

文章编号: 1002-0268 (2009) 04-0042-05

某黄河大桥主桥上部结构有限元静力分析

李淑琴, 朱高波, 万 水
(东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 以某黄河大桥主桥 (70 m+11×120 m+70 m 波形钢腹板 PC 组合多跨连续箱梁桥) 为背景, 按合龙、张拉体外预应力钢束、施加二期恒载、施加活载等施工及营运流程, 进行波形钢腹板预应力混凝土组合桥梁的上部结构顶底板混凝土应力、波形钢腹板应力及结构刚度 (挠度) 的有限元静力分析, 验算其是否符合现行规范要求。结果表明, 波形钢腹板的钢板厚度可以满足要求; 墩顶处顶板不满足抗裂要求。正常使用极限状态下箱梁波形钢腹板竖向剪应力满足规范限值, 但安全系数不高; 波形钢腹板屈曲验算得到的剪切屈服强度为 31 MPa, 安全系数很大。

关键词: 桥梁工程; 波形钢腹板; 有限元; 静力分析; 组合箱梁; 屈曲

中图分类号: U448.21⁺6

文献标识码: A

Static Analysis of Main Bridge Superstructure of a Yellow River Bridge Based on Finite Element Method

LI Shuqin, ZHU Gaobo, WAN Shui

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096 China)

Abstract: Based on the main bridge of a Yellow River Bridge (70 m+11×120 m+70 m PC combination multispan continual box girder bridge with corrugated steel webs) and its construction and operation process such as closure, tensioning of external prestressed cable, imposing of the second stage dead load and live load, the concrete stress of bottom and top plates of superstructure of the bridge, the steel web stress and the structure rigidity (amount of deflection) were obtained by finite element static analysis and computation, which were checked with the existing regulatory requirements. The result indicates that (1) the thickness of corrugated steel webs satisfies the request while the top plate of pier roof does not meet the requirements of crack resistant; (2) the vertical shear stress of the box girder's corrugated steel webs satisfies the standard limit but the safety coefficient is not high under the normal use limit condition; (3) the shear yield strength of the flexure from checking computation is 31 MPa and the safety coefficient is very large.

Key words: bridge engineering; corrugated steel web; finite element; static analysis; composite box girder; flexure

0 引言

波形钢腹板预应力混凝土桥于 20 世纪 80 年代由法国开发, 此后在日本得到推广应用。在我国波形钢腹板预应力混凝土箱梁桥已为各有关大学热门研究课题, 并在城市桥梁、公路桥梁中得到初步应用^[1-4]。

本文所述某黄河公路大桥 (70+11×120+70) m 波形钢腹板预应力混凝土箱形连续梁主桥及南京长江四桥 (50+90+50) m 波形钢腹板预应力混凝土引桥的设计, 代表了中国波形钢腹板预应力混凝土箱形梁桥当前发展水准^[5]。该黄河大桥采用悬臂浇注方法施工, 首先在支架上现浇 0[#] 块, 然后拼装挂篮, 两侧对称

收稿日期: 2008-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50078014)

作者简介: 李淑琴 (1982-), 女, 安徽安庆人, 博士研究生, 研究方向为桥梁与隧道工程。 (123-lishuqin@163.com)

悬浇施工 1[#]~10[#]块, 最后按一定顺序浇注合龙块并张拉合龙钢绞线, 形成连续结构之后张拉体外预应力钢束, 并施工桥面附属结构, 形成永久结构。由于大桥的施工特点, 主桥箱梁在成桥过程中经历了悬臂结构与成桥结构 2 种形态, 本文主要对成桥状态进行静力分析计算^[9]。

