

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.003

# 单塔地锚式悬索桥减震阻尼器参数分析

伍隋文, 李建中

(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:**单塔地锚式悬索桥结构轻便, 可以充分利用两侧的岩体来分担荷载。而在地震作用下, 容许纵桥向滑动的单塔地锚式悬索桥过大的纵向位移给桥梁的安全性及实用性造成严重威胁。以通麦特大桥为工程背景, 采用非线性时程法研究液压黏滞阻尼器对单塔地锚式悬索桥的减震效果, 同时对其进行参数分析。研究表明, 液压黏滞阻尼器可以有效地控制梁端纵向位移。且当阻尼指数  $a$  不变时, 主梁纵向位移随着阻尼系数  $C$  的增大不断减小, 但减幅不大, 而桥塔及基础主要控制截面的地震响应随着阻尼系数  $C$  的增大变化不大。

**关键词:**单塔地锚式悬索桥; 液压黏滞阻尼器; 减震设计; 非线性时程分析

**中图分类号:**422.5   **文献标志码:**   **文章编号:**1674-4764(2013)S1-0009-04

## The Parameter Analysis of the Hydraulic Viscous Dampers in Ground-Anchored Suspension Bridge with Single Tower

Wu Suiwen, Li Jianzhong

(Department of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

**Abstract:** Ground-anchored suspension bridge owns a neat structure as well as can use the stiff rock condition at the ends of the bridge to share the forces. While under the effects of earthquake motion, the large longitudinal displacement of the girder poses great threat on the safety and serviceability of the bridge. By the way of nonlinear time-history analysis, this paper emphasizes the effect of hydraulic viscous damper on the seismic reduction of ground-anchored Suspension Bridge with single tower and the damper parameter analysis based on Tongmai Bridge. The study indicates that the hydraulic viscous damper can effectively control the longitudinal displacement of the girder. And when the damping index coefficient  $a$  remains constant, the longitudinal displacement of the girder decreases with the increase of the damping coefficient  $C$ , but the decreasing magnitude is small. On the other hand, the variations of the coefficients of the hydraulic damper have little influence on the forces of critical sections of the tower and foundation.

**Key words:** ground-anchored suspension bridge with single tower; hydraulic viscous damper; seismic reduction design; nonlinear time-history analysis

单塔地锚式悬索桥常用于两岸地势较高, 地质条件较好的高山峡谷地区。与单塔自锚式跨悬索桥相比, 单塔地锚式悬索桥可以充分利用两侧良好的地基条件来分担荷载, 同时可以避免主缆对梁过大的轴压力。就结构特性而言, 单塔悬索桥由于边跨主缆的垂度较小, 主缆长度相对较短, 对中跨荷载变形控制更为有利。随着国家经济的飞速发展, 大跨度桥梁的建设日益增多, 悬索桥由于其缆索承重的特点而具有超长的跨度, 使其在技术经济上优于其它承重结构, 因而受到广大的青睐。作为生命线工程的桥梁, 抗震设计已成为桥梁设计中不可或缺的部分, 地震作用直接影响着其结构的安全可靠性。

纵向可滑动的单塔地锚式悬索桥属于柔性结构, 在地震动输入下, 结构的内力相对会较小, 然而由于在纵向缺少必要的约束, 强震下梁端会发生很大的纵向位移, 梁端过大的位移可能会导致主梁与桥台或者相邻跨梁体的碰撞, 使整个

结构丧失整体性, 因此需要对结构进行减震设计, 即需在桥梁的纵向布置适当的阻尼器。目前, 桥梁结构上所使用的阻尼器的种类较多, 主要有铅压阻尼器、钢阻尼器、摩擦阻尼器以及液压黏滞阻尼器等。其中, 运用比较广泛且技术比较成熟, 适用于大跨度桥梁的是液压黏滞阻尼器<sup>[3-4]</sup>。

目前国内外学者对单塔悬索桥的减震设计进行了很多研究<sup>[3-7]</sup>, 但大多数是针对于自锚式悬索桥, 而对于单塔地锚式悬索桥减震设计的研究还是一个空白。以青藏公路通麦特大桥为背景, 基于非线性的时程分析方法, 探讨液压黏滞阻尼器的对单塔地锚式悬索桥的减震效果, 并对其进行参数分析。

### 1 液压阻尼器力学模型

液压黏滞阻尼器的基本构造由活塞、油缸及节流孔组成, 如图 1 所示。所谓节流孔是指具有比油缸截面面积小的

收稿日期: 2013-02-25

作者简介: 伍隋文(1989-), 男, 硕士, 主要从事桥梁抗震研究, (E-mail) seismic1989@gmail.com.

