

文章编号:1673-2049(2009)04-0024-06

既有简支铰接空心板梁桥结构状况动力评估

李德建, 彭彦

(中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075)

摘要:以湖南长沙湘江北大桥西引桥为工程实例,对既有简支铰接空心板梁桥结构状况动力评估方法进行了研究。首先根据梁格法基本原理,通过使虚拟横梁在同一铰接缝处的梁端竖向约束相互耦合来模拟纵向铰接缝,提出了改进的梁格模型,建立了简支铰接空心板梁桥动力特性空间分析模型,计算得出了桥梁结构的动力特性;然后通过实桥动力试验验证了计算模型的正确性,介绍了动力评估试验内容、测试方法以及测试结果。分析结果表明:该桥的动力系数都在规范要求内,桥梁结构状况良好,本文方法可为既有简支铰接空心板梁桥的结构状况评估提供有效手段。

关键词:简支铰接空心板梁桥;动力特性;冲击系数;狄克曼舒适度指标;结构状况动力评估

中图分类号:U443.22

文献标志码:A

Dynamic Assessment About Existing Simply-supported Hinge Joint Cellular Slab Bridges

LI De-jian, PENG Yan

(School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

Abstract: A dynamic assessment method about existing simply-supported hinge joint cellular slab bridges was researched with the project of west approach bridge of North Bridge over Xiangjiang River in Changsha, Hunan province as an example. Firstly, based on the basic principles of grillage method, an improved grillage model was put forward, which made the vertical constraint of crossing beam ends couple at the same hinged joint to simulate longitudinal hinge joint, the space dynamic characteristic analytical model of the bridge was established and the dynamic characteristics of the bridge were calculated. Then, authors proved the correction of the model through the dynamic test and introduced the dynamic assessment test contents and test methods and test results. The analytical results show that the dynamic coefficients can meet the needs of the specification and the bridges are in good condition. This method provide an effective means for the assessment of the existing simply-supported hinge joint slab bridges.

Key words: simply-supported hinge joint cellular slab bridge; dynamic characteristic; impact coefficient; Dickman comfort criteria; dynamic assessment of structural condition

0 引言

在对桥梁结构状况进行评估的过程中,各国学

者都十分重视自振频率的计算分析与振动测试。桥梁结构的动力特性试验主要研究的是桥梁结构的自振特性和车辆动力荷载与桥梁结构的联合振动特

收稿日期:2009-08-15

基金项目:国家自然科学基金项目(50908231)

作者简介:李德建(1967-),男,湖南邵东人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:dejianli@vip.sina.com。

性,这些测试数据是判断桥梁结构运营状况和承载特性的重要依据。简支铰接空心板梁桥是梁式桥中应用最为广泛的一种桥型,这种桥型就是用现浇混凝土纵向企口缝装配或仅在翼板间用焊接钢板或伸出交叉钢筋连接的无中间横隔梁的装配式桥。由于对使用年限和荷载等级要求的提高,在实际工程中存在大量需要检测与维修加固的此类桥梁,因而,对此类桥梁的结构状况动力评估方法进行研究具有重要的工程实际意义。

由于影响桥梁结构振动的问题复杂,一般需采用理论分析与试验测试相结合的方法解决。虽然这种桥型板块间横向具有一定的连接构造,但其连接刚性相对较弱,它的受力状态实际上接近于数根并列而相互间横向铰接的狭长板,其受力行为及动力响应表现出明显的空间特性。对于这类结构,传统的分析方法是简化了的平面分析,即通过横向分布系数来考虑桥梁的空间作用^[1-3],这种分析方法具有分析简单、适用性广的特点,但它难以得出横桥向各片梁的内力分布规律和空间动力特性。用板单元或实体单元建立空间模型^[4]虽然可以得出横向各片梁的内力分布规律和空间动力特性,但难以模拟纵向铰接缝。采用梁格法能从整体上对这种桥型进行受力分析并且容易模拟纵向铰接缝,由于采用了纵向梁格和横向梁格,因此特别适合于这种受力状态接近于数根并列而相互间横向铰接的狭长板。其中纵向梁格刚度代表结构纵向刚度,横向梁格刚度代表结构横向刚度,该方法具有概念清晰,便于工程师实际应用等显著特点^[5-13]。

