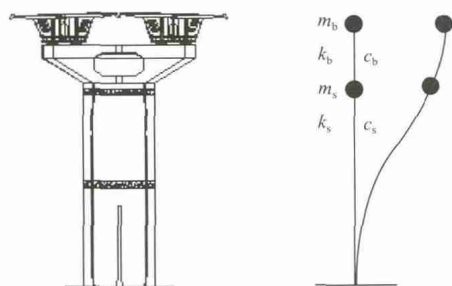


图 1 二自由度简化模型

Fig. 1 Simplified dual freedom model

根据研究需要采用如下基本假定对隔震桥进行简化: 不考虑土与结构相互作用, 隔震桥桥墩墩底为固结; 桥墩和上部结构在地震动作用下保持线弹性; 不考虑桥面结构对桥的纵向约束作用; 不考虑支座恢复力的双向耦合作用; 只考虑单向地震作用, 即沿横桥向计算隔震桥梁模型的地震响应。

二自由度隔震桥梁结构的基本运动方程为<sup>[18]</sup>:

$$\begin{pmatrix} m_b & 0 \\ 0 & m_s \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v}_b \\ \ddot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} c_b & -c_b \\ -c_b & c_b + c_s \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} k_b & -k_b \\ -k_b & k_b + k_s \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix} = - \begin{pmatrix} m_b & 0 \\ 0 & m_s \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{v}_g \quad (1)$$

式中:  $m_b$  为桥梁上部结构 (梁体) 的质量;  $m_s$  表示下部结构 (桥墩) 的等效质量;  $k_b$  为隔震支座的等效刚度;  $k_s$  为桥墩的弹性刚度;  $c_b$  为桥墩的黏滞阻尼系数;  $c_s$  为隔震支座的等效黏滞阻尼系数;  $c_b = 2m_b\zeta_b\omega_b$ ,  $c_s = 2(m_b + m_s)\zeta_s\omega_s$ ;  $v_s$ 、 $v_b$  分别为两质点相对于地面的

对比, 给出了近似解的适用范围; 黄建文等<sup>[14]</sup>将双自由度隔震桥梁模型等效为单自由度模型, 并对各个参数对近场地震作用下隔震桥梁的动力响应进行详细研究; 王丽等<sup>[15]</sup>利用通用结构分析软件 (ANSYS), 采用多条地震波输入对铅芯橡胶支座 (LRB) 隔震桥梁进行动力时程响应分析, 对隔震桥梁的隔震性能进行系统的研究和讨论。

## 1 典型隔震桥的简化力学模型

首先, 对我国近海交通工程某典型连续梁隔震桥沿横桥方向进行简化, 得到如图 1 所示的二自由度简化模型<sup>[16-17]</sup>, 其中把桥墩和上部结构都各等效为单质点, 并假定隔震支座下部结构处于线弹性状态, 其中隔震层采用如图 2 所示的铅芯隔震支座 (LRB) 双线性滞回模型。

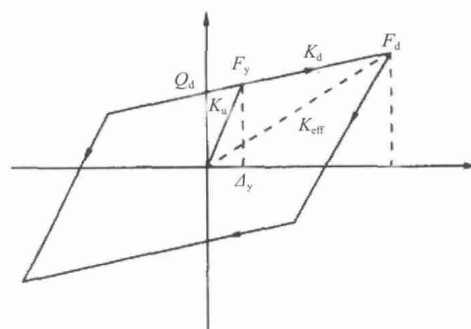


图 2 LRB 双线性模型

Fig. 2 Bilinear hysteretic model of LRB

侧向位移;  $\ddot{v}_g$  为输入运动的地面加速度。

那么, 由此得到隔震桥梁的特征方程为:

$$([K] - \omega_n^2 [M]) \{\phi^n\} = 0, n=1, 2 \quad (2)$$

式中:  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  分别为结构的第 1 和第 2 阶自振频率;  $\{\phi^n\} = (\phi_b^n, \phi_s^n)^T$ , 其中  $\phi_b^n$ 、 $\phi_s^n$  分别为隔震层上下部结构对应的各阶模态形状向量。令  $\alpha_b = \sqrt{k_b/m_b}$ ,  $\alpha_s = \sqrt{k_s/(m_b + m_s)}$ ,  $\gamma = m_s/(m_b + m_s)$ , 化简可得结构的特征方程:

$$\gamma \omega_n^4 - (\omega_b^2 + \omega_s^2) \omega_n^2 + \omega_b^2 \omega_s^2 = 0 \quad (3)$$

