

文章编号: 1002-0268 (2011) 05-0092-06

中小跨径双柱式高墩桥梁横系梁对 抗震性能的影响

兰 峰, 王克海

(交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 通过对地震中双柱墩桥梁的震害调查分析总结认为在双柱式高墩之间加设横系梁对桥梁下部结构在地震作用下的受力状态具有很大影响。采用 SAP2000 有限元软件对某跨径为 30 m 双柱式高墩连续梁桥进行模态分析和反应谱分析, 分别讨论了横系梁的数量、不同的布置方式以及不同的截面几何尺寸对桥墩在设计地震动作用下的各主要关键截面处内力的影响。计算结果表明: 在双柱式高墩之间加设横系梁对桥梁下部结构的内力分配影响很大, 尤其是在地震作用下, 合理设计横系梁能够有效的提高横桥向刚度, 调整下部结构内力, 并且先于墩身进入塑性工作状态消耗地震动能量输入来提高桥梁的抗震性能。对不同模型计算结果进行比较分析可知在 $0.3H$ 和 $0.8H$ 处布置一道相对于墩身刚度为 $0.3 \sim 0.6$ 的横系梁, 对桥梁结构的地震响应最为有利, 可为双柱式高墩桥梁的设计提供一定的参考。

关键词: 桥梁工程; 横系梁; 反应谱; 抗震性能; 双柱式高墩

中图分类号: U441

文献标识码: A

Influence of Collar Beam of Double Column High-rise Pier Bridge with Short Span on Seismic Performance

LAN Feng, WANG Kehai

(Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: By analyzing and summarizing the seismic damage of double column bridge with high-rise piers, it is believed that collar beams designed between double column high-rise piers have great influence on the strained condition of substructure suffered from earthquake action. SAP2000, one of finite element softwares, was used to perform modal analysis and response spectrum analysis for a 30 m long double columns high-rise pier continuous beam bridge. The number, location and section dimension of collar beam which have influence on internal force at critical cross-sections of piers in design earthquake action were discussed. The analysis result reveals that collar beams contribute a lot to the distribution of internal force of the substructure, especially when suffered earthquake action, well-designed collar beams can effectively improve the transverse stiffness, adjust the internal force of the substructure, and dissipate earthquake energy when the collar beams work in a plastic state before the column piers to improve the seismic performance of the whole bridge. By comparing the results of different finite element models, it is concluded that when one collar beam whose stiffness is about $0.3 \sim 0.6$ to the column pier is fixed at $0.3H$ and $0.8H$, it is very beneficial to the seismic performance of bridge. This work may be valuable for the design of double column high-rise pier bridge.

收稿日期: 2010-09-28

基金项目: 科技部国际科技合作项目 (2009DFA82480); 交通运输部西部交通建设科技项目 (2009318223094; 200831800098)

作者简介: 兰峰 (1986-), 男, 江西新余人, 硕士研究生, 从事桥梁抗震分析研究. (lanfeng1994@sina.com)

Key words: bridge engineering; collar beam; response spectrum; seismic performance; double column high-rise pier

0 引言

我国西部地区的公路桥梁多位于地形复杂的山区, 而山区高速公路桥梁具有曲线、大纵坡、高墩等特点, 故在桥型选择上通常采用中小跨径的钢筋混凝土或预应力混凝土梁桥^[1-5], 下部结构通常采用双柱式轻型桥墩。这种桥梁结构的特点是上部结构跨径小, 下部结构能够很好的满足传递上部结构的荷载效应; 双柱式桥墩构造简单, 节省了钢筋和混凝土用量, 自重轻, 结构稳定性好, 施工技术成熟, 外观轻盈美观^[6]。