1 动力特性计算分析

湖南长沙湘江北大桥是 319 国道的一座特大桥,大桥总长 3 616.66 m,其正桥长 2 355.9 m,由东引桥、主桥和西引桥组成。西引桥部分共 17 跨,每跨采用 16 m 简支铰接空心板结构,桥面净宽 26.6 m,其中机动车道 4×3.95 m,非机动车道 2×3.65 m,人行道 2×1.5 m,桥梁设计荷载为汽车-20 级,挂车-100。桥梁上部均采用 23 块 70 cm 厚先张法预应力混凝土铰接空心板。下部除桥台外,全部采用 4Φ1 200 钻孔灌注桩,柱式墩。取靠近桥台的前 4 跨作为测试跨,西引桥横断面布置如图 1 所示。

铰接板的受力特点如图 2 所示。图 2(a)为一座用混凝土铰接缝连接的装配式板桥承受荷载 P 的变形图,当 3[#] 板块上有荷载 P 作用时,除了本身引起纵向挠曲外(板块本身的横向变形极小,可略去不计),其他板块也会受力而发生挠曲,显然这是因为

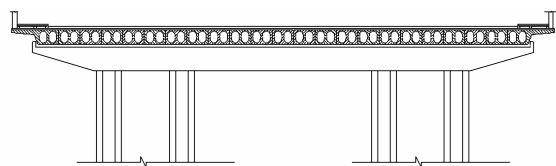


图 1 简支铰接空心板梁桥横断面布置

Fig. 1 Cross-sectional Arrangement of Simply-supported Hinged Joint Cellular Slab Bridge

各板块之间通过结合缝所承受的内力在起传递荷载的作用。图 2(b)为一般情况下结合缝可能引起的内力为竖向剪力 $g(x)$ 、横向弯矩 $m(x)$ 、纵向剪力 $t(x)$ 和法向力 $n(x)$ 。然而当桥上主要作用竖向荷载时,纵向剪力和法向力同竖向剪力相比,影响极小;加之在构造上,结合缝(企口缝)的高度不大,刚性甚弱,通常可视作近似铰接,则横向弯矩对传递荷载的影响极小,也可以忽略不计。为了简化,可以假定竖向荷载作用下结合缝内只传递竖向剪力 $g(x)$ 。用梁格法建模时将相邻横梁单元的同一位置铰接缝处的竖向约束相互耦合,其他约束全部释放掉,使铰接缝只传递竖向剪力 $g(x)$,如图 2(c)所示,各板受力模型如图 3 所示,这就是梁格法分析铰接板并模拟铰接缝的基本思路。

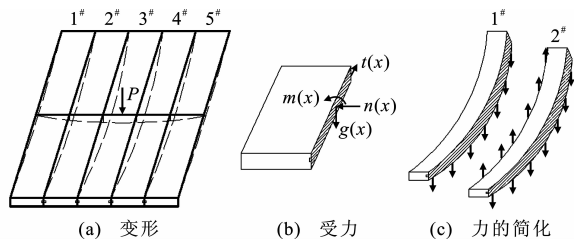


图 2 铰接板的受力

Fig. 2 Force of Hinged Slab Bridge

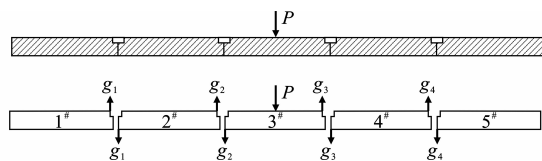


图 3 铰接缝处的受力

Fig. 3 Force at Hinged Joints

按照以上思路,将全桥纵向划分成 16 个单元,横向沿各片梁中心线和铰接缝划分成 44 个单元,横梁只起到将各片纵梁横向连接为整体的作用,相邻横梁在同一铰接缝处将竖向约束相互耦合,其他约束全部释放以模拟铰接缝使其只传递竖向剪力。桥梁上部结构梁格计算模型如图 4 所示。