1 主要材料属性及设计参数

1.1 材料属性及设计荷载

主桥上部结构预应力混凝土采用 C50 混凝土; 预应力筋采用低松弛优质钢绞线; 钢腹板采用 Q345qcl 钢材; 普通钢筋采用 R235、HRB335。

1.2 上构箱梁几何参数

箱梁悬浇节段划分如图 1 所示。箱梁主要横断面示意图如图 2 所示。箱梁各断面参数见表 1。

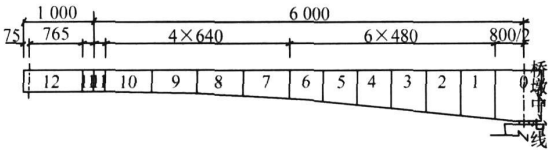


图 1 施工节段划分示意图

Fig 1 Division of construction stages

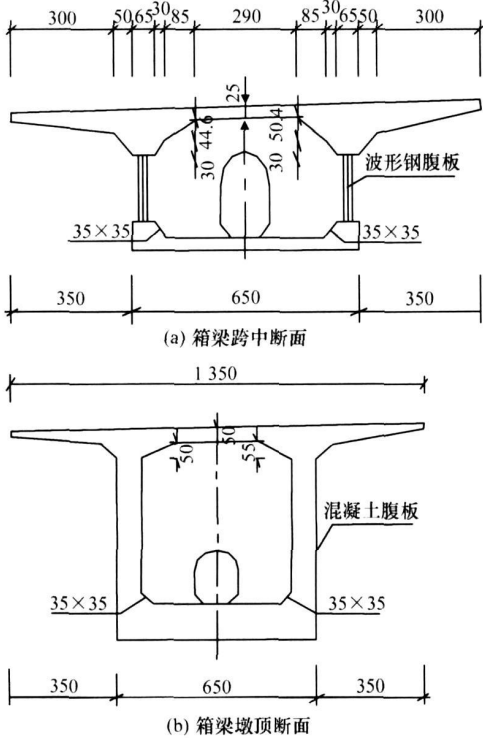


图 2 箱梁断面图

Fig 2 Cross-sections of box girder

表 1 箱梁截面参数表

Tab 1 Section parameters of box girder

节段端头纵向位置 /m	块件编号	块件长 /m	梁高 /m	底板厚 /m	钢腹板厚 /mm	块件重 /t
0	0	—	7 000	1. 200	—	—
2.4	0	—	7 000	0. 800	—	—
4	0	4	6 781	0. 770	14	—
8.8	1	4. 8	6 161	0. 658	14	146 500
13.6	2	4. 8	5 596	0. 559	14	137 215
18.4	3	4. 8	5 086	0. 475	12	129 128
23.2	4	4. 8	4 633	0. 403	12	122 239
28	5	4. 8	4 235	0. 359	12	117 128
32.8	6	4. 8	3 892	0. 322	12	113 534
39.2	7	6. 4	3 522	0. 292	12	146 744
45.6	8	6. 4	3 250	0. 271	10	143 789
52	9	6. 4	3 077	0. 257	10	141 720
58.6	10	6. 4	3 003	0. 250	10	140 538
60	1/2 合龙段	1. 6	3 000	0. 250	10	35. 036

2 单元类型

上部结构静力分析采用有限元软件计算, 所采用的单元如下^[9]:

(1) 实体单元

solid45 单元用于构造三维实体结构。采用 solid45 单元模拟混凝土结构, 包括上下翼缘板及横隔板。单元通过 8 个节点来定义, 每个节点有 3 个沿着 x 、 y 、 z 方向平移的自由度。单元具有塑性、蠕变、膨胀、应力强化、大变形和大应变能力。

(2) 壳单元

shell143 单元适合模拟非线性、平面或弯曲、较薄或适当厚度的壳体结构。采用 shell143 单元模拟波形钢腹板结构。单元中每个节点具有 6 个自由度: 沿 x 、 y 和 z 方向的平动自由度以及绕 x 、 y 和 z 轴的转动自由度, 平面内 2 个方向的形状改变都是线性的。单元具有塑性、蠕变、应力刚化、大变形和小应变的特性。

(3) 杆单元

link8 单元是有着广泛的工程应用的杆单元, 比如可以用来模拟: 桁架、缆索、连杆、弹簧等。采用 link8 单元模拟体内、体外预应力钢绞线。这种三维杆单元是杆轴方向的拉压单元, 每个节点具有 3 个自由度: 沿节点坐标系 x 、 y 、 z 方向的平动, 就像在铰接结构中的表现一样, 本单元不承受弯矩。本单元具有塑性、蠕变、膨胀、应力刚化、大变形、大应变等功能。