令  $R_s = k_b/k_s$ ,  $\omega_b^2/\omega_s^2 = R_s/(1-\gamma)$ , 并代入式 (3) 得:

$$\omega_n^2 = (1-\gamma)/R_s \left[ 1 + R_s/(1-\gamma) \right] \mp \left[ (1 + R_s/(1-\gamma))^2 - 4\gamma R_s/(1-\gamma) \right]^{1/2} \omega_b^2/2\gamma \quad (4)$$

式中:  $n=1$  时取 “-”,  $n=2$  时取 “+”。前两阶模态

阻尼比  $\xi_1$ 、 $\xi_2$  为<sup>[1]</sup>:

$$\begin{cases} \xi_1 = [c_b \alpha_1^2 + c_s (1 - \alpha_1)^2] / \{2\omega_1 [m_b + (1 - \alpha_1)^2 m_s]\} \\ \xi_2 = [c_b \alpha_2^2 + c_s (1 - \alpha_2)^2] / \{2\omega_2 [m_b + (1 - \alpha_2)^2 m_s]\} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\alpha_1 = \omega_1^2 / \omega_b^2$ ;  $\alpha_2 = \omega_2^2 / \omega_b^2$ 。其中  $\xi_b$ 、 $\xi_s$  分别为隔震支座和桥墩的的阻尼比, 代入式 (5) 得:

$$\begin{cases} \xi_1 = \frac{\xi_b \alpha_1^2 (1 - \gamma) + \xi_s \sqrt{(1 - \gamma) / R_s} (1 - \alpha_1)^2}{\sqrt{\alpha_1} [(1 - \gamma) + (1 - \alpha_1)^2 \gamma]} \\ \xi_2 = \frac{\xi_b \alpha_b^2 (1 - \gamma) + \xi_s \sqrt{(1 - \gamma) / R_s} (1 - \alpha_1)^2}{\sqrt{\alpha_2} [(1 - \gamma) + (1 - \alpha_2)^2 \gamma]} \end{cases} \quad (6)$$

## 2 隔震梁桥模型的地震反应分析

该隔震连续梁桥桥墩高 25m, 横截面为空心矩形截面, 混凝土强度等级为 C50, 桥墩底部外平面截面尺寸为 11m × 3.5m, 桥墩内孔平面截面尺寸为 8.5m × 1.9m, 桥墩纵筋配筋率为 1.18%, 箍筋配箍率为 0.514%。墩顶部截面尺寸为 23.5m × 7m, 隔震层由 4 个铅芯橡胶垫隔震支座组成, 每个铅芯橡胶垫支座参数的等效刚度为 2.60kN/mm 屈服后刚度为 1.60kN/mm。地震波输入为桥梁设计所采用的 2400 年一遇的人工波 (工况 1) 和天然波 (工况 2) 分别如图 3 和图 4 所示。

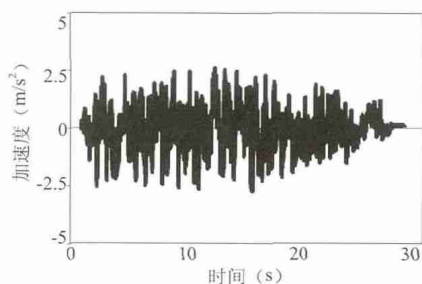


图 3 所采用的人工地震波曲线 (工况 1)

Fig.3 Artificial seismic wave adopted (case 1)

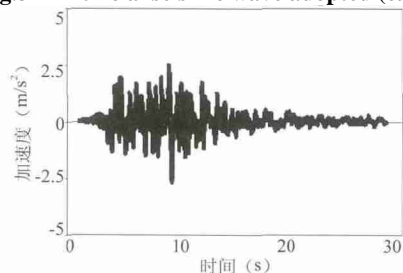


图 4 所采用的天然地震波曲线 (工况 2)

Fig.4 Natural seismic wave adopted (case 2)

按照工况 1 和工况 2 的地震波参数, 根据 Newmark- $\beta$  法求解隔震连续梁桥的简化计算公式 (1),

计算得到结构的第一阶和第二阶自振频率分别为 0.33 和 1.57, 同时得到墩顶和梁体的地震波的时程响应结果如图 5 和图 6 所示。此外, 通过通用有限元程序 (Sap2000) 建立单墩隔震桥梁模型, 隔震支座采用图 2 所示的 LRB 双线性模型, 通过计算得到结构的第一阶和第二阶自振频率分别为 0.34 和 1.57, 通过隔震桥梁简化力学模型与通用有限元程序计算得到结构自振频率结果比较可知, 验证了隔震桥梁结构简化力学模型的有效性。