采用桥梁结构空间分析与设计程序 LBS-1 对该桥进行动力特性分析,得出其前 4 阶自振频率 $f_1 \sim f_4$ 和振型如图 5 所示。

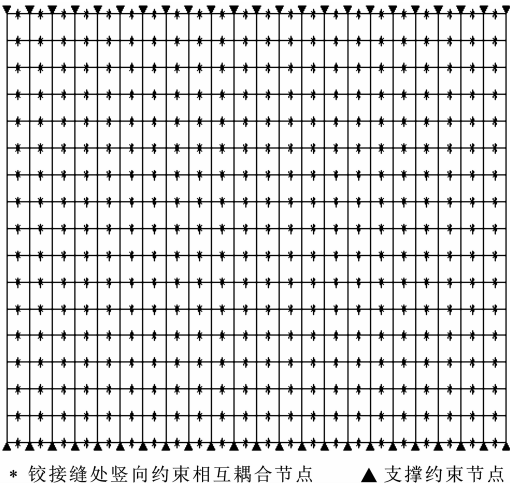


图 4 桥梁上部结构梁格计算模型
Fig. 4 Beam Grid Computing Model of Bridge Upper Structure

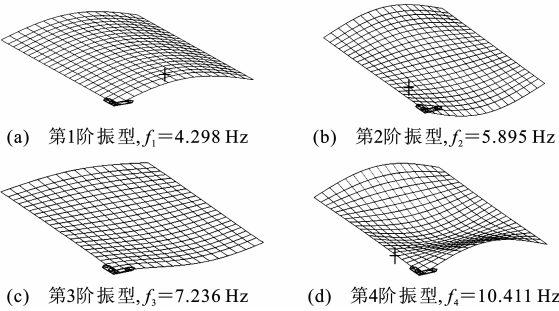


图 5 桥梁自振频率和振型计算结果
Fig. 5 Calculation Results of Self-vibration Frequency and Vibration Mode of Bridge

由图 5 可以看出:该简支铰接板梁桥前 4 阶振型中,除第 1 阶振型为顺桥向竖向弯曲外,其余振型均表现出空间特性。

2 动力试验与结构状况动力评估

2.1 动力试验方法

根据测试目的的不同,桥梁动力荷载试验一般分为跑车试验、环境随机振动试验(脉动试验)等。

(1)跑车试验:该试验属于动力振动测试,即给结构一个初始速度或位移,使其发生振动以获得结构的动力特性。该桥动力试验采用质量为 15 t 的试验车分别以 30、50 km · h⁻¹ 的速度通过第 1、2、3、4 测试跨,并记录此时桥跨结构的振动响应,进行结构动力特性分析。

(2)环境随机振动试验:当桥跨结构无车辆通过时,记录桥跨结构在环境随机激励下的加速度响应,通过频谱分析可获得结构的自振特性。

综合跑车试验及环境随机振动试验的测试数

据,可得到桥跨结构的动力响应数据。该桥动力试验采用德国生产的国际公认的 HBM 动力测试与分析系统完成。用分布在桥面不同位置的传感器采集位移和加速度信号,利用屏蔽导线输入信号采集系统进行采集、储存,然后对储存的信号进行处理,选择其中的有效信号进行分析,得到桥梁结构的自振频率、振型和振幅等参数的实测值。

