

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2011.12.012

# 千米级斜拉桥的减震控制

周大兴, 闫维明, 陈彦江, 刘昌鹏

(北京工业大学 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 结合工程结构被动控制领域的研究成果及进展(以大行程板式铅剪切阻尼器为例),对罕遇地震作用下千米级斜拉桥的减震控制进行了分析研究。通过对比分析大行程板式铅剪切阻尼器、粘滞阻尼器和弹性连接三者的数值计算结果发现,只要设计时阻尼器的相关参数选择恰当,大行程板式铅剪切阻尼器的减震效果要优于弹性连接,且与粘滞阻尼器相当。同时,分析了在正常运营阶段温度作用下减震装置对结构的影响。计算结果表明,大行程板式铅剪切阻尼器对结构的附加内力并不会比弹性连接引起的附加内力大,在运营阶段对结构的影响较小。大行程板式铅剪切阻尼器不仅满足了结构减震控制中对行程的要求,而且使用寿命长,构造简单,成本低,在千米级斜拉桥的减震控制中具有良好的应用前景。

**关键词:** 桥梁工程; 减震控制; 非线性时程分析; 大行程板式铅剪切阻尼器

中图分类号: U441+.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2011)12-0071-05

## Damping Control of Kilometer-scale Cable-stayed Bridge

ZHOU Daxing, YAN Weiming, CHEN Yanjiang, LIU Changpeng

(Beijing Laboratory of Earthquake Engineering and Structure Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The structural damping control of a kilometer-scale cable-stayed bridge under rare earthquake was researched based on the latest achievements (e. g., the lead shear damper with long stroke) of the passive control for engineering structures. By comparing the computation results of lead shear damper, viscous damper and elastic link, it is found that the damping effect of lead shear damper with long stroke is better than that of elastic link and close to that of viscous damper as long as the parameters are chosen properly. The effects of different damping devices on the structure under the temperature effect in the serviceability limit stage were also analysed. The calculation result shows that the additional internal force induced by lead shear damper with long stroke is not larger than that induced by elastic link, and it has less impact on the structure. Because lead shear damper with long stroke could meet the requirement for displacement and its structure is simple, its service life is long and the processing cost is low, this kind of damper has a good prospect in damping control of a kilometer-scale cable-stayed bridge.

**Key words:** bridge engineering; damping control; nonlinear time history analysis; lead shear damper with long stroke

## 0 引言

21世纪初,世界相继诞生2座主跨跨径超过1 000 m以上斜拉桥,其中我国的苏通大桥主跨达到1 088 m。在一个多地震的国家,建设千米级斜拉

桥,桥梁的抗震设计与减震控制是一个很重要的研究课题。

在静力阶段的优化分析中,千米级斜拉桥一般会采用全漂浮或半漂浮体系,以减小温度等作用的不利影响。另外,由于投资大,震后修复非常困难,

收稿日期: 2011-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(90715032,50978009)

作者简介: 周大兴(1982-),男,山东胶州人,博士研究生。(dxzhou@emails.bjut.edu.cn)

国内外学者和工程师普遍认为千米级斜拉桥在设计地震作用下应该保持弹性<sup>[1]</sup>，而采用全漂浮或半漂浮体系，同样有助于减小主塔的内力响应。不过，这样的结构体系在强震作用下主梁会产生很大的纵向位移，不利于结构抗震性能的提高。为了控制结构在地震作用下的位移响应，文献 [2] 分析了不同的塔梁连接装置（弹性连接和粘滞阻尼器）对地震位移的控制效果，并给出了相应的建议。

随着减震控制技术不断发展，新的被动控制装置不仅减震效果明显，而且构造简单，制造成本低。本研究以大行程板式铅阻尼器为例，通过分析发现，其在千米级斜拉桥的地震位移控制中，控制效果显著。