西部山区的高速公路桥梁大部分处于地震烈度较高的地区, 跨越山谷河流通常采用双柱式高墩中小跨径桥梁的结构形式。在罕遇地震动作用下桥墩墩身往往产生不同的病害。对于没有在双柱之间加设横系梁的结构, 最常见的破坏是桥墩墩底由于所受弯矩较大而发生弯曲型破坏, 表现为墩底混凝土压碎, 纵筋屈曲, 如图 1 所示。而加设横系梁的桥墩大部分是横系梁在与墩柱连接处形成塑性铰, 通过材料的塑性变形消耗地震动能量的输入, 保护桥墩墩身不受破坏, 如图 2 所示。横系梁的刚度、布置方式和数量都会影响到双柱墩的抗震性能和破坏模式, 通过图 2 与图 3 的比较发现, 合理设计横系梁能够使横系梁在地震动作用下起到“保险丝”单元的作用, 保护墩身结构的安全。因此研究在双柱墩之间合理设计横系梁来提高桥墩的抗震性能具有现实意义。



图 1 墩底弯曲型破坏

Fig. 1 Bending failure at the bottom of column piers

1 结构形式

本桥由于地处山沟地带, 在跨径布置上采用 5×30 m 的连续梁, 主梁截面采用 5 片窄翼缘 T 梁拼装然后现浇部分翼缘板形成整体式主梁截面。下部结构采



图 2 横系梁 1

Fig. 2 Collar beam 1



图 3 横系梁 2

Fig. 3 Collar beam 2

用圆形双柱式桥墩, 墩身直径 1.5 m, 墩身中心间距 6.6 m, 墩高分别为 P1 (35 m)、P2 (42 m)、P3 (52.4 m)、P4 (46.7 m), 有限元模型如图 4 所示。

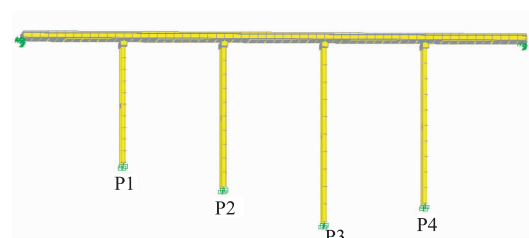


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

2 横系梁的设置

2.1 双柱式框架墩的力学模型

在结构力学中计算超静定结构形式的框架结构^[5], 力学图示如图 5 所示, 其典型的弯矩图如图 6 所示。

从图 6 来看, 有横系梁的双柱式框架墩身弯矩比无横系梁时小, 并且横系梁越多墩身弯矩越小。因此, 对于高墩, 适当的增加横系梁有利于墩身弯矩分配, 减小在地震作用下的损伤, 有效的保护桥梁上部结构不致倒塌和倾覆。

2.2 分析模型

在本桥下部结构中, 双柱与盖梁形成门式框架

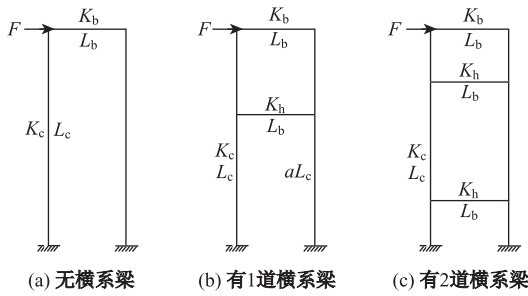


图5 框架结构力学图
Fig.5 Frame mechanical models

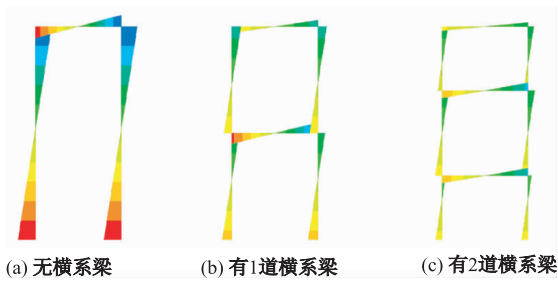


图6 典型的弯矩图
Fig.6 Typical moment diagrams

结构体系，在横桥向地震作用下上部结构传递下来的横桥向水平力作用到盖梁上，会引起墩底产生很大的弯矩。而在双柱之间加设横系梁能够有效的减小此弯矩值^[7-9]。横系梁刚度的选择对墩身弯矩分布有很大的影响。横系梁刚度过小，起不到调整双柱式框架墩内力的作用；横系梁刚度过大，则可能导致墩身弯矩在横系梁附近非常大，易导致墩身承载力不足而发生弯曲破坏，同时横系梁的材料使用也不经济。