2.2 测试结果分析及结构状况动力评估

根据以上试验方法进行该桥动力评估试验,部分典型动力测试结果如图 6~8 所示。

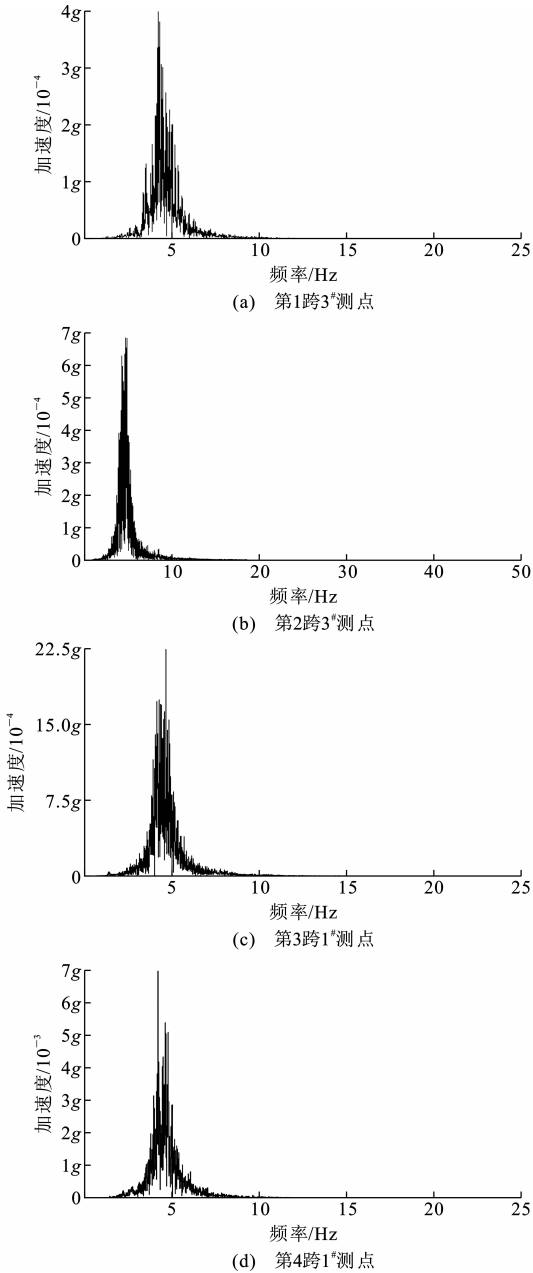


图 6 环境随机振动的测点加速度频谱
Fig. 6 Acceleration Frequency Spectra of Environment Stochastic Vibration Measuring Points

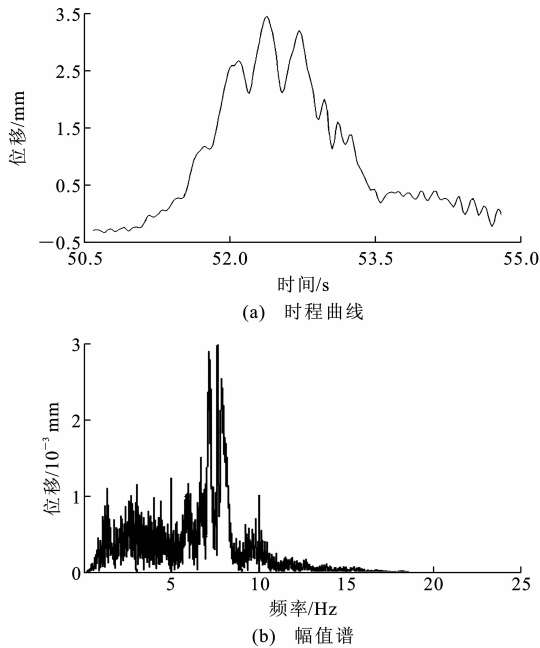


图 7 车速为 $30\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时桥梁竖向位移响应的时程曲线和幅值谱

Fig. 7 Time History Curve and Amplitude Spectrum of Bridge's Vertical Displacement Response When Vehicle Speed is $30\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$

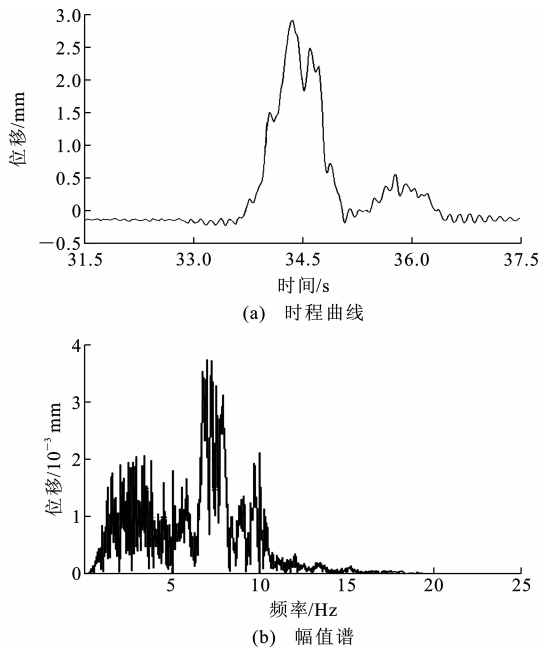


图 8 车速为 $50\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时桥梁竖向位移响应的时程曲线和幅值谱

