

文章编号:1673-2049(2013)01-0060-06

澧水河大桥施工猫道的非线性静风响应分析

李 宇¹, 刘 博², 李加武¹, 白 桦¹

(1. 长安大学 旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 陕西省建筑材料工业设计研究院, 陕西 西安 710032)

摘要:基于澧水河悬索桥施工猫道节段模型的静力三分力风洞试验,考虑猫道的几何非线性和静风荷载的非线性,采用增量与内外两重迭代相结合的方法,利用 ANSYS 参数化设计语言 APDL 编制了能够精确求解悬索桥施工猫道非线性静风响应的程序。在此基础上,建立了澧水河大桥猫道的有限元模型,进而对其进行了三维非线性静风稳定性分析,并计算了不同风速下的澧水河大桥猫道不同桥轴线位置处的静风响应。结果表明:猫道发生静力扭转失稳的原因是空气力矩的作用使猫道面层处于正攻角;最大扭转变形则发生在跨中2个横向通道之间,是猫道各组成部分中最容易发生静风失稳的构件。

关键词:悬索桥;静风响应;变形;非线性分析;猫道

中图分类号:U448.25

文献标志码:A

Analysis of Nonlinear Aerostatic Response for Catwalk of Lishui Suspension Bridge

LI Yu¹, LIU Bo², LI Jia-wu¹, BAI Hua¹

(1. Key Laboratory of Bridge Detection and Reinforcement Technology of Ministry of Communications,

Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Design & Research Institute of

Building Materials Industry, Xi'an 710032, Shaanxi, China)

Abstract: Based on the wind tunnel experiment for aerostatic force of section model of catwalk of Lishui suspension bridge, one calculation program considering geometric nonlinearity and aerostatic nonlinearity was prepared by using ANSYS parametric design language APDL in order to calculate nonlinear aerostatic response for catwalk. Then, the finite element analysis model of catwalk of Lishui suspension bridge was established to analyze three-dimensional nonlinear aerostatic stability. Meanwhile, the aerostatic response with different velocities of catwalk of Lishui suspension bridge was also calculated. The results indicate that air torque make catwalk surface to be attack angle which cause the nonlinear aerostatic instability of catwalk. The maximum torsion deformation happen in the middle of two horizontal channel in the mid-span of catwalk. So this component of catwalk should be improved.

Key words: suspension bridge; aerostatic response; deformation; nonlinear analysis; catwalk

0 引言

悬索桥施工猫道是架设在主缆之下,平行于主

缆布置,让操作人员进行施工作业的高空脚手架,是主缆系统乃至悬索桥整个上部结构的施工平台^[1-2]。引起猫道振动的原因主要有风荷载和施工人员在猫

收稿日期:2012-12-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51078038,51208337,90915001);天津市城乡建设和交通委员会项目(2012-软8);

中国博士后科学基金项目(2011M501429)

作者简介:李 宇(1982-),男,福建福州人,讲师,工学博士,E-mail:liyu@chd.edu.cn。

道上行走产生的动力效应。

目前,关于猫道抗风减振措施的应用研究尚存在很多的问题,因此,各国对猫道抗风性能进行了大量研究。郑史雄等^[3]针对汕头海湾桥和润扬长江大桥做了猫道节段模型静力三分力风洞试验;贾宁等^[4]也针对四渡河特大桥猫道的抗风安全和振动控制进行了研究;毛鸿银^[5]以虎门大桥为背景,对猫道结构做了比较全面的抗风研究。而国外对猫道抗风减振性能的研究则主要集中在日本,如新日铁在东京大学对猫道进行了比较全面的抗风性能研究;本州四国联络桥公团对取消抗风缆系统的猫道提出了抗风减振措施。

随着悬索桥跨度的不断增大,组成猫道的构件对其抗静风稳定性的影响越来越受到关注。因此,本文中笔者基于有限元软件 ANSYS,对澧水河特大桥(以下简称澧水河大桥)猫道的非线性静风响应进行分析。

1 工程概况

澧水河大桥施工猫道采用三跨分离式布置(200 m+856 m+190 m),共有 6 个通道。每幅猫道以 8 根 $\Phi 52$ 钢丝绳作为承重绳,其上联结横梁并铺设钢丝网和防滑木条。其中,大、小横梁分别采用 $\square 80 \times 80 \times 3$ 和 $\square 60 \times 60 \times 3$,且每隔 6 m 设置 1 道。猫道两侧每 2 m 设 1 根立柱,每侧立柱上采用 $\Phi 20$ 和 $\Phi 16$ 这 2 根钢丝绳分别作为扶手绳和防护绳,并在侧面设钢丝防护网。另外,猫道中跨还设置了 5 道横向天桥,两边跨各设置 1 道横向天桥(图 1)。