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62-2004)中第9.6.5条规定，柱式墩台横系梁截面高度和宽度分别取0.8~1.0倍和0.6~0.8倍的墩柱直径或长边边长。本桥圆形墩柱直径为1.5 m，故取横系梁的高1.2 m，宽1 m。

模型1：考虑所有桥墩只加设1道横系梁。根据文献[5]中横系梁布置规律，将横系梁布置在距墩底0.6H时能够使框架结构受力最合理。增加横系梁后的有限元模型如图7所示。

模型2：由于各桥墩较高，考虑加设2道横系梁，横系梁分别布置在距墩底0.3H和0.7H的位置，截面仍采用1.2×1.0 m矩形截面。

3 动力特性

桥梁结构的振动周期、振型等是反映结构动力

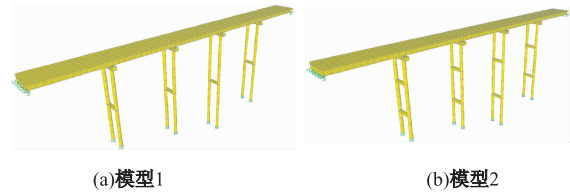


图7 有横系梁有限元模型

Fig.7 Finite element models with collar beams

特性的模态参数，是评价桥梁动力性能的重要依据^[10-11]，不同模型的周期对比如图8所示。通过对无横系梁模型、有横系梁模型1、有横系梁模型2进行模态分析，得到这3种桥梁结构的动力特性，取前10阶模态如表1、2所示。

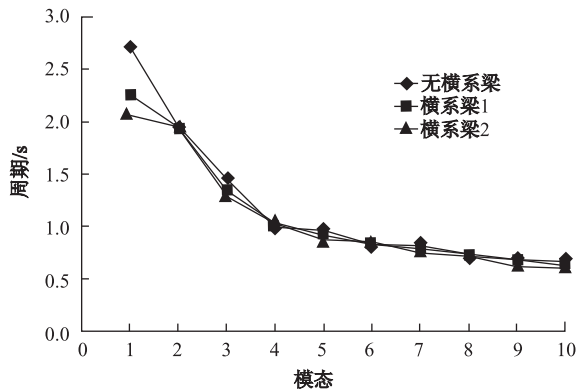


图8 不同模型的周期对比

Fig.8 Comparison of periods of different models

表1 周期与振型比较

Tab.1 Comparison of periods and vibration modes

模态	无横系梁模型		有横系梁模型1		有横系梁模型2	
	周期	振型	周期	振型	周期	振型
1	2.723	正对称横向弯曲	2.259	正对称横向弯曲	2.067	正对称横向弯曲
2	1.952	纵漂	1.954	纵漂	1.960	纵漂
3	1.451	反对称横向弯曲	1.341	反对称横向弯曲	1.289	反对称横向弯曲
4	0.997	P3 墩纵弯	1.032	P3 墩纵弯	1.047	P3 墩纵弯
5	0.961	正对称横向弯曲	0.921	正对称横向弯曲	0.883	正对称横向弯曲
6	0.828	P4 墩纵弯	0.858	P4 墩纵弯	0.872	P4 墩纵弯
7	0.813	反对称横向弯曲	0.790	反对称横向弯曲	0.748	P2 墩纵弯
8	0.710	P2 墩纵弯	0.734	P2 墩纵弯	0.728	反对称横向弯曲
9	0.684	P4 墩侧弯	0.677	P4 墩侧弯	0.624	P4 墩侧弯
10	0.661	P3 墩对称侧弯	0.635	主梁横向弯曲， P2、P3 侧弯	0.607	P1 墩纵弯

从3种模型的周期及振型的比较分析中可知，横系梁不影响桥梁结构的纵向动力特性，而对桥梁横向受力性能影响较大。与无横系梁模型相比，模型1的第1阶振动周期减小了17%，有横系梁模型2的第1阶振动周期减小了24.1%。第1阶振动周期的减小是由于横系梁增强了横桥向的刚度，提高了双柱式桥墩的整体受力能力。