Fig. 8 Time History Curve and Amplitude Spectrum of Bridge's Vertical Displacement Response When Vehicle Speed is $50\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$

2.2.1 自振频率

结构的自振频率是结构固有的振动特性,也是结构病害诊断和状况评估的一个关键性指标。当桥

梁经过多年运营之后,或遇到地震破坏等其他损伤时,可以通过检测桥梁的自振频率来判断桥梁是否处于安全工作状态。如果自振频率变化不大,则说明桥梁的刚度没有多大变化,可以保证桥梁安全运营;如果自振频率下降较多,则说明桥梁刚度明显降低,需要立即采取加固措施。自振频率实测值与理论值的比较见表 1。

表 1 自振频率实测值与理论值的比较

Tab. 1 Comparisons of Measured Values and Theoretical Values of Self-vibration Frequencies Hz				
桥跨编号	1	2	3	4
自振频率实测值	4.663	4.834	4.668	4.590
自振频率理论值	4.298	4.298	4.298	4.298

从动力试验的结果看,该桥的竖向自振基频、阻尼比在跑车试验时与脉动试验时所测结果基本相同。所测得的自振频率均大于相应的理论计算值,表明桥梁具有较好的刚度,说明桥梁结构状况良好,无受损情况。

2.2.2 冲击系数

车辆以一定速度通过桥跨将引起桥梁的振动,从而使桥梁结构在静应力的基础上承受较大的动应力,动荷载挠度也比相同静荷载时大。这种动荷载对应力和挠度的影响通常采用冲击系数来衡量。冲击系数的大小综合反映了动荷载对桥跨结构的动力性能、桥面平整度以及运行车辆的动力特性、车速等因素的影响,因此冲击系数是桥梁结构动力评估的一个重要参数^[14]。表 2 为不同车速下的跨中竖向动位移及冲击系数的测试结果。

根据文献[15],实测冲击系数应满足

$$(\delta_{\max}-1)\eta\leq\delta-1 \tag{1}$$

式中: δ_{\max} 为实测最大冲击系数; η 为动力试验荷载效率, $\eta=S_{\text{dyn}}/S$, S_{dyn} 为动力荷载按静力荷载考虑作用于检测部位的挠度, S 为基本设计荷载作用于检测部位的挠度,由计算得 $\eta=0.38$; δ 为设计时的冲击系数, $\delta=1.242$ 。

由此可知,实测冲击系数的评定满足要求。单车通过时,实测桥梁的冲击系数不大,说明桥面的平整度仍然良好。

2.2.3 狄克曼舒适度指标

桥梁振动引起的驾驶员、旅客和桥上行人不舒适和感觉不安全,是人体对振动的反应。一般采用狄克曼舒适度指标 K 简便判别人体对结构振动具有良好感觉的界限, K 亦称为敏感度。

狄克曼舒适度指标 K 的计算公式为:

表 2 各测试跨在不同车速下的测试结果 1

Tab. 2 Test Results 1 of Tested Spans in Different Vehicle Speeds

桥跨编号	车速为 30 km · h ⁻¹				车速为 50 km · h ⁻¹			
	S _{max} /mm	S _{min} /mm	S _{mean} /mm	δ _{max}	S _{max} /mm	S _{min} /mm	S _{mean} /mm	δ _{max}
1	3.265	2.057	2.661	1.23	2.896	1.833	2.365	1.22
2	4.309	3.592	3.951	1.09	4.472	3.192	3.832	1.17
3	2.926	1.854	2.390	1.22	3.197	2.574	2.886	1.11
4	2.482	2.128	2.305	1.08	2.115	1.498	1.807	1.17