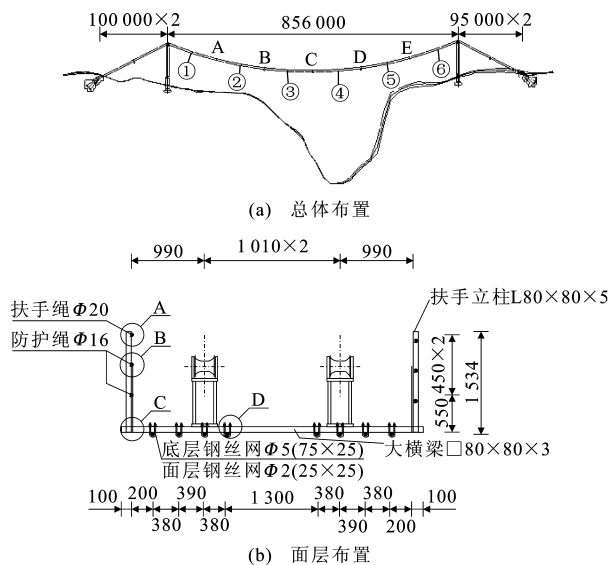


图 1 猫道总体和面层布置(单位:mm)

Fig. 1 General Layout and Surface Layout of Catwalk (Unit:mm)

2 基于 ANSYS 的静风失稳分析

大跨桥梁在静风荷载作用下的非线性有限元分析可归结为求解以下的非线性平衡方程^[6-16],即

$$\mathbf{K}(\delta)\delta = \mathbf{F}(\alpha, v) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{K}(\delta)$ 为大跨桥梁的总体切线刚度矩阵; δ 为变形矩阵; $\mathbf{F}(\alpha, v)$ 为风速 v 和有效攻角 α 所对应的风载等效节点力向量。

对式(1)采用 UL 增量法求解,相应非线性增量平衡方程为

$$(\mathbf{K}_0 + \mathbf{K}_{\sigma_{j-1}}(\delta_{j-1}))\Delta\delta_j = \mathbf{F}_j(\alpha_j, v_i) - \mathbf{F}_{j-1}(\alpha_{j-1}, v_i) \quad (2)$$

式中: \mathbf{K}_0 为结构线弹性刚度矩阵; $\mathbf{K}_{\sigma_{j-1}}(\delta_{j-1})$ 为第 $j-1$ 步状态时单元的几何刚度矩阵; $\mathbf{F}_j(\alpha_j, v_i)$ 为 i 级风速 v_i 第 j 步有效攻角 α_j 的风载等效节点力向量; $\mathbf{F}_{j-1}(\alpha_{j-1}, v_i)$ 为 i 级风速 v_i 第 $j-1$ 步有效攻角 α_{j-1} 的风载等效节点力向量。

基于上述理论,本文中综合考虑静风荷载与结构非线性的影响,基于增量与内外两重迭代相结合的方法,采用大型有限元程序 ANSYS,实现了对澧水河大桥静风稳定性及其响应的精确求解,具体步骤如下:

- (1)建立澧水河大桥的有限元模型。
- (2)打开应力刚化和非线性方程求解器,计算自重荷载下的位移,并储存计算结果。
- (3)根据所处场地的风剖面,计算作用在加劲梁、桥塔以及斜拉索上的初始风荷载,并储存在 Array 数组中。
- (4)设置 Table 数组存储试验测得的三分力系数,设置 Array 数组存储本次计算开始和结束时的加劲梁转角,并计算下一步计算所需施加的风荷载增量。
- (5)设置多点重启动功能,以保证下一步的计算是在上一步变形的基础上进行的。
- (6)每次计算结束后,计算欧几里得范数,判断欧几里得范数是否小于容许值。若小于容许值,则桥梁稳定,继续增加风速,重新开始下一级风速的计算;若大于容许值,则桥梁失稳,减小风速,重新开始下一级风速的计算。
- (7)接近失稳风速时,减小风速增量,若桥梁在风速 U_i 作用下稳定,而在风速 U_{i+1} 作用下失稳,则将 U_{i+1} 作为最终的桥梁失稳临界风速。