3 成桥状态有限元分析

限于计算机硬件水平, 成桥状态有限元分析将 (70+11×120+70) m 简化为 (70+3×120+70) m 的 5 跨

结构进行计算,但严格按照 13 跨(边跨、次边跨和中跨)的施工顺序进行 5 跨结构的模拟。成桥状态静力计算采用三维有限元方法。箱梁的混凝土结构、钢结构及预应力结构分别采用不同的单元来模拟,将波形钢腹板箱梁离散为有限元模型。结构总体计算按合龙、张拉体外预应力钢束、施加二期恒载、施加活载等施工及营运流程进行顶底板混凝土应力、波形钢腹板应力及结构刚度(挠度)的计算,验算是否符合规范^[1]要求。

一期恒载的计算考虑了桥梁在合龙过程中发生的结构体系的转换过程,采用单元生死的方法进行模拟计算。二期恒载、活载及其他荷载(作用)均施加于成桥状态的模型上,并分别计算各项的效应。成桥状态计算共分 6 个单项进行,各个单项的计算结果根据规范要求组合^[7-8]。各计算单项内容如表 2 所示。

表 2 成桥状态各工况计算阶段划分

Tab 2 Division of computation stages of various operating modes of constructed bridge

计算项	计算内容
1	箱梁结构由悬臂过渡到连续,张拉体内钢束后,由一期恒载产生的荷载效应
2	张拉体外预应力钢束所产生的荷载效应
3	二期恒载所产生的荷载效应
4	活载产生的荷载效应
5	支座不均匀沉降产生的荷载效应
6	温度效应(升温与降温)

3 1 计算荷载

一期恒载按实际断面尺寸计取重量,箱梁混凝土重度按 26.5 kN/m^3 取值(考虑齿板计倒角增加等因素)。体内预应力钢束控制应力为 $1\,395\text{ MPa}$,根据经验预应力损失 20% ,有限元模型中施加初始应力为 $1\,116\text{ MPa}$;体外预应力钢束控制应力为 $1\,116\text{ MPa}$,根据经验预应力损失取 10% ,有限元模型中施加初始应力为 $1\,004.4\text{ MPa}$ 。二期恒载取值:桥面铺装厚度为 10 cm 沥青混凝土+ 8 cm 防水混凝土取 5.3 t/m ,墙式防撞护栏取 1.7 t/m 。计算取 7 t/m ,分 2 列加在腹板上方的顶板顶面上。

活载为 2 车道公路 I 级荷载,车道均布荷载标准值 $q_k=10.5\text{ kN/m}$;车道集中荷载标准值 $p_k=360\text{ kN}$ 。车道折减系数 1.0,纵向折减系数 1.0,冲击系数 1.05,车道集中荷载剪力效应系数 1.2,横向偏载按 2 车道荷载偏一侧腹板布置,波形钢腹板剪应力也在加载侧腹板取值,这样计算结果偏于保守,因此不再考虑偏载系数。不计汽车制动力影响。

温度力根据规范局部温差按矩形温度梯度计算,升温温差采用 $10\text{ }^\circ\text{C}$,降温温差采用 $-5\text{ }^\circ\text{C}$;支座差异沉降按 15 mm 计算^[9-11]。

3 2 有限元模型

主桥结构成桥状态有限元模型如图 3 所示。

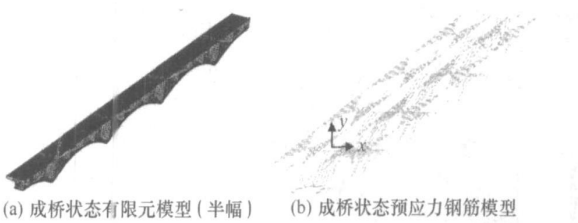


图 3 有限元模型

Fig 3 Finite element model

3 3 计算结果^[10-12]