## 1 千米级斜拉桥的减震控制技术

目前国内外大跨度桥梁的塔（墩）、梁之间设置的减震装置主要有2类：弹性连接装置和阻尼器。

弹性连接装置主要有大型橡胶支座、钢绞线拉索等，通过提供弹性刚度来减小地震作用下主梁的纵向位移。例如，日本多多罗斜拉桥在塔梁间设置了大型橡胶支座；日本名港中大桥在塔梁间设纵向钢绞线拉索。另外，文献 [2] 以苏通大桥为例，通过分析发现，当弹性刚度小于  $1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}$  时，位移对刚度比较敏感，之后位移随刚度的变化则要平缓得多。综合考虑塔底弯矩和梁端位移的变化后认为弹性刚度为  $1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}$  是一个比较合适的取值。在桥梁工程中，粘滞阻尼器应用广泛。例如，美国在金门大桥的抗震加固中，增设了阻尼器<sup>[3-4]</sup>；我国的苏通大桥在塔梁之间设置粘滞阻尼器<sup>[5]</sup>，等等。粘滞阻尼器在蠕变变形作用下，产生的抗力接近于零，这使得该装置的引入不会影响到结构的正常使用功能<sup>[6]</sup>。但由于粘滞阻尼器的密封问题、加工成本高等因素，又限制了它进一步推广与应用。

阻尼器作为一种耗能装置主要分为4类：摩擦阻尼器（friction dampers）、粘弹性阻尼器（viscoelastic dampers）、粘滞液体阻尼器（viscous fluid dampers）和金属阻尼器（metallic dampers）<sup>[7]</sup>。铅阻尼器作为金属阻尼器的一种，其特点是使用寿命长、性能稳定、构造简单。其中圆筒式的铅挤压阻尼器易于实现“大行程”，在房屋建筑工程和桥梁工程中已有应用<sup>[8-9]</sup>。而板式铅剪切阻尼器比铅挤压阻尼器构造更为简单，成本更低，但目前其行程较小，无法满足结构对大变形的要求（如10 cm以上）。

笔者所在的课题组通过对传统的板式铅剪切阻

尼器的改进，成功地研发出阻尼力稳定的大行程板式铅阻尼器（行程20 cm），图1是阻尼器的试验照片。通过试验，发现阻尼器（屈服力为100 kN）的力学性能较稳定，见图2。下面以该类型板式阻尼器为例，研究其在千米级斜拉桥地震位移控制中的应用。

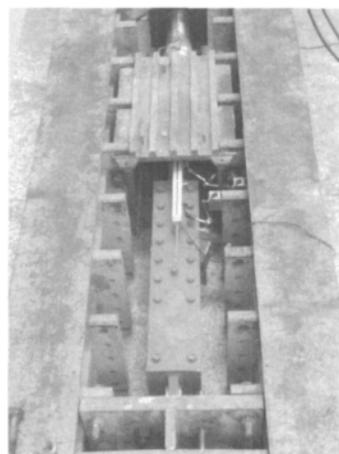


图1 铅剪切阻尼器的低周往复试验

Fig. 1 Low frequency cyclic test of lead shear damper

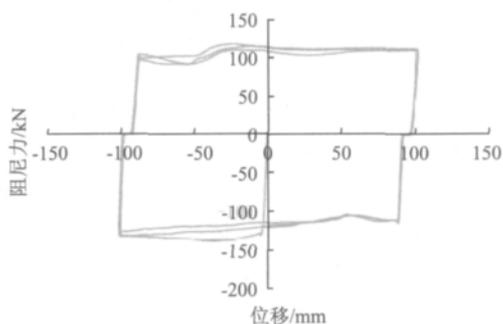


图2 铅阻尼器滞回曲线

Fig. 2 Hysteretic curve of lead shear damper

## 2 千米级斜拉桥减震控制分析

### 2.1 桥梁概况

某一大跨度双塔双斜索面斜拉桥，边跨设置3个桥墩，桥跨布置为：100 m + 100 m + 300 m + 1 088 m + 300 m + 100 m + 100 m = 2 088 m，见图3。主塔采用倒Y形混凝土桥塔（塔高约300 m），材料为C50钢筋混凝土结构。中塔柱和下塔柱各有2个塔柱，中塔柱在顶部合并为一个塔柱，上塔柱为索塔锚固区。塔柱断面为箱形断面，顺桥向塔柱由上至下为直线变化。每个索塔在钢箱梁下部设置一道横梁。