流通过路。这类装置是利用活塞前后压力差使油流通过节流孔时产生压力差从而产生阻尼力。



图1 液压阻尼器原理图

液压黏滞阻尼器从力学特性上可划分为线性的和非线性的黏滞阻尼器,其回复力特征可表示为<sup>[8]</sup>

$$F = C \operatorname{sgn}(v) |v|^a$$

式中: $F$ 是阻尼力; $C$ 是阻尼常数; $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数, $a$ 是阻尼指数;(其值范围在 $0.1 \sim 2.0$ ,在工程实践中常用值一般在 $0.1 \sim 1.0$ 范围内)。

当液压阻尼器的阻尼力与相对速度成线性比例时,称为线性阻尼器,其恢复力特性如图2中 $a=1.0$ 的曲线所示,形状为椭圆。当阻尼力与相对速度不成线性比例时,称为非线性阻尼器,其恢复力特性如图2中 $a=0.4$ 的曲线所示,形状趋近于矩形。

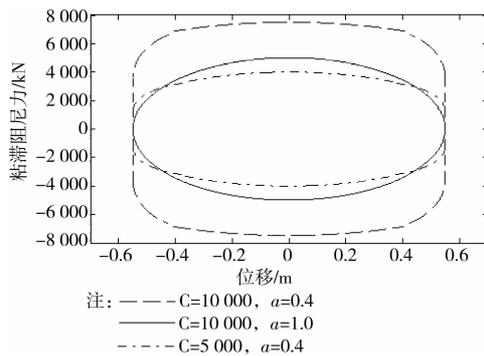


图2 黏滞阻尼器滞回环

液压阻尼器同其他减振隔震装置相比,其特点有<sup>[8]</sup>:

1) 黏滞阻尼器装置当阻尼器参数 $a=1$ 参数时,其阻尼力与速度成线性比例,因此在塔墩达到最大变形时,黏滞阻尼器的阻尼力反而最小,接近于零;在塔墩变形速度最大时,黏滞阻尼器的阻尼力达到最大,而此时桥墩变形最小,其内力也最小,因此,黏滞阻尼器并不显著增加桥墩的受力。

2) 在温度产生的变形作用下,弹塑性阻尼装置、摩擦阻尼装置要求必须在克服弹塑性阻尼装置的屈服力或摩擦力后才允许自由变形;而黏滞阻尼器在蠕变变形下,产生的抗

力接近于零,这使得该装置的引入不会影响到桥梁结构的正常使用功能。

从阻尼器的计算公式可知,黏滞阻尼器参数选取的不同,阻尼器对结构响应也不相同。因此,需对结构阻尼器的情况进行结构响应分析,即对阻尼器参数 $C$ 、 $a$ 参数进行敏感性分析,研究参数变化对结构响应的变化规律,为阻尼器的参数设计提供依据。

## 2 动力计算模型

### 2.1 工程概况

以通麦特大桥为背景进行研究分析。通麦特大桥为主跨256 m的单塔地锚式悬索桥,其中主梁为钢桁梁且直接支撑于承台与桥台上,主塔塔高为59.5 m,采用钢筋混凝土箱形结构。主索呈双索面布置,塔底采用群桩基础且桩基嵌固在基岩上。桥型总体布置图见图3。

### 2.2 有限元模型

采用Sap2000有限元程序,建立动力空间计算模型。有限元计算模型以顺桥向为 $X$ 轴,横桥向为 $Y$ 轴,竖向为 $Z$ 轴。主桁、鞍座以及桥塔采用空间的梁单元模拟,主缆、吊杆采用空间桁架单元。承台模拟为质点,赋予承台质量,二期恒载模拟为线性分布质量。塔底采用群桩基础且桩基打入岩层深度为25 m,模型中采用两弹簧来模拟基础与岩石的相互作用,弹簧刚度按照《JTG D63-2007 公路桥涵地基与基础设计规范》计算得到。主缆及吊杆的几何非线性通过预先输入 $P-\Delta$ 力进行刚度修正。