3 猫道静风响应的计算分析

进行静风失稳分析时所采用的风洞试验数据是 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速下的三分力系数(图 2)^[17]。在此基

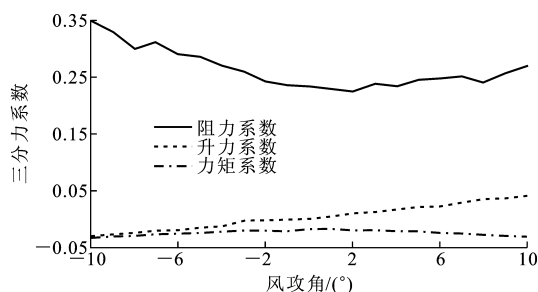
图2 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速下的三分力系数

Fig. 2 Three Force Component Coefficients

Under Velocity Is $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

础上,本文将风洞试验与 ANSYS 程序相结合,进行了澧水河大桥猫道的三维非线性静风响应分析,并根据结构静风响应(内力、位移、扭转角等)随风速的变化规律,分析猫道的扭转发散机理。

根据《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/TD 60-01—2004)中的第 3.2.4 条^[18]可知,桥梁构件基准高度处的设计基准风速可按式计算

$$V_d = K_1 V_{10} \quad (3)$$

$$K_1 = 1.174 \left(\frac{Z}{10} \right)^a \quad (4)$$

式中: V_d 为设计基准风速; V_{10} 为基本风速; Z 为构件基准高度; K_1 为风速高度变化修正系数; a 为地表粗糙系数。

施工阶段的设计风速可按下式计算

$$V_{sd} = \eta V_d \quad (5)$$

式中: V_{sd} 为不同重现期下的设计风速; η 为风速重现期系数。

同时,还应考虑脉动风作用的影响,则

$$V_g = G_v V_{sd} \quad (6)$$

式中: V_g 为静阵风风速; G_v 为静阵风系数。

基于上述工作,全桥静风荷载的施加如图 3 所示,不同风速下的猫道各横向通道间第 20 次迭代的最大扭转变形如图 4 所示。从图 4 可以看出:

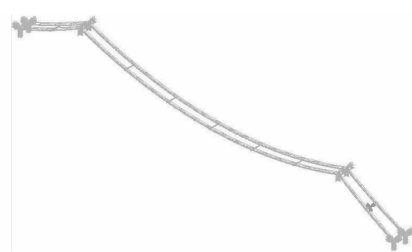
(1)当风速为 $71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,猫道扭转变形随风速而变化的曲线斜率增幅极大,即此时猫道的结构刚度失效,临近失稳。

(2)邻近跨中的 2 个横向通道的扭转变形最大,是猫道各组成部分中最容易发生静风失稳的构件。

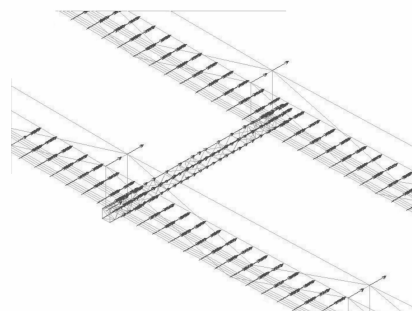
(3)当风速为 $71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,第 20 次迭代的最大扭转角比风速为 $70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的最大扭转角增大了 7.265° ,即风速仅增加 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时猫道最大扭转角就增大了 7.265° 。

图 5~10 中给出了不同风速下,澧水河大桥猫道不同桥轴线位置处的静风变形,可以看出:

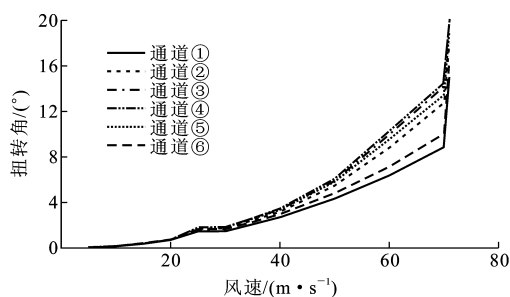
(1)由于横向通道对猫道面层的扭转约束,最大



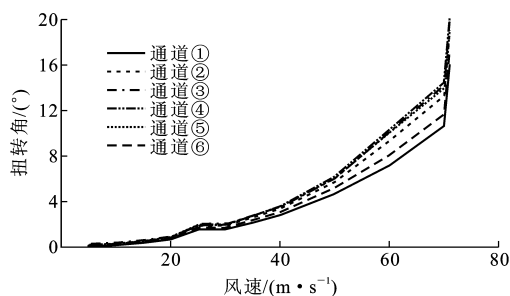
(a) 有限元模型



(b) 静风荷载

图3 施加全桥静风荷载(初始 0° 攻角)Fig. 3 Aerostatic Force Applied in Bridge (Initial 0° Attack Angle)