注：S_{max}为跨中挠度最大值，即波峰值；S_{min}为同一周期的波谷值；S_{mean}为静力荷载引起的同一检测部位实测最大挠度；δ_{max} = S_{max}/S_{mean}。

(1)对于竖向振动

$$K=\begin{cases} Df^2 & f<5\text{ Hz} \\ Df & 5\text{ Hz}<f<40\text{ Hz} \\ 200D & f>40\text{ Hz} \end{cases} \quad (2)$$

(2)对于横向振动

$$K=\begin{cases} 2Df^2 & f<2\text{ Hz} \\ 4Df & 2\text{ Hz}<f<25\text{ Hz} \\ 100D & f>25\text{ Hz} \end{cases} \quad (3)$$

式中：D 为结构振动位移振幅，D = S_{max} - S_{mean}；f 为结构的振动频率。

人体对振动敏感度的区域划分为：K = 0.1 表示能感到振动的下限；K = 1 表示能忍受任意长时间的振动；K = 10 表示能忍受短期振动；K = 100 表示一般人受振动时过分疲劳的上限。

表 3 为不同车速下的跨中竖向振动位移振幅、频率及舒适度指标的测试结果。由表 3 可知，该桥不会产生过大振幅，乘客和行人能忍受在桥上的振动。

表 3 各测试跨在不同车速下的测试结果 2

Tab. 3 Test Results 2 of Tested Spans in Different Vehicle Speeds

桥跨编号	车速为 30 km · h ⁻¹			车速为 50 km · h ⁻¹		
	D/mm	f/Hz	K	D/mm	f/Hz	K
1	0.604	7.617	4.60	0.532	7.251	3.85
2	0.359	7.031	2.52	0.640	6.860	4.39
3	0.536	6.982	3.74	0.312	1.257	0.49
4	0.177	2.026	0.48	0.309	1.416	0.62

3 结 语

(1)桥梁实际结构是通过铰接缝使各梁连成一个整体共同受力的，理论计算模型中必须正确模拟铰接缝的作用，其中正确模拟铰接缝处力的传递是最关键的。根据铰接缝的受力特点对铰接缝进行了简化，使其只传递竖向剪力；建立梁格模型时使同一铰接缝处各单元的节点竖向约束相互耦合，其他约束全部释放来正确模拟铰接缝的作用。

(2)建立了空间梁格模型并计算了桥梁结构的

动力特性，实测结构动力特性结果与理论计算结果一致，符合前苏联 CH-200-6 规范中规定中小跨度混凝土简支梁的竖向自振频率应大于 3.33 Hz 的要求，也符合美国一般设计规定梁的竖向自振频率应大于 3.5 Hz 的要求。实测结构的自振频率大于理论计算频率，这表明实际结构的刚度大于理论设计值，桥跨结构动力性能较好。

(3)实测各桥跨结构的冲击系数均小于规范值，受测桥跨的动力冲击系数满足混凝土桥梁试验方法规定的评定要求，是安全的。

(4)从桥梁的动力测试及评估结果来看，该桥的动力性能良好，桥梁的承载力满足要求，不需要进行加固维修。本文方法可为同类型桥梁的结构状况评估提供借鉴及有效手段。

参考文献：
References:

[1] 王敏强,薛 飞,张 桓,等. 铰接板梁桥荷载横向分布影响线计算方法[J]. 武汉大学学报:工学版,2004,37(4):68-72.
WANG Min-qiang, XUE Fei, ZHANG Huan, et al. Method of Calculation of Transverse Load Distribution Influence Line for an Articulated Slab Girder Bridge[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2004,37(4):68-72.

[2] 王 佶,曾 智. 浅析桥梁荷载横向分布系数计算[J]. 国外建材科技,2004,25(6):109-110.
WANG Ji, ZENG Zhi. Study of Calculating Load Transverse Distribution Factors of Bridge[J]. Science and Technology of Overseas Building Materials,2004,25(6):109-110.