表 2 横桥向振型贡献率比较

Tab.2 Comparison of transverse modal contribution rates

模态	无横系梁模型		有横系梁模型 1		有横系梁模型 2	
	振型 贡献率	累加振型 贡献率	振型 贡献率	累加振型 贡献率	振型 贡献率	累加振型 贡献率
1	0.837 3	0.837	0.827 7	0.828	0.809 8	0.810
2	0.000 0	0.837	0.000 0	0.828	0.000 0	0.810
3	0.001 4	0.839	0.004 2	0.832	0.005 9	0.816
4	0.000 0	0.839	0.000 0	0.832	0.000 0	0.816
5	0.038 6	0.877	0.033 0	0.865	0.045 1	0.861
6	0.000 0	0.877	0.000 0	0.865	0.000 0	0.861
7	0.015 8	0.893	0.028 3	0.893	0.000 0	0.861
8	0.000 0	0.893	0.000 0	0.893	0.011 1	0.872
9	0.002 6	0.896	0.005 9	0.899	0.001 8	0.874
10	0.000 1	0.896	0.031 7	0.931	0.000 0	0.874

由于横系梁的加设只对横桥向有影响, 对 3 种模型横桥向振型贡献率进行比较, 如表 2 所示。由表 2 中数据显示 1 阶振型贡献率数随着横系梁的增多而减小, 有一道横系梁模型横桥向振动收敛快, 在前 10 阶振型贡献率达到 90% 以上, 而有两道横系梁模型的横向高阶振型较多, 说明两道横系梁对桥墩框架结构的刚度提高明显。

4 反应谱分析

根据《公路桥梁抗震设计细则》JTG/T B02 - 01-2008 和桥址处的地震动加速度参数, 得到 50 a 超越概率 10%、阻尼比为 5% 的场地加速度反应谱, 如图 9 所示, 并将其按照横桥向输入到以上 3 个模型中进行反应谱分析, 得到各墩身以及横系梁梁端的最大弯矩值, 其结果如表 3 及图 10 所示。

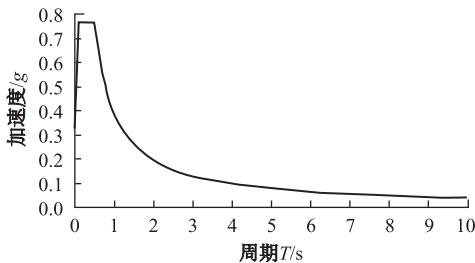


图 9 设计地震反应谱

Fig. 9 Designed response spectrum

表 3 墩身最大弯矩以及横系梁梁端最大弯矩 (单位: kN · m)

Tab.3 Maximum moments of piers and collar beam ends (unit: kN · m)

项目	P1 墩	P2 墩	P3 墩	P4 墩	横系梁
无横系梁	6 884.06	8 129.12	6 798.37	5 670.35	- -
模型 1	6 680.06	8 984.02	8 367.1	6 731.89	11 174.94
模型 2	5 515.62	7 600.31	7 408.19	6 007.33	10 299.71

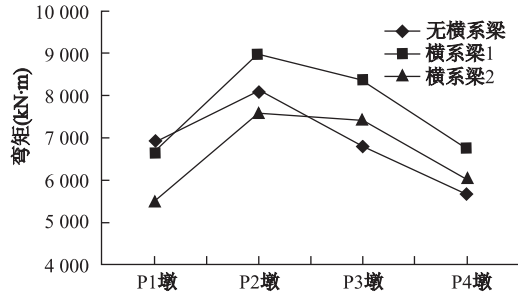


图 10 桥墩墩身弯矩值比较

Fig. 10 Comparison of moments of piers

从以上数据显示, 高墩框架结构加设一道横系梁不能降低墩身弯矩, 而且横系梁梁端弯矩较大; 加设两道横系梁对结构受力是有利的, 而且横系梁梁端弯矩较大。

5 横系梁的布置

通过反应谱分析可知加设两道横系梁对改善桥墩受力情况非常有利, 而两道横系梁的相对位置也影响到横系梁作用的发挥。针对横系梁在不同位置进行了反应谱分析计算, 得到各墩身以及横系梁两端的最大弯矩值如表 4 所示。