### 2.3 边界条件

主梁纵向可滑动,主梁与塔、桥台之间设置单向滑动支座,横向设置抗风支座。边界条件的设置如表1所示。

表1 边界及连接条件

位置	$X$	$Y$	$Z$	$\theta_x$	$\theta_y$	$\theta_z$
主缆成都侧锚固点	1	1	1	1	1	1
主缆拉萨侧锚固点	1	1	1	1	1	1
主缆与桥塔	1	1	1	0	0	0
主塔处支座	0	1	1	0	0	1
桥台处支座	0	1	1	0	0	1
拉萨侧散索鞍座底	1	1	1	1	0	1
桥台	1	1	1	1	1	1

注: $X$ 为纵桥向, $Y$ 为横桥向, $Z$ 为竖向;0表示自由,1表示主从或固结。

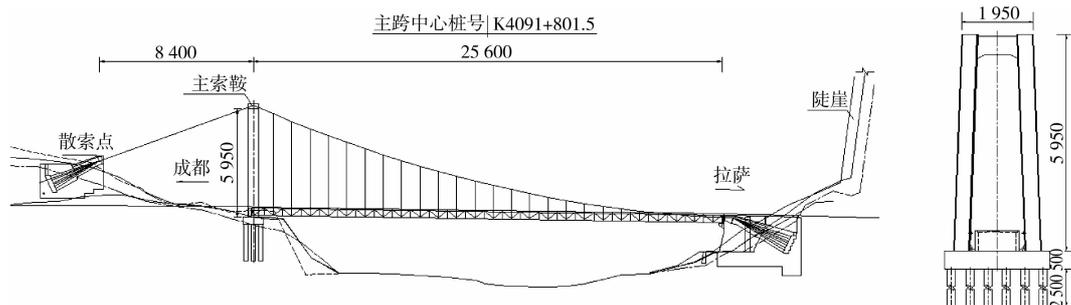


图3 通麦桥总体布置图(单位:cm)

## 2.4 动力特性分析

经过动力分析,该模型的第一阶振型为主梁纵飘,周期为 5.94 s。由此可见纵向可滑动地锚式悬索桥为柔性结构,因此不需隔震设计而需进行减震设计。结构的一阶纵飘振动如图 4 所示。

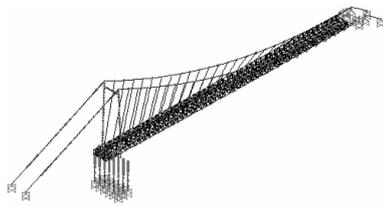


图 4 一阶纵飘图

## 3 地震动输入

笔者只关心结构在强震作用下的响应,因此采用地震输入为 50a 超越概率 2% (简称 E2) 地震下的时程。桥址场地的地震动特性按照中国地震局地壳应力研究所提供的《通麦安评报告》确定。《通麦安评报告》提供了 3 条 50a 超越概率 2% 工程场地地表地震加速度时程曲线。图 5 为其中一条时程曲线示意图。

计算 E2 地震作用下的地震响应,取该设防水平下相应的 3 条地震动时程曲线分别输入所得计算结果的最大值。计算时考虑纵向+竖向输入,根据《公路桥梁抗震细则》(JTG/T B02-01—2008),基岩场地条件下,竖向设计加速度时程取为水平向设计加速度时程的 0.65 倍。

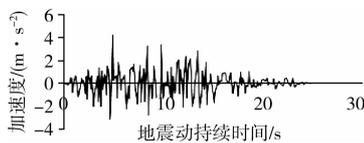


图 5 E2 水平加速度时程曲线

## 4 结果分析

通麦特大桥拟在桥塔及桥台处各设置两个纵桥向阻尼器,且每个阻尼器的参数均相同。为了更好的研究液压阻尼器参数  $C$  与  $a$  对漂浮式悬索桥减震效果的影响规律,选阻尼系数  $C=0\sim 3\ 000$ ,指数  $a=0.2\sim 0.4$  及 1,将  $C$  与  $a$  进行组合得到 13 个计算工况。