钢箱梁为扁平流线形钢箱梁，轮廓尺寸为：含风嘴全宽41.0 m，不含风嘴顶板宽35.4 m，底板宽

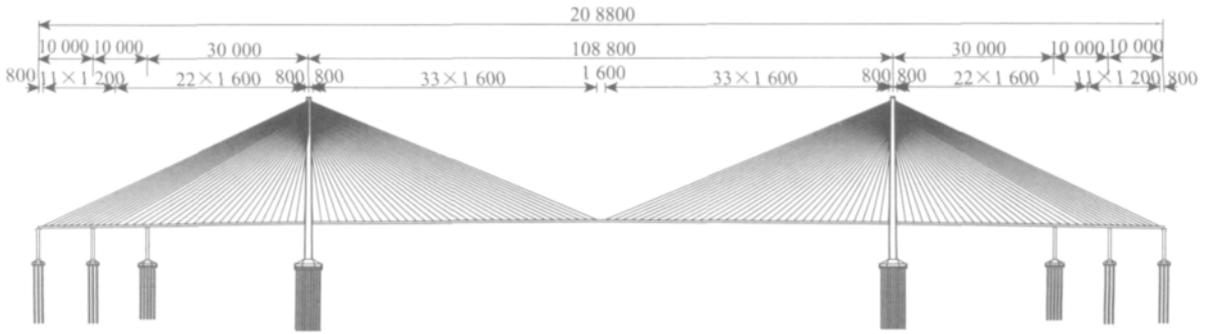


图 3 桥跨布置 (单位: m)

Fig. 3 Layout of bridge spans (unit: m)

为 (9.0 + 23 + 9.0) m, 中心线处高度 4.0 m。

### 2.2 地震动输入

根据该桥的设计地震动参数, 选取了 3 组人工地震波, 采用纵向 + 竖向的地震动输入方式。其中纵向人工加速度时程的峰值约为 0.166g, 竖向人工加速度时程的峰值约为 0.11g。其中 1 条纵向人工加速度时程见图 4, 3 条地震波反应谱的放大系数与设计反应谱的对比见图 5。

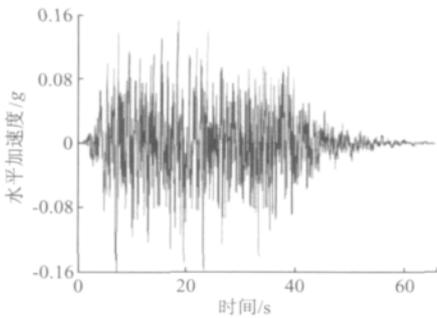


图 4 人工加速度时程 1

Fig. 4 Artificial acceleration time history 1

### 2.3 分析模型与结果

在分析中, 主梁、塔、边墩采用梁单元, 斜拉索采用桁架单元, 并考虑垂度效应和恒载引起的几何刚度的影响。

另外, 在输入相同的情况下, 嵌固模型 (冲刷线下 3 ~ 5 倍桩径处嵌固) 和集中质量模型的结果较为接近<sup>[10-11]</sup>, 因此本研究采用冲刷线下 4 倍桩径处嵌固的方式近似考虑桩 - 土相互作用的影响。墩、塔与主梁间的约束关系见表 1。其中墩梁间的滑动采用理想弹塑性模型, 滑动摩擦系数取为 0.02, 屈服力为上部结构自重与摩擦系数的乘积, 屈服位移取为 1 mm。