(a) 左幅猫道



(b) 右幅猫道

图4 不同风速下的猫道最大扭转变形

Fig. 4 Maximum Torsion Deformation with Different Wind Speeds

扭变形发生在横向通道间的小跨猫道跨中。

(2)当风速超过猫道失稳风速 $71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,每增加微小的风速增量,即能使猫道产生很大的变形。

(3)当风速为 $71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,第 10 次迭代的最大横桥向变形比风速为 $70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的最大横桥向变形增大了 2.1 m ,即风速仅增加 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时猫道的最大横桥向变形就增大了 2.1 m (图 8)。

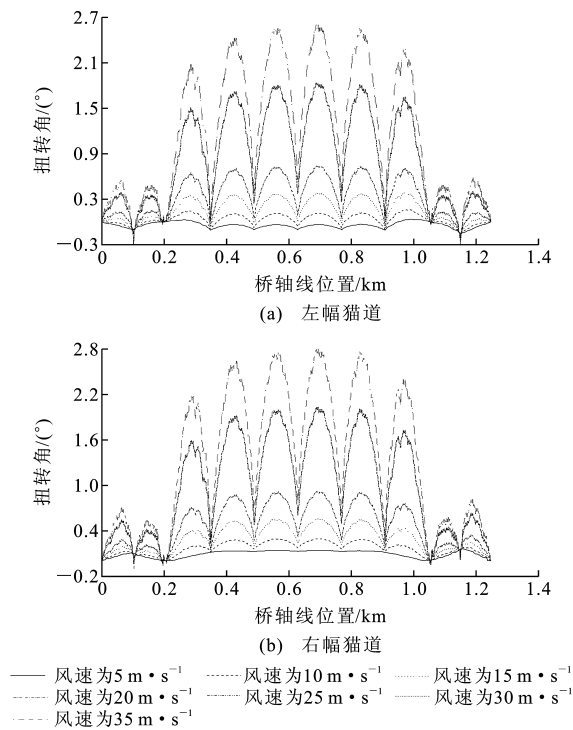


图 5 不同风速下的猫道扭转变形 1

Fig. 5 Torsion Deformation 1 of Catwalk with Different Wind Speeds

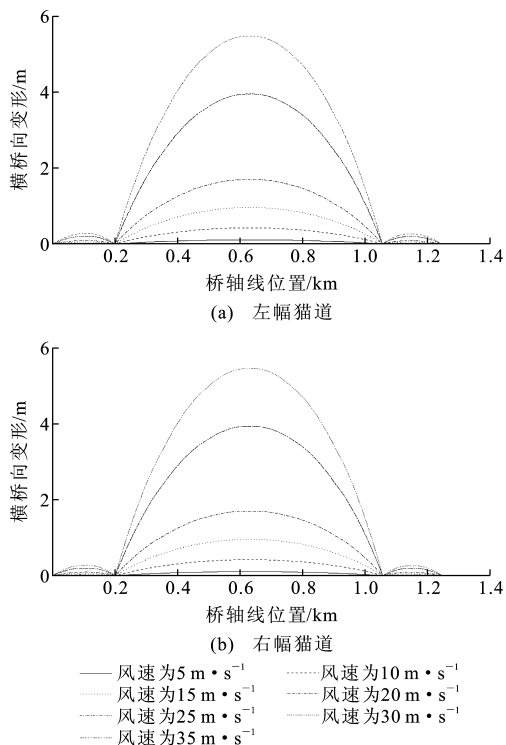


图 7 不同风速下的猫道横桥向变形 1

Fig. 7 Horizontal Deformation 1 of Catwalk with Different Wind Speeds

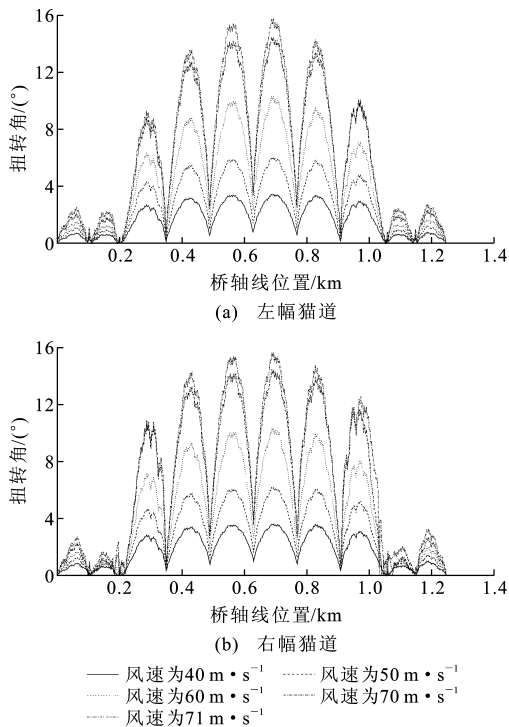


图 6 不同风速下的猫道扭转变形 2

Fig. 6 Torsion Deformation 2 of Catwalk with Different Wind Speeds

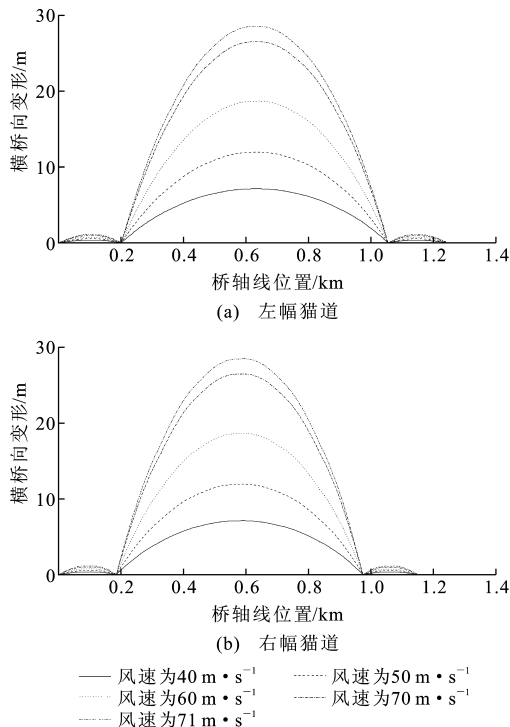


图 8 不同风速下的猫道横桥向变形 2

Fig. 8 Horizontal Deformation 2 of Catwalk with Different Wind Speeds

4 结 语

(1)当风速提高且攻角(面层扭转角)增大到一

定程度时,承重绳张力的松弛导致小跨猫道扭转刚度减小,当扭转刚度减小至不能抵抗空气力矩作用