通过输入桥梁设计所采用的两个工况下的地震波进行时程分析得到墩顶和梁体位置的加速度响应结果如图 5~ 图 8 所示。由图 5 与图 7 对比以及图 6 与图 8 对比可知, 在工况 1 和工况 2 的地震作用下, 简化模型计算结果与有限元模型 (FEM) 分析结果中墩顶和梁体位置的加速度响应波形变化基本一致, 数值大小基本相同, 整体计算结果吻合, 这表明简化计算模型基本可靠。两种地震工况地震条件下墩顶与梁体加速度的减震率达 44%, 由此可以判断采用铅芯橡胶隔震支座的桥梁隔震效果比较显著。

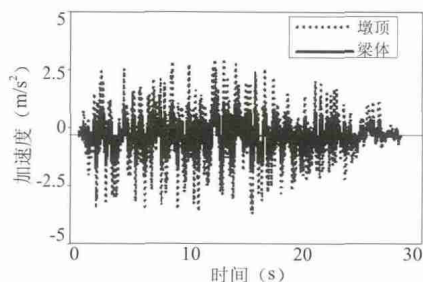


图 5 工况 1 下简化模型的加速度响应

Fig.5 Acceleration response of simplified model in case 1

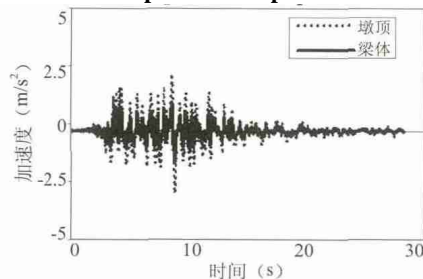


图 6 工况 2 下简化模型的加速度响应

Fig.6 Acceleration response of simplified model in case 2

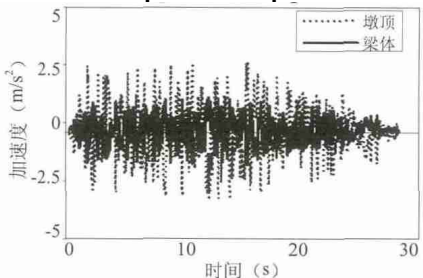


图 7 工况 1 下 FEM 的加速度响应

Fig.7 Acceleration response of FEM in case 1

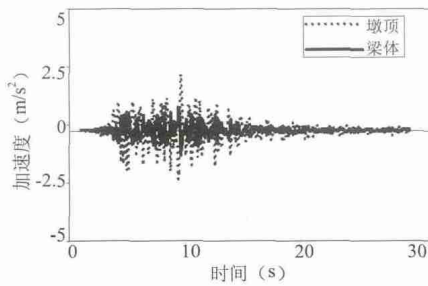


图 8 工况 2 下 FEM 的加速度响应

Fig.8 Acceleration response of FEM in case 2

### 3 墩高度对桥梁隔震性能的影响

由于近海交通工程中的桥墩高度需随通航和海底地势变化而改变, 该非通航孔桥桥墩高度在 2~40m 之间。根据该桥梁桥墩的设计高度, 采用隔震连续梁桥的简化模型与控制变量法, 研究桥墩高度由 2~40m 逐步改变情况下, 隔震桥梁结构的动力特性的变化。由图 9 可知, 随桥墩高度逐渐增加, 桥墩质心高度不断增加, 桥梁结构整体周期延长, 隔震桥的第二阶自振周期趋近于第一阶自振周期。

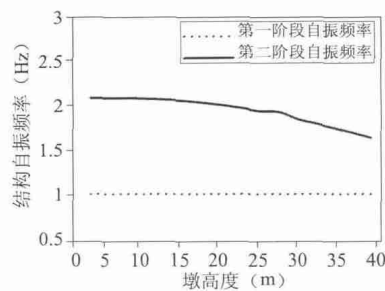


图 9 结构自振频率与桥墩高度的关系

Fig.9 Relations between natural frequency of structure I and pier height

不同墩底剪力和弯矩绝对最大值与桥墩高度的关系见图 10 和图 11, 由图可知随着桥墩高度的增加, 墩底剪力和墩底弯矩的最大绝对值都不断增大。当桥墩高度较低时, 墩底剪力和弯矩的增幅明显; 随着桥墩高度的增加, 墩底剪力的增幅趋缓。