表 4 横系梁不同布置的分析结果 (单位: kN · m)

Tab.4 Analysis results of different layouts of collar beams (unit: kN · m)

模型	横系梁 相对位置	P1 墩	P2 墩	P3 墩	P4 墩	横系梁
1	0.1H/0.9H	6 737.61	8 235.28	6 950.61	5 904.93	6 231.26
2	0.2H/0.8H	6 345.69	8 312.89	7 440.02	6 291.66	8 886.51
3	0.3H/0.6H	5 546.32	7 662.76	7 567.25	6 096.59	9 947.47
4	0.3H/0.7H	5 515.62	7 600.3	7 408.19	6 007.33	10 299.71
5	0.3H/0.8H	5 584.41	7 515.51	6 907.36	5 825.17	10 454.09
6	0.4H/0.6H	6 550.32	9 168.74	8 944.93	7 187.96	9 418.63
7	0.4H/0.7H	6 589.42	9 249.35	9 014.41	7 277.34	10 652.91
8	0.4H/0.8H	6 415.04	8 869.34	8 543.64	6 948.95	11 235.97
9	0.5H/0.7H	7 278.98	10 154.21	9 719.58	7 945.41	9 826.43
10	0.5H/0.8H	7 208.02	9 967.22	9 490.75	7 782.73	10 780.17

从目前已有的横系梁震害经验来看, 在设计地震作用下横系梁由于抗弯抗剪能力不足而发生弯曲破坏或剪切破坏, 使得结构的振动周期延长, 减小了作用在桥梁结构上的地震力; 同时横系梁在破坏的过程中进入塑性, 能够消耗一部分地震动能量, 形成一个耗能机制, 对保护墩柱和提高桥梁整体抗震性能是有利的^[12-13]。因此加设的两道横系梁要求既能有效的调整墩身弯矩分布, 同时在设计地震作用下能够发生弯曲破坏, 从而达到延长结构自振周

期,消耗地震动能输入。从图中可以看出模型5,即当两道横系梁的位置分别在距墩底 $0.3H$ 和 $0.8H$ 时对全桥结构最有利。

6 横系梁的刚度设置

由于双柱与盖梁形成门式框架结构体系是多次超静定结构,横系梁的刚度相对于墩柱刚度的大小直接影响到结构内力的分配。横系梁的刚度过小,在内力分配过程中承担的内力较小,甚至可能出现在地震作用下墩柱已经损坏而横系梁却没有损伤的情况,这种情况下横系梁基本上没有发挥作用;横系梁刚度过大,在内力分配过程中梁端承担的内力较大,可能导致横系梁与墩柱连接的节点处墩身发生破坏,修复工作非常困难。因此选择适中的横系梁刚度,使之在常遇地震下处于弹性范围内,有效的调整框架内力,减小墩身弯矩;在设计地震或罕遇地震下能够先于墩身进入塑性状态,通过横系梁的损伤来消耗一部分地震动能量的输入,减轻下部承重结构的地震反应,保护桥梁结构的安全^[14-15]。

根据前面的分析,将不同截面尺寸的横系梁分别设置在 $0.3H$ 和 $0.8H$ 处进行分析比较,计算结果如表5所示。

表5 横系梁不同截面尺寸下内力比较(单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

Tab.5 Comparison of internal forces in collar beams with different section dimensions (unit: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