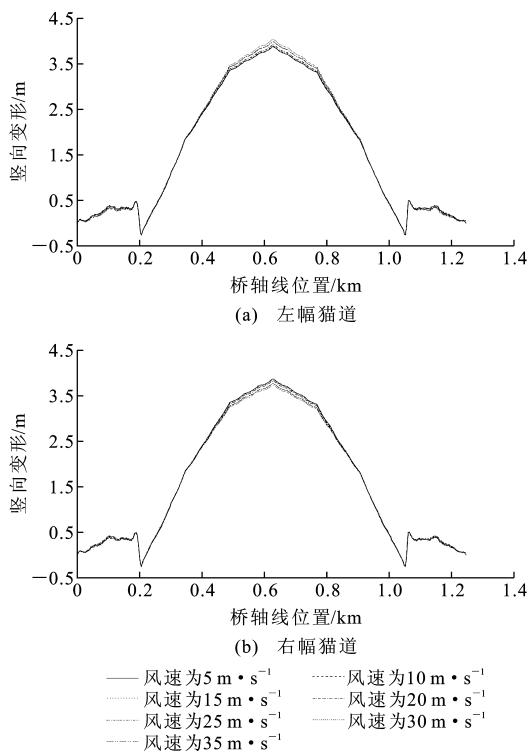


图 9 不同风速下的猫道竖向变形 1

Fig. 9 Vertical Deformation 1 of Catwalk with Different Wind Speeds

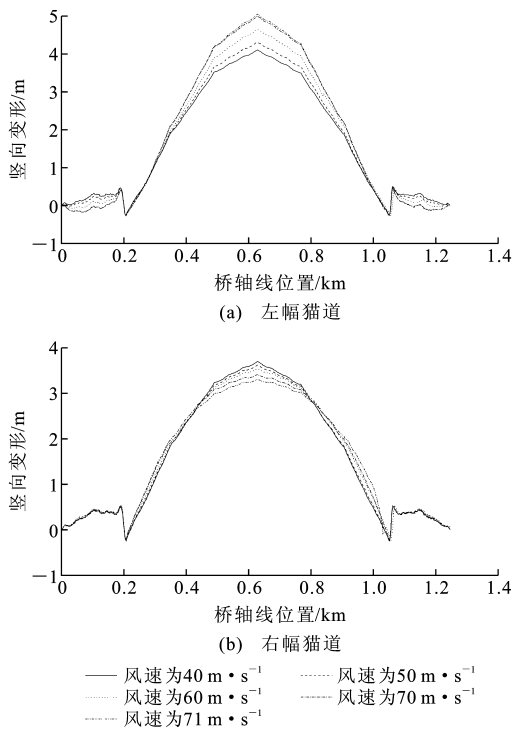


图 10 不同风速下的猫道竖向变形 2

Fig. 10 Vertical Deformation 2 of Catwalk with Different Wind Speeds

时,猫道即发生静力扭转失稳现象。

(2)邻近跨中的 2 个横向通道的扭转变形最大,

是猫道各组成部分中最容易发生静风失稳的构件,应重视并提高该部位的抗风性能。

参考文献:

References:

- [1] 雷俊卿,郑明珠,徐恭义. 悬索桥设计[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
LEI Jun-qing, ZHENG Ming-zhu, XU Gong-yi. Suspension Bridge Design[M]. Beijing: People's Communications Press, 2002.
- [2] 牛和恩. 虎门大桥工程[M]. 北京:人民交通出版社, 1998.
NIU He-en. Humen Bridge Project [M]. Beijing: People's Communications Press, 1998.
- [3] 郑史雄,周述华,廖海黎. 悬索桥施工猫道的非线性抗风静力稳定性分析[J]. 西南交通大学学报, 2000, 35 (4): 348-351.
ZHENG Shi-xiong, ZHOU Shu-hua, LIAO Hai-li. Study on Nonlinear Wind Resisting Static Stability of Catwalk of Suspension Bridge[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2000, 35(4): 348-351.
- [4] 贾 宁,刘健新,刘万锋. 悬索桥施工猫道静风失稳机理分析[J]. 公路交通科技, 2008, 25(3): 99-102.