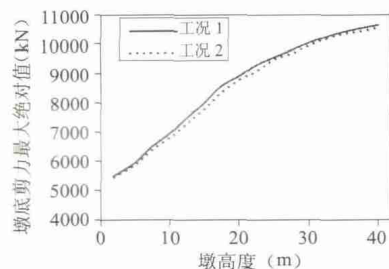


图 10 墩底剪力绝对最大值与桥墩高度的关系

Fig.10 Relations between absolute maximum value of shear force and pier height

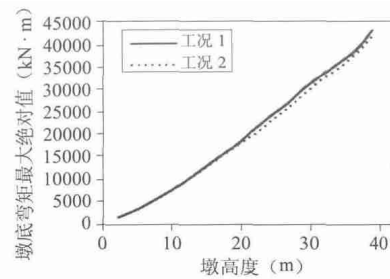


图 11 墩底弯矩绝对最大值与桥墩高度的关系

Fig.11 Relations between absolute maximum value of moment and pier height

令  $a_n = \omega_n^2 / \omega_0^2$  ( $n=1, 2$ ) 可得隔震桥梁模型的振型向量:

$$\{\varphi^n\} = \{1 \quad 1 - a_n\}^T \quad (7)$$

进一步可得振型参与质量系数:

$$Y_n = \left( \sum_{i=1}^2 m_i \varphi_i^n \right)^2 / \left[ (m_1 + m_2) \sum_{i=1}^2 m_i \varphi_i^{n2} \right] \quad (8)$$

$$= [\gamma + (1 - a_n)]^2 / \left\{ (1 + \gamma) [\gamma + (1 - a_n)^2] \right\}$$

式 (8) 为所选择振型的振型参与质量之和与结构在相应方向总质量之比。

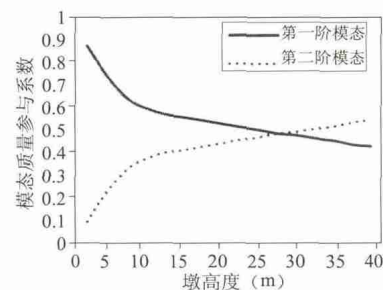


图 12 模态质量参与系数与桥墩高的关系

Fig. 12 Relations between modal mass participation factor and pier height

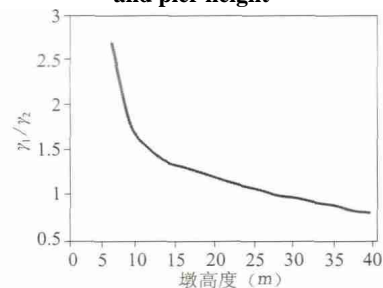


图 13 前两阶模态质量参与系数比与桥墩高的关系

Fig. 13 Relations between coefficient ratio of first two order modal mass participation factor and pier height

不同桥墩高度情况下前两阶模态质量参与系数如图 12 所示, 前两阶模态质量参与系数之比如图 13。随桥墩高度的不断增加, 隔震结构的第一阶模态

质量参与系数不断降低,第二阶模态质量参与系数不断升高。当桥墩高度较低时(低于10m),桥墩高度对隔震桥梁振型模态质量参与系数的影响显著;随着桥墩高度的增加(大于10m),桥墩高度对隔震桥梁振型模态质量参与系数的影响趋缓;当桥墩高度达到30m左右,前两阶模态质量参与系数的数值大致相同。

#### 4 结论

以我国近海交通工程某隔震连续梁桥为研究对象进行建模分析,研究结果显示随着桥墩高度的不断增加,桥墩质量也不断增加,桥梁基本周期逐渐延长,隔震桥的第二阶自振周期趋近于第一阶自振周期。当桥梁桥墩高度较低时,隔震模态的振型参与质量系数较大,非隔震模态的振型参与质量系数较小。随着桥墩高度增加,前两阶振型参与质量系数发生变化,隔震模态的振型参与质量系数不断减少,非隔震模态的振型参与质量系数不断增加。由此可见桥梁隔震性能和效果随桥墩高度降低而不断增加。总之,对于低墩桥梁而言,桥墩高度对桥梁隔震性能影响显著,随着桥墩高度的不断增加,桥墩高度对桥梁隔震性能仍有影响,但其影响程度逐渐下降。