计算结果提取路径为:顶板正应力取自顶板顶缘中心线位置,底板正应力取自底板底缘中心线位置,腹板应力取值位置为车道荷载所布置一侧腹板上距顶板顶面 1.5 m 水平线上;挠度取自顶板顶缘中心线位置。

(1) 正常使用极限状态下箱梁顶板混凝土正截面抗裂验算,见图 4。

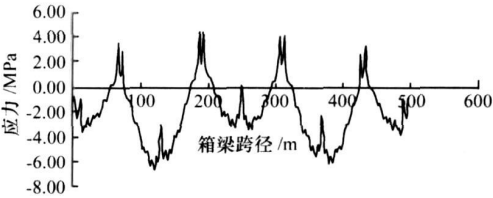


图 4 箱梁顶板顶缘混凝土正应力

Fig 4 Concrete normal stress of top plate of box girder

作用短期效应组合=一期恒载效应+二期恒载效应+ $0.7\times$ 车道荷载效应+ $0.8\times$ 梯度温度效应(降温 $5\text{ }^\circ\text{C}$)。规范限值:

$$\sigma_{st}-0.80\sigma_{pc}\leqslant 0,$$

式中, σ_{st} 为在作用短期效应组合下构件抗裂验算边缘混凝土的法向拉应力; σ_{pc} 为扣除全部预应力损失后的预加力在构件抗裂验算边缘产生的混凝土预压力。图 4 表明在短期作用效应组合下,根据规范正截面抗裂验算公式,箱梁顶板混凝土出现拉应力,最大值约为 4.48 MPa ,不满足规范要求。

(2) 正常使用极限状态下箱梁底板混凝土正截面抗裂验算,见图 5。

作用短期效应组合=一期恒载效应+二期恒载效应+ $0.7\times$ 车道荷载效应+ $0.8\times$ 梯度温度效应(升温 $10\text{ }^\circ\text{C}$)。规范限值: $\sigma_{st}-0.80\sigma_{pc}\leqslant 0$,式中参数意义同

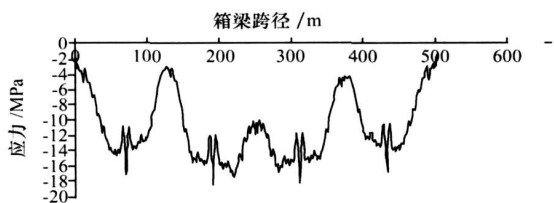


图5 箱梁底板混凝土正应力

Fig 5 Concrete normal stress of bottom plate of the box girder

组合(1)。

图5表明在短期作用效应组合下,根据规范正截面抗裂验算公式,箱梁底板混凝土未出现拉应力,满足规范^[1]要求。

(3)正常使用极限状态下箱梁顶板混凝土压应力验算,见图6。

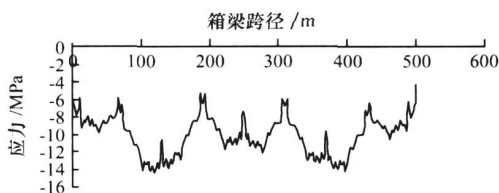


图6 箱梁顶板混凝土正应力

Fig 6 Concrete normal stress of top plate of box girder

标准值组合=一期恒载效应+二期恒载效应+车道荷载效应+梯度温度效应(升温 10 °C)。规范限值:

$$\sigma_{kc} + \sigma_{pt} \leq 0.5f_{ck},$$

式中, σ_{kc} 为由作用标准值产生的混凝土法向压应力; σ_{pt} 为由预加力产生的混凝土法向拉应力; f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值。