基于上述计算工况,讨论了主梁端纵向位移,塔顶纵向位移,塔底、基础受力以及阻尼器受力与纵向位移随阻尼器参数  $C$  与  $a$  的变化规律。

### 4.1 纵向位移响应分析

图 6(a)~6(c) 分别给出了在阻尼器取不同参数值时,主梁梁端及塔顶纵向位移图。由图 6(a)、6(b) 可知,液压阻尼器有效地减小了主梁端纵向位移。当  $C=1\ 000$ , $a$  取 0.2、0.3、0.4、1 时,主塔处梁端纵向位移降为未设置阻尼器的 16.6%、16.1%、17.8%、28.5%,此时梁端纵向位移降幅最小。当指数  $a$  不变时,随着阻尼系数  $C$  的增大,梁端纵向位移减小,但减小幅度不大。当  $C$  不变时,当指数  $a$  取值在 0.2~0.4 之间时,梁端纵向位移波动较小,而当指数  $a$  取 1 时,较  $a=[0.2\sim 0.4]$  的位移有显著增加,因此  $a$  取为 1,阻尼

器耗能不理想,指数  $a$  取为 0.2~0.4 是较为合理。如图 6(c) 所示,当设置阻尼器时,塔顶位移会有所增加,但是增幅不大,最大的是  $C=1\ 000$ 、 $a=0.2$  时,增幅为 7.3%。且当指数  $a$  不变时,随着阻尼系数  $C$  的增大,塔顶纵向位移的变化趋势不明显。当阻尼系数  $C$  不变时,随着  $a$  的增大,塔顶纵向位移的变化不大,且变化趋势不明显。因此由于主梁直接支撑于承台上,液压黏滞阻尼器的设置对塔顶的位移影响不明显。

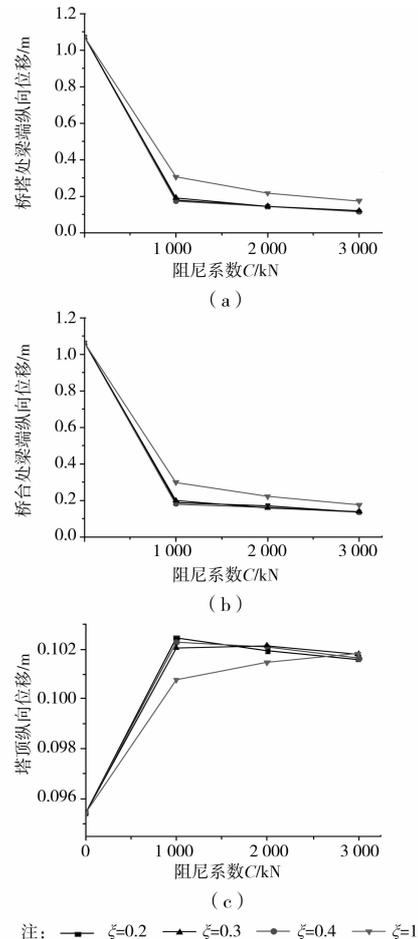


图 6 阻尼器参数对梁端及塔顶纵向位移影响图

### 4.2 塔底受力分析

图 7(a)~7(c) 给出了在阻尼器取不同的参数值时,塔底轴力,剪力及弯矩变化图。当设置液压黏滞阻尼器时,塔底的地震动轴力变化较大,最大的减幅在  $C=1\ 000$ 、 $a=0.2$  时,为 41%;剪力有所减小,但减小值不大,最大减幅为  $C=3\ 000$ 、 $a=0.2$  时的 2%;而弯矩有所增加,增幅不大,最大增幅在  $C=1\ 000$ 、 $a=0.2$  时的 8.7%。因此,液压黏滞阻尼器的耗能作用对塔底的动轴力有较为显著的影响,而对于塔底的剪力与弯矩影响不大。当指数  $a$  不变时,随着  $C$  的增大,塔底地震动轴力,弯矩几乎不变,剪力减小,减幅不大;当  $C$  不变时,随着  $a$  的增大,轴力、弯矩几乎不变,剪力增大,但增幅很小。

### 4.3 基础受力分析

图 8(a)~8(c) 给出了液压黏滞阻尼器取不同参数值时,最不利单桩的轴力、剪力及弯矩变化图。最不利单桩的轴力、剪力,弯矩设置阻尼器工况较无阻尼器的变化最大值分别为:1.3%、16.4%、2.3%。因此液压黏滞阻尼器的设置对于基础内力的影响不大。