表 1 边界条件

Tab. 1 Boundary conditions

约束方向	过渡墩与主梁	辅助墩与主梁	主塔与主梁
纵桥向	滑动	滑动	无、阻尼或弹性连接
横桥向	约束	约束	约束
竖向	约束	约束	—

板式铅剪切阻尼器滞回的本构关系可以用 Bouc - Wen 模型模拟<sup>[12]</sup>, 该模型公式如下

$$F = \frac{F_y}{u_y} [\alpha u + (1 - \alpha) z], \quad (1)$$

$$\dot{z} = \dot{u} [a - |z|^n b \text{sign}(\dot{u}z) + \gamma], \quad (2)$$

式中,  $z$  为滞变位移;  $u$  为阻尼器变形;  $u_y$  为阻尼器的屈服位移;  $F_y$  为阻尼器的屈服力;  $\alpha$  为阻尼器屈服后的第 2 段刚度与弹性刚度的比值;  $a$ 、 $b$ 、 $\gamma$ 、 $n$  为模型的形状常数, 当  $a = b + \gamma = 1.0$  时, 可用于模拟铅阻尼器或软钢阻尼器的滞回曲线; 参数  $n$  控制阻尼器弹性刚度到屈服后刚度之间过渡弧段的曲率半径,  $n$  越大曲率半径越小, 则 Bouc - Wen 模型越接近双线性模型。根据试验数据, 板式铅剪切阻尼器的初始弹性刚度可取为  $F_y/u_y = 1 \times 10^6 \text{ kN/m}$ ,  $\alpha \approx$

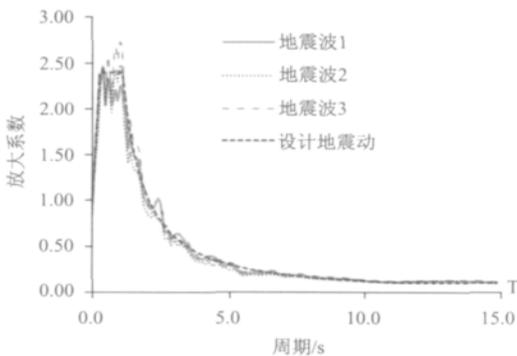


图 5 动力放大系数对比

Fig. 5 Comparison of dynamic magnification factor

$0, b=0.9, \gamma=0.1, n=10$ 。

苏通大桥在每个塔梁结合处设置了4个粘滞阻尼器(全桥共8个)<sup>[5]</sup>。本研究在每个塔梁结合处设置8个大行程板式铅阻尼器。在布置位置和数量一定的情况下,减震效果大小与铅阻尼器的屈服力有着直接关系,所以阻尼器的屈服力需要结合预期的减震目标通过试算确定。本研究对不同屈服力的阻尼器(分别为1 000、1 500 kN和2 000 kN)的减震效果进行对比分析。从图6可知,随着阻尼器屈服力的增加,主梁梁端位移逐渐减小。

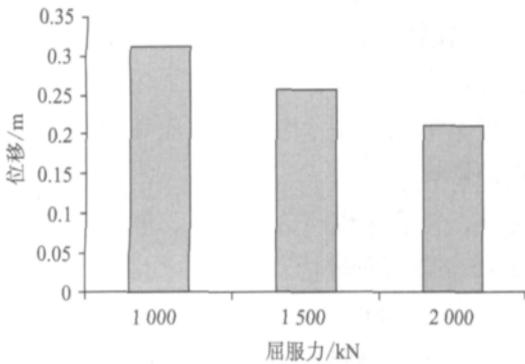


图6 梁端纵向位移(不同屈服力的阻尼器)

Fig. 6 Displacements of beam end in longitudinal direction (dampers with different yield forces)

另外,铅阻尼器与弹性连接类似,在正常运营阶段会对结构产生影响。在整体升温作用下(混凝土升温 $20^{\circ}\text{C}$ ,钢升温 $32^{\circ}\text{C}$ ),塔底弯矩和连接产生的附加轴力见表2。从表2中可以看出,在升温作用下,随着阻尼器屈服力的增加,阻尼器对结构的影响增大。当阻尼器的屈服力为 $2\,000\text{ kN}$ 时,其产生的影响与弹性连接(刚度为 $1.0 \times 10^5\text{ kN/m}$ )相当。因此,大行程铅剪切阻尼器的最优屈服力可取为 $1\,500\text{ kN}$ 。