图6表明在作用效应标准值组合下,箱梁顶板混凝土最大压应力约为 14.3 MPa, 小于规范限值 16.2 MPa ($0.5f_{ck}$), 满足规范要求。

(4)正常使用极限状态下箱梁底板混凝土压应力验算,见图7。

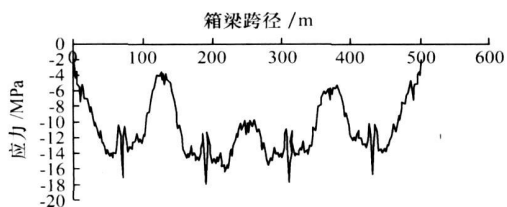


图7 箱梁底板混凝土正应力

Fig 7 Concrete normal stress of bottom plate of box girder

标准值组合=一期恒载效应+二期恒载效应+车道荷载效应+梯度温度效应(降温 5 °C)。规范限值: $\sigma_{kc} + \sigma_{pt} \leq 0.5f_{ck}$, 式中参数意义同组合(3)。

图7表明在作用效应标准值组合下,箱梁底板混凝土最大压应力约为 18.2 MPa, 大于规范限值 16.2 MPa ($0.5f_{ck}$), 不满足规范要求。

(5)正常使用极限状态下箱梁挠度验算

作用短期效应组合=一期恒载效应+二期恒载效应+0.7×车道荷载效应+0.8×梯度温度效应(降温 5 °C)。规范限值: 按作用短期效应组合计算挠度值, 并考虑长期增长系数 1.4, 小于 $L/600$; 汽车荷载作用下箱梁跨中最大向下挠度为 3.9 cm, 最大向上挠度为 0.7 cm, 计入挠度长期增长系数 1.40 后, 挠度值为 $1.40 \times (3.9 + 0.7) = 6.44$ cm, 小于 $L/600 = 20$ cm, 满足《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》第 6.5.3 条对挠度验算的要求。

(6)正常使用极限状态下箱梁波形钢腹板竖向剪应力验算, 见图8。

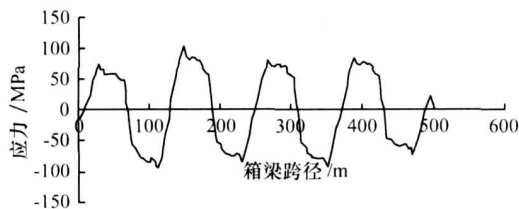


图8 箱梁波形钢腹板竖向剪应力

Fig 8 Vertical shear stress of corrugated steel web

标准值组合=一期恒载效应+二期恒载效应+车道荷载效应+梯度温度效应(降温 5 °C)。规范限值:

$$\tau \leq [\tau],$$

式中, τ 为由作用标准组合产生的钢腹板竖向剪应力; $[\tau]$ 为钢腹板剪应力强度设计值。

图8表明在作用短期效应组合下,箱梁波形钢腹板竖向剪应力最大约 101.0 MPa, 小于 180 MPa, 满足规范要求。

(7)波形钢腹板剪切屈曲验算^[5], 见图9。

对于波形钢腹板一般设计方法是, 根据箱梁整体布置确定腹板高度 h , 然后按抗剪强度计算选定钢板厚度 t , 查局部屈曲强度界限图确定最大波折段长度 a , 查整体屈曲强度界限图确定最小波高 d 。根据以上确定的几何参数计算合成屈曲强度并预留一定的安全度, 确保其大于钢腹板剪切屈服强度, 本文所述波形钢腹板局部和整体屈曲参数控制见图9^[5]。