[3] 张俊勇,庄月明,刘其伟. 板梁桥横向分配能力的测试分析[J]. 山西建筑,2006,32(14):270-271.
ZHANG Jun-yong, ZHUANG Yue-ming, LIU Qi-wei. The Testing and Anaysis of the Transverse Partition Capability to Plate Girder Bridge[J]. Shanxi Architecture,2006,32(14):270-271.

- [4] 郭勇,王媛,张根法,等. 预应力混凝土连续箱梁桥计算模型对比分析[J]. 中国市政工程, 2005(4): 36-38.
GUO Yong, WANG Yuan, ZHANG Gen-fa, et al. Comparison and Analysis on Calculation Models for Prestressed Concrete Continuous Box-girder Bridge[J]. China Municipal Engineering, 2005(4): 36-38.
- [5] HAMBLY E C. Bridge Deck Behaviour[M]. London: E & FN Spon, 1976.
- [6] 戴公连,李德建. 桥梁结构空间分析设计方法与应用[M]. 北京:人民交通出版社, 2001.
DAI Gong-lian, LI De-jian. Bridge Spatial Structure Design-analysis Method and Application[M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [7] 余钱华,胡世德,范立础. 桥梁结构 MTMD 被动控制机理及试验[J]. 中国公路学报, 2008, 21(4): 50-54.
YU Qian-hua, HU Shi-de, FAN Li-chu. MTMD Passive Control Mechanism and Experiment on Bridge Structure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4): 50-54.
- [8] 宗周红,夏樟华. 联合模态柔度和静力位移的桥梁有限元模型修正方法[J]. 中国公路学报, 2008, 21(6): 43-49.
ZONG Zhou-hong, XIA Zhang-hua. Finite Element Model Updating Method of Bridge Combined Modal Flexibility and Static Displacement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(6): 43-49.
- [9] 张国平. 白河大桥连续空心板梁汛期现浇施工方案的确定[J]. 筑路机械与施工机械化, 2005, 22(2): 40-41.
ZHANG Guo-ping. Case-in-place Construction Scheme for the Continuous Cored Slab Beam of Baihe Bridge in Flood Season[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2005, 22(2): 40-41.
- [10] 谭冬莲,宁立,游金兰. 预制预应力混凝土空心板梁施工现场的静载试验研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(4): 51-55.
TAN Dong-lian, NING Li, YOU Jin-lan. Study on Static Load Test of PC Hollow Slab in Construction Field[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(4): 51-55.
- [11] 周勇军,赵小星,宋一凡,等. 连续梁桥模态分析与试验[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2007, 27(3): 57-60.
ZHOU Yong-jun, ZHAO Xiao-xing, SONG Yi-fan, et al. Modal Analysis and Experiment Test of Continuous Beam Bridge[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(3): 57-60.
- [12] 谭冬莲,肖汝诚. 基于改进 Gauss-Newton 法的在役桥梁结构参数识别[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2007, 27(4): 57-60.
TAN Dong-lian, XIAO Ru-cheng. Parameter Identification of Existing Bridge Structure Based on Improved Gauss-Newton Algorithm[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(4): 57-60.
- [13] 谭冬莲,肖汝诚. 桥梁监测系统中梁桥静力应变传感器的优化配置[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2007, 27(5): 66-69.
TAN Dong-lian, XIAO Ru-cheng. Optimal Placement of Static Strain Sensors of Beam Bridge Structure in Bridge Monitoring System[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(5): 66-69.
- [14] 沙丽新,阮欣. 桥梁结构健康检测与评估方法发展现状综述[J]. 青岛建筑工程学院学报, 2003, 24(4): 19-22.
SHA Li-xin, RUAN Xin. State of the Art of Health Inspecting and Assessment Methods in the Bridge Structures[J]. Journal of Qingdao Institute of Architecture and Engineering, 2003, 24(4): 19-22.
- [15] 湛润水,胡钊芳. 公路桥梁荷载试验[M]. 北京:人民交通出版社, 2003.
CHEN Run-shui, HU Zhao-fang. Highway Bridge Load Experimentation[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.