表2 整体升温作用下的结构内力

Tab. 2 Internal force of the structure under the action of rising temperature

屈服力/kN	塔底弯矩/( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )	附加轴力/kN
1 000	$4.39\text{E}+05$	8 000
铅阻尼器 1 500	$5.37\text{E}+05$	12 000
2 000	$6.36\text{E}+05$	16 000
Elastic_Link	—	$6.37\text{E}+05$
		16 040

通过分析可知,减震前后梁端最大位移分别为 $0.85\text{ m}$ 和 $0.26\text{ m}$ ,减震率为 $69\%$ ,见图7。

单塔柱底弯矩从减震前的 $2.05\text{E}+06\text{ kN} \cdot \text{m}$ 降

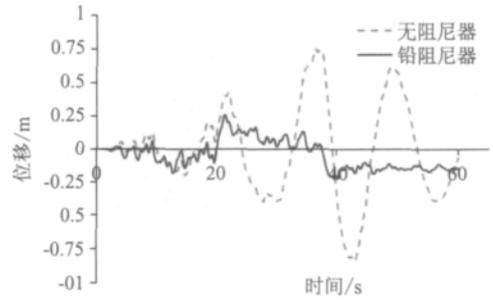


图7 梁端纵向位移

Fig. 7 Displacements of beam end in longitudinal direction

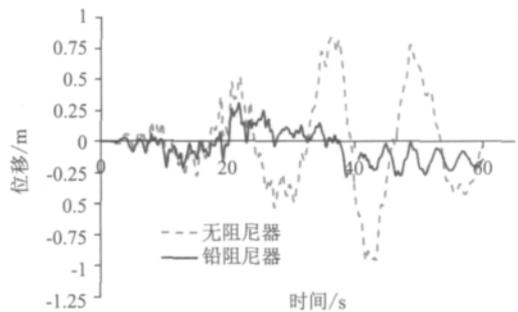


图8 塔顶纵向位移

Fig. 8 Displacements of pylon top in longitudinal direction of  $1.28\text{E}+06\text{ kN} \cdot \text{m}$ , 减震率为 $37.5\%$ ,见图9。

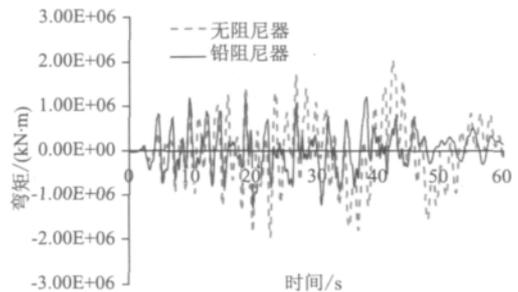


图9 塔底弯矩

Fig. 9 Bending Moment at bottom of pylon  
图10为分析过程中的铅阻尼器滞回曲线。

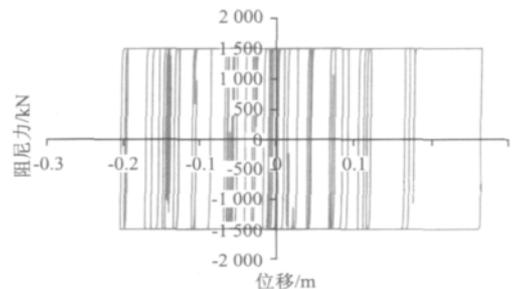


图10 铅阻尼器的滞回曲线

Fig. 10 Hysteretic curve of lead shear damper

为了进一步研究大行程板式铅阻尼器的减震效果, 分别以弹性连接和粘滞阻尼器方案进行了对比分析。采用弹性连接方案时, 每个塔梁结合处设置一个弹性连接, 其弹性刚度为  $1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}^{[2]}$ ; 采用粘滞阻尼器方案时, 每个塔梁结合处设置 4 个粘滞阻尼器, 每个阻尼器的速度指数  $\alpha = 0.4$ , 阻尼系数  $C = 3\,750 \text{ kN} \cdot (\text{m/s})^{-0.4}^{[5]}$ 。