按参考文献[5]提供的屈曲计算公式计算得本文的波形钢腹板剪切屈曲强度为 31 MPa, 远小于规

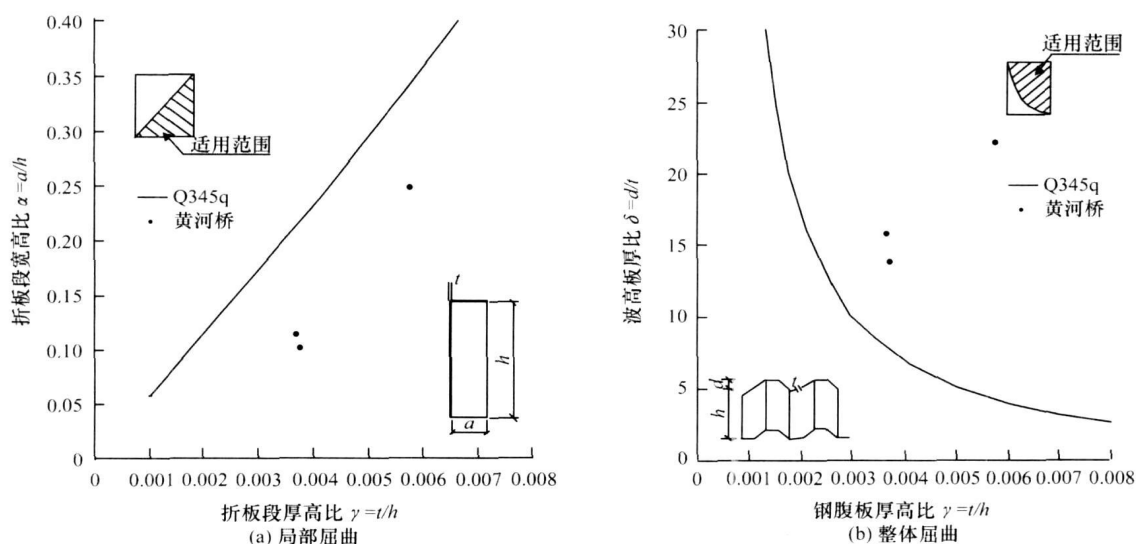


图9 本文所述黄河桥屈曲图表

Fig 9 Flexure graph of the bridge in this article

范限制限值。

4 结论

从以上成桥状态的静力计算结果以及波形钢腹板屈曲验算结果可以得出以下结论及建议:

(1) 波形钢腹板的钢板厚度可以满足要求;墩顶处顶板不满足抗裂要求。建议在施工图设计时增加顶板预应力钢绞线数量和体外预应力钢绞线数量,以改善墩顶处顶、底板混凝土的应力状态。

(2) 由正常使用极限状态下箱梁波形钢腹板竖向剪应力验算得出的腹板剪应力达到 101 MPa, 虽然满足规范限值, 但安全系数不高; 而由波形钢腹板屈曲验算得到的剪切屈服强度仅为 31 MPa, 安全系数很大。综合考虑, 可以提高梁高以使 2 个安全系数都达到合适的程度。

通过以上对成桥状态的静力计算和波形钢腹板屈曲验算, 可以初步完成一般桥梁上部结构分析。

参考文献:

References:

- [1] 王福敏, 张长青, 周长晓. 波形钢腹板箱梁研究成果综述 [J]. 公路交通技术, 2001 (1): 28-31.
WANG Fumin, ZHANG Changqing, ZHOU Changxiao. Research Results Summary of the Box-girder with Corrugated Steel Web [J]. Technology of Highway and Transport, 2001 (1): 28-31.
- [2] 王福敏. 波纹钢腹板箱梁试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 1997.
WANG Fumin. Experimental Research of Box-girder with Corrugated Steel Web [D]. Nanjing: Southeast University,

1997.

- [3] LEONHARDT F, ANDRA W, ANDRA H P, et al. Advantageous Interconnection Resources for Composite Steel Structures with High Fatigue Strength [J]. Beton Concrete and Steel, 1987, 82 (12): 325-331.
- [4] HOSAKA T, MITSUKI K, HIRAGI H, et al. Study on Shear Strength Equations and Design Method of Perfobond Strip [J]. Japanese Journal of Structural Engineering A, 2002, 48A (3): 1265-1272.
- [5] 朱高波. 悬臂施工波形钢腹板 PC 组合连续箱梁桥的设计研究 [D]. 南京: 东南大学, 2007.
ZHU Gaobo. Study and Design of the Pre-stressed Continuous Concrete Box-girder Bridge with Corrugated Steel Webs Constructed by Cantilevered Construction Method [D]. Nanjing: Southeast University, 2007.
- [6] 陈精一. 电脑辅助工程分析——ANSYS 使用指南 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001: 104-111.
CHEN Jingyi. Computer Assistant Engineering Analysis: ANSYS Operating Guide [M]. Beijing: Chinese Railroad Publishing House, 2001: 104-111.
- [7] 刘岚, 崔铁万. 本谷桥的设计与施工——采用悬臂架设施工法的波纹形钢腹板预应力混凝土箱梁桥 [J]. 国外桥梁, 1999 (3): 18-25.
LIU Lan, CUI Tiewan. Design and Construction of Bengu Bridge [J]. Foreign Bridges, 1999 (3): 18-25.
- [8] 波形钢板ウェブ桥計画マニュアル (案) [R]. 东京: 波形钢板ウェブ桥合成构造研究会, 1998.
Plan of PC Bridge with Corrugated Steel Webs (draft) [R]. Tokyo, Japan: Research Institute of the Composite Girder Bridge with Corrugated Steel Web, 1998.