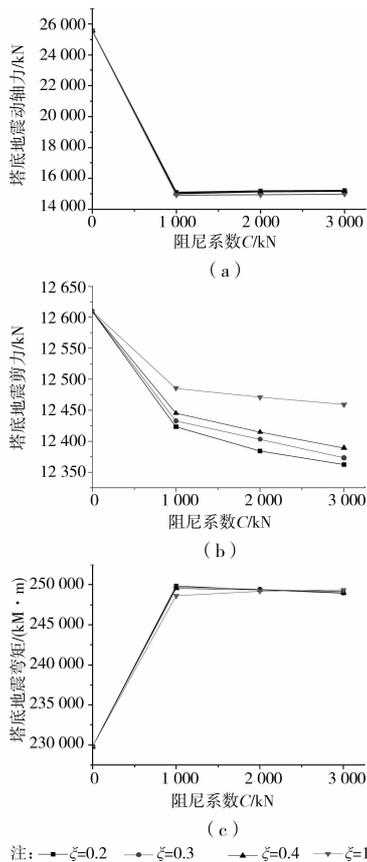


图 7 阻尼器参数对塔底地震响应的影响

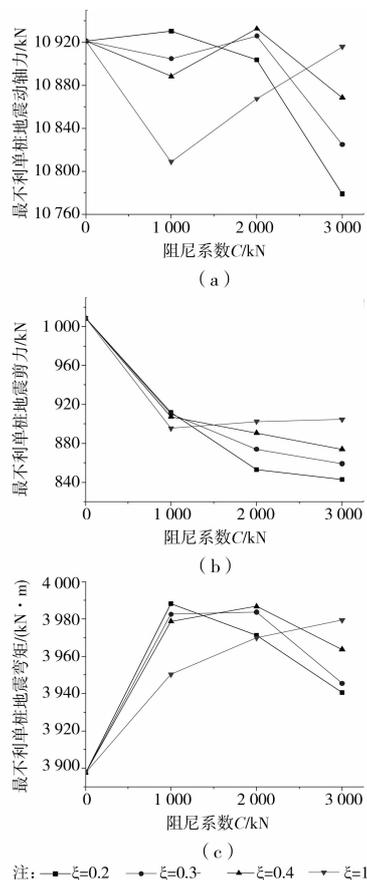


图 8 阻尼器参数对最不利单桩内力的影响

#### 4.4 阻尼器的地震响应

图 9(a)~9(d)给出了阻尼器取不同值时,桥塔及桥台处阻尼器的阻尼力及纵向位移的变化图。由图 9(a)、9(b)可知,当  $a$  不变时,阻尼器阻尼力关于阻尼系数  $C$  近似成线性变化,而阻尼器位移则是不断减小。当  $C$  不变,随着  $a$  的增加,阻尼器的阻尼力不断减小。当  $a=0.2\sim 0.4$  时,阻尼器位移几乎不变,而当  $a=1$  时,阻尼器的位移远远大于  $a=0.2\sim 0.4$  的情况。