#### 参 考 文 献

- [1] 王丽, 阎贵平, 孙立. LRB隔震桥梁减震效果分析[J]. 工程力学, 2003, 20(5): 124-129(Wang Li, Yan Guiping, Sun Li. Analysis of seismic response of isolated bridges with LRB [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20 (5) : 124-129 (in Chinese))
- [2] Hwang J S, Chiou J M. An equivalent linear model of lead-rubber seismic isolation bearings[J]. Engineering Structures, 1996, 18(7): 528-536
- [3] Hwang J S, Chang K C, Tsai M H. Composite damping ratio of seismically isolated regular bridges[J]. Engineering Structures, 1997, 19(1): 55-62
- [4] Iemura H, Takahashi Y, Chen Y. Control of seismic energy partitioning of bridge piers with sliding rubber bearing[C]//Proceedings of the 2nd World Conference on Structure Control, 1998: 941-948
- [5] Kelly J M. Aseismic base isolation: review and bibliography[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1986, 5(4): 202-216
- [6] Buckle I G, Mayes R L. Seismic retrofit of bridges using mechanical energy dissipators[C]//Proceedings of the Fourth US National Conference on Earthquake Engineering. Palm Springs, California, 1990: 305-314
- [7] Turkington D H, Carr A J, Cooke N, et al. Design method for bridges on lead-rubber bearings[J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 115(12): 3017-3030
- [8] Majid E, Mohsen T Z. Effect of seismic isolation systems on dynamic behaviour of bridges under earthquake loading[C]//Proceedings of 11th WCEE, 1996
- [9] 朱东生, 劳远昌, 沈大元, 等. 隔震桥梁设计参数的研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(5): 52-56 (Zhu Dongsheng, Lao Yuanchang, Shen Dayuan, et al. Research on some design parameters of seismically-isolated bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(5) : 52-56 (in Chinese))
- [10] 王志强. 隔震桥梁分析方法及设计理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2000 (Wang Zhiqiang. Research on methods of analysis and design for isolated bridges [D]. Shanghai: Tongji University, 2000 (in Chinese))
- [11] 李建中, 袁万城. 连续梁桥减, 隔震体系的优化设计[J]. 土木工程学报, 1998, 31(3): 47-54 (Li Jianzhong, Yuan Wancheng. Optimal design of seismic isolation system for continuous bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(3): 47-54 (in Chinese))
- [12] 范立础, 胡世德, 叶爱君. 大跨度桥梁抗震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001
- [13] 周锡元, 李中锡. 规则型隔震桥梁结构的简化分析方法[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 53-58 (Zhou Xiyuan, Li Zhongxi. Simplified formulas for seismic-isolation regular bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34 (3) : 53-58 (in Chinese))
- [14] 黄建文, 朱晞, 张静. 隔震桥梁结构的简化反应分析及设计参数研究[J]. 北方交通大学学报, 2004, 28(1): 17-22 (Huang Jianwen, Zhu Xi, Zhang Jing. Simplified response analysis and research on design parameters of seismically isolated bridges [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2004, 28 (1) : 17-22 (in Chinese))
- [15] 王丽, 阎贵平, 孙立. LRB隔震桥梁减震效果分析[J]. 工程力学, 2003, 20(5) : 124-129 (Wang Li, Yan Guiping, Sun Li. Analysis of seismic response of isolated bridges with LRB [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20 (5) : 124-129 (in Chinese))
- [16] 杨风利. 铁路桥梁减隔震设计方法及设计参数研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007 (Yang Fengli. Study on design method and parameters for seismically isolated railway bridges [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007 (in Chinese))
- [17] 周锡元, 李中锡. 规则型隔震桥梁结构的简化分析方法

- [J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 53-58(Zhou Xiyuan, Li Zhongxi. Simplified formulas for seismic-isolation regular bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34 (3) : 53-58(in Chinese))
- [18] Hwang J S, Sheng L H, Gates J H. Practical analysis of bridges on isolation bearings with bi-linear hysteresis characteristics[J]. Earthquake Spectra, 1994, 10(4): 705-727

吴 迪(1978-),男,博士,副研究员。主要从事结构减震控制方面的研究。

黄泽军(1991-),男,硕士研究生。主要从事工程抗震方面的研究。

周福霖(1939-),男,硕士,教授,中国工程院院士。主要从事结构减震控制方面的研究。

崔 杰(1957-),男,博士,教授。主要从事地下结构抗震方面的研究。