从表 3 中可以看出, 采用铅阻尼器时, 结构的塔底弯矩和梁端位移均比弹性连接的小。从结构响应来看, 当弹性连接的刚度为  $1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}$  时, 塔底弯矩和梁端位移的卓越频率均为  $0.220 \text{ Hz}$ , 此时弹性连接类似于锁定装置。而采用文中的阻尼器布置方案, 铅阻尼器的减震效果与粘滞阻尼器的减震效果相当 (图 11 为粘滞阻尼器的滞回曲线)。从不同装置总的弹性力或阻尼力来看, 弹性连接的最大 ( $2.83\text{E} + 04 \text{ kN}$ ), 铅阻尼器的次之 ( $1.20\text{E} + 04 \text{ kN}$ ), 粘滞阻尼器的最小 ( $1.03\text{E} + 04 \text{ kN}$ )。另外, 粘滞阻尼器并不会对正常运营阶段的桥梁产生附加影响。

表 3 不同连接装置下的结构响应

Tab. 3 Structural responses with different junction devices

塔梁间的连接装置	塔底弯矩/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )	梁端位移/ $\text{m}$	弹性力或阻尼力/ $\text{kN}$
无装置	$2.05\text{E} + 06$	0.85	—
铅阻尼器 (1 500 kN)	$1.28\text{E} + 06$	0.26	$1.20\text{E} + 04$
弹性连接	$2.22\text{E} + 06$	0.32	$2.83\text{E} + 04$
粘滞阻尼器	$1.38\text{E} + 06$	0.27	$1.03\text{E} + 04$

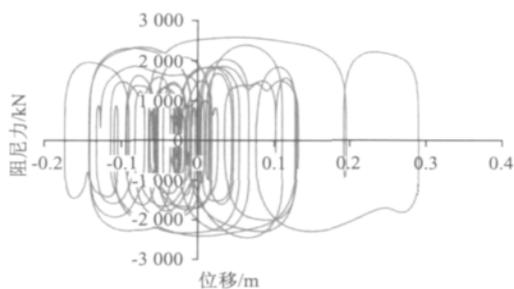


图 11 粘滞阻尼器的滞回曲线

Fig. 11 Hysteretic curve of viscous damper

综上所述, 粘滞阻尼器的整体性能最好, 大行程铅剪切阻尼器的次之, 弹性连接的最差。但考虑到粘滞阻尼器的制造成本与后期的维护 (如易漏油等), 大行程板式铅剪切阻尼器具有更高的性价比。

### 3 结论

结合被动控制领域的研究成果及最新进展, 对地震作用下千米级斜拉桥的减震控制进行了研究。

通过分析结果可得出如下结论:

(1) 粘滞阻尼器、大行程板式铅剪切阻尼器以及弹性连接装置均可以有效地减小千米级斜拉桥的梁端位移。但采用阻尼器时, 塔底的纵向弯矩较小, 有利于结构抗震性能的提高。

(2) 在正常运营阶段, 大行程板式铅剪切阻尼器会对结构产生一定影响, 但只要相关参数选择恰当, 其影响并不会比采用弹性连接装置时大。考虑到板式铅剪切阻尼器构造简单, 成本低, 后期的维护也比粘滞阻尼器简单, 故大行程板式铅剪切阻尼器具有更高的性价比。

因此, 大行程板式铅剪切阻尼器在千米级斜拉桥的减震控制中具有良好的应用前景。

参考文献:

References:

- [1] 张喜刚, 陈艾荣. 千米级斜拉桥: 结构体系、性能与设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.  
ZHANG Xigang, CHEN Airong. Kilometer-scale Cable Stayed Bridge: Structure System, Performance and Design [M]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [2] 叶爱君, 胡世德, 范立础. 超大跨度斜拉桥的地震位移控制 [J]. 土木工程学报, 2004, 37 (12): 38-43.  
YE Aijun, HU Shide, FAN Lichu. Seismic Displacement Control for Super-long-span Cable-stayed Bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37 (12): 38-43.
- [3] CHARLES S P E, SENIOR P. Seismic Retrofit of the Golden Gate Bridge [C] // Eleventh World Conference on Earthquake Engineering. Acapulco, Mexico: Elsevier Science Ltd., 1996: 2021-2030.
- [4] 王克海. 桥梁抗震研究 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.  
WANG Kehai. Study on Bridge Seismic Resistance [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007.
- [5] 邬都, 赵君黎, 李贞新. 阻尼器在我国长大桥梁建设中的应用简介 [J]. 公路, 2009 (5): 112-114.  
WU Du, ZHAO Junli, LI Zhenxin. Introduction of Application of Dampers in Long and Huge Bridge Construction in China [J]. Highway, 2009 (5): 112-114.
- [6] 王志强, 胡世德, 范立础. 东海大桥粘滞阻尼器参数研究 [J]. 中国公路学报, 2005, 18 (3): 37-42.  
WANG Zhiqiang, HU Shide, FAN Lichu. Research on Viscous Damper Parameters of Donghai Bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18 (3): 37-42.

(下转第 87 页)

- Transportation Research and Development, 2007, 24 (8): 52-56.
- [10] 甘应爱, 田丰, 李维铮, 等. 运筹学 [M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2005  
GAN Ying'ai, TIAN Feng, LI Weizheng, et al. Operational Research [M]. 3rd. ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2005
- [11] 许树柏. 层次分析法原理 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.  
XU Shubai. The Theory of Analytic Hierarchy Process [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1988.
- [12] 马继兵, 蒲黔辉, 宋大伟, 等. 既有中 (下) 承式混凝土拱桥耐久性模糊贴近度的综合评价 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (2): 79-84  
MA Jibing, PU Qianhui, SONG Dawei, et al. Fuzzy Nearness Comprehensive Assessment of Durability of Existing Half-through and Through Concrete Arch Bridges [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (2): 79-84.
- [13] 善德山, 李乔, 翁燕. 层次分析法在混凝土斜拉桥性能评价中的应用 [J]. 桥梁建设, 2009 (2): 76-78.  
SHAN Deshan, LI Qiao, WENG Yan. Application of Analytic Hierarchy Process to Performance Assessment of Existing Concrete Cable-stayed Bridges [J]. Bridge Construction, 2009 (2): 76-78.
- [14] 张誉, 蒋利学, 张伟平, 等. 混凝土结构耐久性概论 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003.  
ZHANG Yu, JIANG Lixue, ZHANG Weiping, et al. Durability of Concrete Structures [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2003.

(上接第 75 页)

- [7] SOONG T T, DARGUSH G F. Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering [M]. London: Wiley & Sons, 1997.
- [8] 苏亮. 剪切型和挤压型铅阻尼器研究及其工程应用 [D]. 北京: 北京工业大学, 2009.  
SU Liang. Research and Engineering Application of Lead Shear and Extrusion Dampers [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009.
- [9] 周云, 周福霖, 邓雪松. 铅阻尼器的研究和应用 [J]. 世界地震工程, 1999, 15 (1): 53-61  
ZHOU Yun, ZHOU Fulin, DENG Xuesong. Research on Lead Damper and Its Applications [J]. World Information on Earthquake Engineering, 1999, 15 (1): 53-61.
- [10] 刘伟岸, 叶爱君, 王斌斌. 大跨度桥梁桩基抗震简化模式的分析与探讨 [J]. 结构工程师, 2007, 23 (1): 52-55.  
LIU Weian, YE Aijun, WANG Binbin. Discussion on Seismic Simplified Modes of Pile Foundation in Long-span Bridges [J]. Structural Engineers, 2007, 23 (1): 52-55.
- [11] 燕斌. 桥梁桩基础抗震简化模型比较研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007.  
YAN Bin. Study on Simplified Models of Bridge Pile-foundation Subjected to Earthquake [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [12] 周云. 金属耗能减震结构设计 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2006.  
ZHOU Yun. Damping Structural Design with Metal Energy Dissipation [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2006.