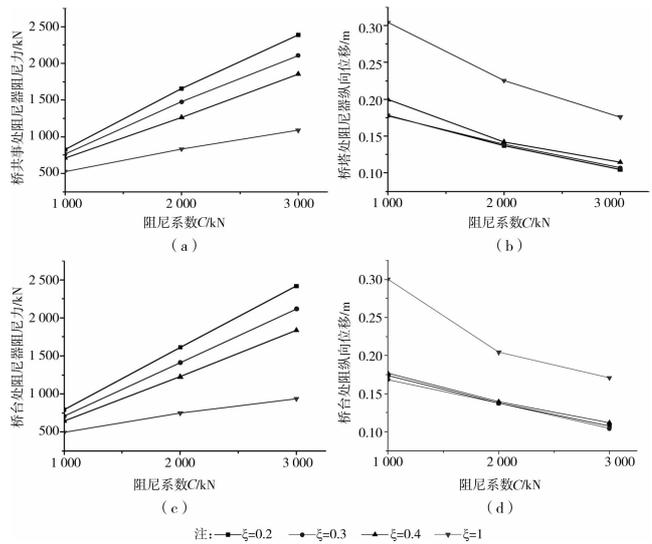


图 9 阻尼器参数对阻尼器阻尼力与位移的影响

### 5 结论

- 1) 液压黏滞阻尼器可以有效地减小纵向可滑动的单塔地锚式悬索桥梁端的纵向位移,同时能减小塔底的地震动轴力,而不影响最不利单桩内力及塔底剪力与弯矩。
- 2) 纵向液压黏滞阻尼器的设置对塔顶的纵向位移影响不大。
- 3)  $a$  值不变时,梁端及阻尼器纵向位移随着  $C$  值的增大不断减小,但减幅不大。 $C$  不变时,梁端及阻尼器纵向位移在  $a=[0.2\sim 0.4]$  时几乎不变,而在  $a=1$  时增幅比较大,因此在实际工程中,推荐  $a$  取较小值。
- 4) 阻尼参数  $C$  与  $a$  的取值对单跨地锚式悬索桥的塔底内力及最不利单桩内力均影响不大。
- 5) 当  $a$  不变时,阻尼器的阻尼力与  $C$  近似成线性变化。而当  $C$  不变时,随着  $a$  的增加,阻尼器的阻尼力则不断减小。

#### 参考文献:

[1] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.  
 [2] 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.  
 [3] 张辉. 独塔自锚式悬索桥的减震研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.  
 [4] 康仕彬. 自锚式悬索桥的地震特性及减震方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.  
 [5] Qiu W L, Kou C H. Study on the seismic behavior of self-anchored suspension bridges [J]. Journal of Marine Science and Technology, 202, 20(4): 384-391.

(下转第 16 页)

震性能,该部位应该采取一定的措施加强。

3)2个配置抗冲切锚栓的板柱边节点达到极限荷载时的最小层间位移角为 $3/200$ ,满足我国现行规范的限值要求;配置锚栓的两个试件延性为 $3.7\sim 5.3$ ,达到了中等延性水平。

#### 参考文献:

- [1] Tian Y. The dissertation behavior and modeling of reinforced concrete slab-column connections[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2007.
- [2] 舒兆发. 板柱结构边柱节点的受冲切承载力[J]. 湖南大学学报, 2007, 34(1): 19-23.
- [3] 刘文斑, 黄承逵, 姚谦峰. 混凝土 T 形边柱的板柱连接抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(2): 47-54.
- [4] 代伟明, 刘子华. 板柱节点拟静力试验的层间位移角与剪重比关系[J]. 工程抗震与加固改造, 2009, 31(2): 39-45.
- [5] 舒兆发. 板柱结构的中柱节点传递剪力和不平衡弯矩的冲切承载力[J]. 湖南大学学报, 2003, 30(5): 36-41.
- [6] 段洪涛. 钢筋混凝土板柱节点抗震性能的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [7] 代伟明. 板柱节点抗震性能及设计方法研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2008.
- [8] Tian Y, James O J. Strength evaluation of interior slab-column connections [J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(6): 692-700.
- [9] Edward A, Susanto T. Edge-column slab connections under gravity and lateral loading [J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(5): 541-551.
- [10] Gerd B, Walter H D. Influence of slab thickness on punching shear strength [J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(2): 180-187.
- [11] Tian Y, James O J. Behavior of slab-column connections of existing flat-plate structures [J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(5): 561-569.
- [12] Widiyanto, Oguzhan B. Two-way shear strength of slab-column connections: reexamination of ACI 318 Provisions [J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(2): 160-170.
- [13] 李林. 板柱边节点抗震性能试验研究及有限元分析[D]. 重庆大学, 2011.
- [14] R. 帕克, T. 波利, 著. 钢筋混凝土结构[M]. 秦文钺等, 译. 重庆: 重庆大学出版社, 1985.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范 GB50010-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

(编辑 吕建斌)

(上接第 12 页)

- [6] Jiang M, Qiu W L, Yu B C. Research on seismic response reduction of self-anchored suspension bridge [C]//Proceedings of the International symposium on Computational and Structural Engineering (CSE2009), Shanghai, China, 2009: 209-216.
- [7] Gao Y, Yuan W C, Zhou M, et al. Seismic analysis and design optimization of a self-anchored suspension bridge [C]//Lifeline Earthquake Engineering in a Multi-hazard Environment (TCLEE2009), ASCE, Oakland, California, United States, 2009: 153-164.
- [8] 叶爱君, 管仲国. 桥梁抗震[M]. 2 版, 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [9] JTG/T B02-01-2008 公路桥梁抗震细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.

(编辑 梁远华)