截面尺寸 (高/宽)	P1墩	P2墩	P3墩	P4墩	横系梁	刚度比
						(横系梁/ 墩身)
0.9/0.9	5 803.61	7 438.89	6 764.16	5 602.64	7 010.68	0.22
1.0/0.9	5 636.62	7 342.65	6 798.38	5 622.47	8 176.14	0.301 8
1.0/1.0	5 589.63	7 323.91	6 826.72	5 644.79	8 591.59	0.335 4
1.2/0.9	5 482.01	7 350.49	6 872.24	5 673.78	10 078.37	0.521 5
1.2/1.0	5 584.41	7 515.51	6 907.36	5 825.17	10 454.09	0.579 5
1.2/1.2	5 772.64	7 814.74	7 166.21	6 098.75	11 112.97	0.695 4
1.5/1.0	6 115.56	8 372.99	7 761.98	6 622.25	12 369.75	1.131 8
1.5/1.2	6 263.22	8 605.93	8 008.68	6 841.92	12 881.24	1.358 2
1.8/1.2	6 546.21	9 058.68	8 495.03	7 279.11	13 893.64	2.346 9
1.8/1.5	6 689.69	9 277.31	8 725.81	7 485.93	14 360.65	2.933 6

计算结果表明,当横系梁截面高度为 $1\sim 1.2\text{ m}$ ($0.65D\sim 0.8D$,其中 D 为圆柱墩身的直径),宽度为 $0.9\sim 1\text{ m}$ ($0.6D\sim 0.7D$)时,对结构的受力体系比较有利。从横系梁截面的刚度与墩身刚度比来看,适中的比例范围是 $0.3\sim 0.6$ 。

7 结论

(1) 双柱式高墩之间加设横系梁,不仅能提高

桥墩的稳定性,还能够调整横桥向框架墩内力,减小柱式桥墩墩身的受力。

(2) 从动力特性分析结果可知,横系梁不影响桥梁的纵向振动,增加横桥向刚度,减小第1阶横向振型的振动周期。

(3) 从反应谱分析结果可知,对于墩高超过 30 m 的双柱式桥墩,加设两道横系梁更有利于提高结构的抗震性能,横系梁宜布置在距墩底 $0.3H$ 和 $0.8H$ 处。

(4) 横系梁的刚度对结构内力的分配影响很大。通过计算分析可知,当横系梁刚度与墩身刚度之比为 $0.3\sim 0.6$ 时,双柱与盖梁形成门式框架结构内力分配比较合理,墩身最大弯矩较小,并且横系梁易由于弹性抗弯刚度不足而进入塑性状态,起到地震动耗能作用。

参考文献:

References:

- [1] 杨沪湘,许航.高烈度地震山区桥梁抗震设计研究[J].公路,2009(8):246-250.
YANG Huxiang, XU Hang. Research on Anti-seismic Design of Bridge in Highly Seismic Mountainous Region [J]. Highway, 2009 (8): 246-250.
- [2] 李照奇.双幅双柱墩在某山区高速公路中的应用[J].山西建筑,2008,34(21):306-307.
LI Zhaoqi. Application of Double Amplitude and Double Column Piers in Some Mountain Area Express Highway [J]. Shanxi Architecture, 2008, 34 (21): 306-307.
- [3] 严任苗.合肥派河大桥墩柱横系梁施工技术[J].路基工程,2010(3):234-236.
YAN Renmiao. Construction Technology of Pier Column Straining Beam of Hefei Paihe Bridge [J]. Subgrade Engineering, 2010 (3): 234-236.
- [4] 宋晓东,李建中.山区桥梁的抗震概念设计[J].地震工程与工程振动,2004,24(1):92-96.
SONG Xiaodong, LI Jianzhong. Seismic Conceptual Design for Mountain Bridges [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24 (1): 92-96.
- [5] 秦建国,蒋伟.山区桥梁柱式墩的验算分析[J].公路交通技术,2007(3):86-89.
QIN Jianguo, JIANG Wei. Checking Calculations and Analysis of Columnar Pier of Bridges in Mountainous Areas [J]. Technology of Highway and Transport, 2007 (3): 86-89.
- [6] 王慧东.桥梁墩台与基础工程[M].北京:中国铁道出版社,2005.
WANG Huidong. Pier and Abutment and Foundation