JIA Ning, LIU Jian-xin, LIU Wan-feng. Analysis of Wind-resistant Stability on the Catwalk for Suspension Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(3): 99-102.
- [5] 毛鸿银. 悬索桥施工猫道抗风性能研究[D]. 上海:同济大学, 1996.
MAO Hong-yin. Study of Wind-resistant Performance of Catwalk of Suspension Bridge [D]. Shanghai: Tongji University, 1996.
- [6] CHENG J, JIANG J J, XIAO R C. Aerostatic Stability Analysis of Suspension Bridges Under Parametric Uncertainty [J]. Engineering Structures, 2003, 25 (13): 1675-1684.
- [7] CHENG J, JIANG J J, XIAO R C, et al. Advanced Aerostatic Stability Analysis of Cable-stayed Bridge Using Finite-element Method[J]. Computer & Structures, 2002, 80(13): 1145-1158.
- [8] ZHANG X J. Influence of Some Factors on the Aerodynamic Behavior of Long-span Suspension Bridges [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(3): 149-164.
- [9] CHENG J, JIANG J J, XIAO R C, et al. Nonlinear Aerostatic Stability Analysis of Jiangyin Suspension Bridge[J]. Engineering Structures, 2002, 24 (6): 773-781.
- [10] VIROTE B, YINGSAK L, PANITAN L. Nonlinear Aerostatic Stability Analysis of Suspension Bridges [J]. Engineering Structures, 2006, 28(5): 793-803.