(下转第 53 页)

- for Catwalks of Suspension Bridges [J]. Journal of Tongji University, 1998, 26 (4): 372—376
- [2] 贾宁. 悬索桥猫道动力特性及抗风稳定性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2004.
JIA Ning Study of Dynamic Behaviour and Wind Resisting Stability of Catwalk of Suspension Bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.
- [3] 宋一凡. 公路桥梁动力学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000: 178—181.
SONG Yifan Dynamics of Highway Bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2000: 178—181.
- [4] 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 Shixiong, ZHOU Shuhua, LIAO Haili. Study on Non-linear Wind Resisting Static Stability of Catwalk of Suspension Bridge [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2000, 35 (4): 348—351.
- [5] 韦世国, 廖海黎, 赵有明, 等. 润扬大桥悬索桥施工猫道抗风稳定性分析 [J]. 桥梁建设, 2004 (4): 1—3.
WEI Shiguo, LIAO Haili, ZHAO Youming, et al Wind Stability Analysis of Construction Catwalks for Suspension Bridge of Runyang Bridge [J]. Bridge Construction, 2004 (4): 1—3.
- [6] 杨鑫炎. 大跨度悬索桥施工猫道抗风稳定性分析 [J]. 铁道工程学报, 2004 (2): 46—49.
YANG Xinyan Analysis of Wind-resistant Stabilization of Long-span Suspension Bridge [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2004 (2): 46—49.
- [7] 乐云祥, 常英, 胡晓伦. 武汉阳逻长江大桥施工猫道抗风稳定性分析 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (8): 40—44.
YUE Yunxiang, CHANG Ying, HU Xiaolun Analysis of Wind-resistant Stability on the Catwalk of Wuhan Yangluo Yangtze River Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (8): 40—44.
- [8] 吴胜东. 润扬长江公路大桥建设: 科研、试验与勘测 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 548—555.
WU Shengdong The Collection of Runyang Yangtze River Bridge Construction Scientific Research, Experiment and Survey [M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 548—555.
- [9] 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 Jianxin, JIA Ning Vibration Control of Catwalks for Suspension Bridges [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26 (4): 54—57.
- [10] 常英, 乐云祥, 胡晓伦. 武汉阳逻长江大桥施工猫道设计与验算 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (12): 88—93.
CHANG Ying, YUE Yunxiang, HU Xiaolun Wuhan Yangluo Yangtze River Bridge Catwalk Design and Checking Computations [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (12): 88—93.
- [11] 张新军, 应磊东. 应用碳纤维缆索的大跨度悬索桥抗风稳定性研究 [J]. 土木工程学报, 2006, 39 (12): 79—82.
ZHANG Xinjun, YING Leidong Wind Stability of Long-span Suspension Bridges Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Cables [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39 (12): 79—82.
- (上接第46页)
- [9] 中华人民共和国建设部. GB50010-2002 混凝土结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
P. R China Ministry of Construction GB50010-2002 Code for Design of Concrete Structures [S]. Beijing: China Construction Industry Publisher, 2002.
- [10] 中华人民共和国交通部. JTG D60-2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
P. R China Ministry of Communications JTG D60-2004 Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [11] 中华人民共和国交通部. JTG D60-2004 公路桥涵通用设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
P. R China Ministry of Communications JTG D60-2004 General Code for Design of Highway Bridge and Culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.