- Engineering of Bridge [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.
- [7] 李廉锟. 结构力学(上) [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- LI Liankun. Structural Mechanics (Volume One) [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.
- [8] 康俊涛, 王国鼎. 无桥台斜腿刚架桥横梁的设置分析 [J]. 公路, 2006, (4): 86-89
- KANG Juntao, WANG Guoding. Analysis of Diaphragm Locating of Non-abutment Slant Legged Rigid Frame Bridges [J]. Highway, 2006, (4): 86-89.
- [9] 李健刚, 杜玉东, 魏燕玲, 等. 横梁对双肢薄壁高墩刚构桥稳定性的影响分析 [J]. 铁道工程学报, 2008 (11): 31-34.
- LI Jiangan, DU Yuxue, WEI Yanling, et al. Influence Analysis of the Stability by the Collar Beam of Double-shaft and Thin-wall High-rise Pier Rigid Frame Bridge [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008 (11): 31-34.
- [10] 王克海, 李茜. 桥梁抗震的研究进展 [J]. 工程力学, 2007, 24 (增刊2): 75-82.
- WANG Kehai, LI Qian. Research Progress on Seismic Design of Bridge [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24 (S2): 75-82.
- [11] 王克海, 李茜. 高墩桥梁地震响应分析 [J]. 世界桥梁, 2006 (1): 41-43.
- WANG Kehai, LI Qian. Analysis of Seismic Response of Bridges with High-rise Piers [J]. World Bridges, 2006 (1): 41-43.
- [12] 王克海, 孙永红, 韦韩, 等. 汶川地震后对我国结构工程抗震的几点思考 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (11): 54-59.
- WANG Kehai, SUN Yonghong, WEI Han, et al. Comments on Seismic Strengthening for Structural Engineering in China after Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (11): 54-59.
- [13] 王克海. 桥梁抗震研究 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- WANG Kehai. Research on Bridge Anti-seismic Capacity [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007.
- [14] 贡金鑫, 张勤, 王雪婷. 从汶川地震中桥梁震害看现行国内外桥梁抗震设计方法(二): 抗震设计与构造 [J]. 公路交通科技, 2010, 22 (10): 35-46.
- GONG Jinxin, ZHANG Qin, WANG Xueting. Comparative Study on Bridge Seismic Design Approaches in Different Specifications Based on Survey of Disaster in Wenchuan Earthquake (2): Seismic Design and Structure [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 22 (10): 35-46.
- [15] 陈淮, 王艳, 葛素娟. 白河特大桥主桥抗震性能分析 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (3): 103-108.
- CHEN Huai, WANG Yan, GE Sujuan. Aseismic Performance Analysis of Main Bridge of Bai River Grand Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (3): 103-108.
- 合评估 [J]. 建筑材料学报, 2004, 7 (2): 178-182.
- CHEN Yu, ZHANG Qisen. Fuzzy Multilevel General Evaluation of Wear Resistance of Highway Fly Ash Concrete [J]. Journal of Building Materials, 2004, 7 (2): 178-182.
- [9] CHEN Yu, ZHANG Qisen. Test Study on Abrasion of Skid-resistant Textures on Concrete Pavements [J]. Proceedings of Selected Papers from the 2009 GeoHunan International Conference. Changsha: ASCE, 2009: 107-115.
- [10] 陈瑜, 高英力, 王盛铭. 粉煤灰-脱硫石膏双掺砂浆试验研究与应用 [J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2010, 21 (2): 48-52.
- CHEN Yu, GAO Yingli, WANG Shengming. Experimental Study and Application of Fly Ash-desulfurization Gypsum Double-blended Mortar [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2010, 21 (2): 48-52.
- (上接第38页)
- [6] 高英力, 陈瑜, 王迪, 等. 脱硫石膏-粉煤灰活性掺合料设计及水化特性 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42 (2): 225-231.
- GAO Yingli, CHEN Yu, WANG Di, et al. Design and Hydration Characteristics of Desulphurization Gypsum - Fly Ash Active Admixture [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42 (2): 225-231.
- [7] 高英力. 超细粉煤灰高性能公路路面水泥混凝土早期收缩变形及抗裂性能研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2005.
- GAO Yingli. Investigation of Early Shrinkage and Cracking Resistance of High Performance Highway Pavement Cement Concrete Containing Ultra-fine Fly Ash [D]. Changsha: Central South University, 2005.
- [8] 陈瑜, 张起森. 掺粉煤灰道路混凝土耐磨性能的模糊综