- [11] 刘健新,贾宁.悬索桥施工猫道的振动控制[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(4):54-57.
LIU Jian-xin, JIA Ning. Vibration Control of Catwalks for Suspension Bridges[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(4): 54-57.
- [12] 张志国,张庆芳,邹振祝.悬索桥成桥状态计算方法[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(1):59-62, 66.
ZHANG Zhi-guo, ZHANG Qing-fang, ZOU Zhen-zhu. Analytical Methods of Suspension Bridge Geometry Under Dead Loads[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(1): 59-62, 66.
- [13] 王浩,李爱群,郭彤.带中央扣的超大跨度悬索桥多尺度有限元模拟方法[J].中国公路学报,2009,22(6):60-66.
WANG Hao, LI Ai-qun, GUO Tong. Multi-scale Finite Element Modeling Method on Super-long-span Suspension Bridges with Central Buckle[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(6): 60-66.
- [14] 颜大椿,黄翔宇,张子华,等.虎门悬索桥桥塔风荷载实验研究[J].中国公路学报,1995,8(4):32-37.
YAN Da-chun, HUANG Xiang-yu, ZHANG Zi-hua, et al. Wind Loading Tests of Humen Suspension Bridge Pylon[J]. China Journal of Highway and Transport, 1995, 8(4): 32-37.
- [15] 梁鹏,吴向男,李万恒,等.三塔悬索桥静动力特性与中塔选型[J].交通运输工程学报,2011,11(4):29-35.
LIANG Peng, WU Xiang-nan, LI Wan-heng, et al. Static and Dynamic Properties of Three-tower Suspension Bridge and Structural Type Selection of Mid-tower[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(4): 29-35.
- [16] 韩万水,王涛,李永庆,等.大跨钢桁架悬索桥有限元模型实用修正方法[J].交通运输工程学报,2011,11(5):18-27.
HAN Wan-shui, WANG Tao, LI Yong-qing, et al. Practical Updating Method of Finite Element Model for Long-span Steel Truss Suspension Bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(5): 18-27.
- [17] 长安大学风洞实验室.澧水特大悬索桥猫道节段模型风洞试验及静风响应分析研究[R].西安:长安大学,2011.
Wind Tunnel Laboratory of Chang'an University. Wind Tunnel Test of Section Model and Aerostatic Response for the Catway of Lishui Great Suspension Bridge[R]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [18] JTG/TD 60-01—2004,公路桥梁抗风设计规范[S].
JTG/TD 60-01—2004, Wind-resistant Design Specification for Highway Bridges[S].

(上接第 54 页)

- FANG Zhi, WANG Jian-qun, HE Xin, et al. Full-scale Model Test of Loading Behaviour of Prestressed Concrete Simply Supported Box Girders[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(6): 49-56.
- [8] 祝明桥.混凝土薄壁箱梁受力性能的试验研究与分析[D].长沙:湖南大学,2004.
ZHU Ming-qiao. Analytical Research of the Concrete Thin-walled Box Girder[D]. Changsha: Hunan University, 2004.
- [9] 周勇,张峰,李术才,等.开裂后预应力混凝土连续箱梁计算模型[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(3):53-58.
ZHOU Yong, ZHANG Feng, LI Shu-cai, et al. Evaluation Model of Pre-stressed Concrete Continuous Box Girders After Cracking[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(3): 53-58.
- [10] 石雄伟,袁卓亚,马毓泉,等.钢板-混凝土组合加固预应力混凝土箱梁[J].长安大学学报:自然科学版,2012,32(3):58-62,90.
SHI Xiong-wei, YUAN Zhuo-ya, MA Yu-quan, et al. Prestressed Concrete Box Girder Strengthened with Composition of Steel Plate and Concrete[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(3): 58-62, 90.
- [11] 胡少伟,陈亮.预应力钢箱高强混凝土组合梁受扭性能试验[J].中国公路学报,2010,23(6):66-72.
HU Shao-wei, CHEN Liang. Experiment on Torsional Behavior of Prestressed Steel-high Strength Concrete Composite Box Beam[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(6): 66-72.
- [12] 刘东鲁.兰新铁路第二双线预制箱梁混凝土的浇筑与养护[J].筑路机械与施工机械化,2012,29(7):68-70.
LIU Dong-lu. Concrete Pouring and Maintenance of Precast Box Beam for Lanzhou-Xinjiang High-speed Railway[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2012, 29(7): 68-70.
- [13] 王赞芝,江林雁,江培信,等.高速铁路斜交连续箱梁施工监控方法[J].筑路机械与施工机械化,2011,28(8):79-82.
WANG Zan-zhi, JIANG Lin-yan, JIANG Pei-xin, et al. Construction Monitoring Method of Continuous Bridge with Skew Box Girder on High-speed Railway[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(8): 79-82.

