

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2013.08.016

大跨径拱桥轴线横向偏差对结构的影响

梁岩, 罗小勇, 欧娅

(中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要:通过对实际工程中某大跨径钢筋混凝土拱桥施工轴线横向偏差前后的有限元分析,探讨拱轴线施工偏差对主拱内力、抗裂性能、应力、变形及拱肋纵向稳定性等的影响。分析计算表明:拱轴线偏移量较小时,偏移对结构内力和稳定性影响较小,但对变形和抗裂性影响较大,各截面应力均有所增大;主拱圈偏移后横向位移增长较大,而竖向位移变化较小,另外在拱脚附近抗裂性降低程度较大,部分截面最大裂缝宽度超出规范要求。提出了改善主拱圈受力状态、提高结构承载力及稳定性的一些措施。

关键词:桥梁工程;拱桥;轴线偏差;有限元;力学性能

中图分类号:U448.221

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2013)08-0092-04

Impact of Transverse Axis Deviation on Structure of Long-span Arch Bridge

LIANG Yan, LUO Xiao-yong, OU Ya

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

Abstract: The mechanical property of a long-span arch bridge in construction before and after the occurrence of transverse axis deviation is calculated by finite element analysis. The influence of the axis deviation on internal forces of main arch, cracking resistance, stress and deformation and longitudinal stability of the arch ribs are discussed. The result shows that (1) when the value of arch axis offset is small, the influence on structural internal force and stability is limited, but the influence on deformation and cracking resistance is remarkable, and the stresses in different sections of the main arch ring increase; (2) With the deviation of the main arch ring, the transverse displacement grow rapidly, but the vertical displacement changes fewer; (3) the anti-cracking performance near the springing of arch reduces effectively, and the maximum crack width of partial cross-section exceeds the requirement in specification. Some suggestions for improving the mechanical behavior of the main arch ring and the bearing capacity and stability of the structure are given.

Key words: bridge engineering; arch bridge; axis deviation; finite element; mechanical property

0 引言

拱桥由于其造型优美、受力合理等优点受到古今中外桥梁设计和建造者的青睐,在世界各地应用广泛。拱桥按合理拱轴线设计时,拱圈截面只受轴向压力而无弯矩作用,竖向轴线设计中可利用这一原理,使主拱圈仅承受轴向压力作用。但施工中,尤其是采用悬臂拼装法施工时,由于施工因素温度应力、混凝土收缩等原因,导致桥拱下沉,使之轴

线偏移,施工中较为普遍,在施工中设置一定预拱度,可减少轴线竖向偏差时对结构的不利影响。文献[1-4]对拱桥轴线优化设计进行了相关研究;文献[5-6]讨论了拱桥竖向拱轴线偏差的处理方法;文献[7-8]研究了抛物线单肋拱横向稳定的计算方法;文献[9-10]对抛物线在保向力及非保向力横向稳定性进行了相关研究。然而,桥梁在施工中受各种因素的影响和制约,轴线偏差除竖向偏差外,还有横向偏差。竖向偏差可以通过设置预拱

收稿日期:2013-01-31

作者简介:梁岩(1986-),男,河南洛阳人,博士研究生。(LYFEEL555@163.com)

度来消除^[11], 而横向偏差使结构产生平面外变形, 易发生平面外失稳, 对结构受力性能有较大影响, 且横向偏差难以消除。对于轴线横向偏差, 之前文献少有提及, 本文基于实际工程, 讨论由于拱桥轴线横向偏差对桥梁内力、抗裂性能、桥梁刚度等力学性能的影响。

1 工程概况

该工程为中国西部的一座钢筋混凝土箱形拱桥, 净跨 140 m, 矢跨比为 1/6, 拱轴系数为 2.24, 采用等截面悬链线箱型无铰拱, 主拱圈为 6 片预制箱梁拼装而成, 总宽度为 9 m。主拱圈采用缆索吊装施工, 吊装拱箱高 2.5 m。预制 T 梁、拱圈、拱座采用 C40 混凝土, 拱上立柱及盖梁、桥墩、桥墩盖梁、主拱桥台采用 C30 混凝土; 普通钢筋采用 R235 和 HRB335 钢筋。设计荷载为公路 II 级。

桥梁由于施工原因主拱圈轴线发生横向偏差, 使得主拱圈中出现横向弯矩, 结构处于复杂应力状态。现阶段在距桥梁左侧 55 m 处向下游方向发生 29.2 cm 的横向偏移, 跨中发生 18.8 cm 的横向偏移, 详见表 1, 表 1 中截面位置为距离左拱脚的距离。通过实测分析, 桥梁截面几何尺寸偏差在 4 cm 以内, 误差 0.44%, 对结构整体受力影响较小, 暂不考虑。

表 1 拱轴线横向偏差

Tab. 1 Values of transverse deviation of arch axis

位置/ m	横向偏差/ cm	位置/ m	横向偏差/ cm	位置/ m	横向偏差/ cm
25	9.3	65	23.6	105	7.4
30	13.5	70	18.8	110	6.6
35	17.4	75	14.5	115	6.5
40	19.3	80	18.6	120	2.0
45	22.4	85	21.4	125	1.8
50	26.8	90	17.6	130	0
55	29.2	95	13.7	135	0
60	27.5	100	12.8	140	0.5

2 模型建立

2.1 分析模型

模型采用有限元软件 Midas 进行分析计算, 模型采用梁单元, 考虑轴线偏移与不偏移 2 种情况, 有限元模型见图 1。

2.2 加载情况

桥梁承受荷载包括收缩荷载、恒荷载、施工荷载、车辆荷载、徐变荷载、拱肋温度荷载等, 主要验算拱轴线横向偏移后能否满足设计要求。

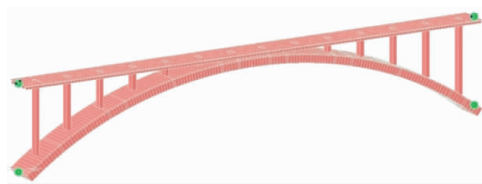


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

荷载组合: 荷载组合 I, 1.2 恒载 + 1.0 徐变荷载 + 1.0 收缩荷载 + 1.4 列车荷载 + 1.12 拱肋温度荷载; 荷载组合 II, 1.0 恒载 + 1.0 徐变荷载 + 1.0 收缩荷载 + 0.7/(1+v) 列车荷载 + 1.0 拱肋温度荷载; 荷载组合 III, 1.0 恒载 + 1.0 徐变荷载 + 1.0 收缩荷载 + 1.0 列车荷载 + 1.0 拱肋温度荷载。其中, 用荷载组合 I 验算承载能力极限状态, 用荷载组合 II、III 验算正常使用极限状态。

3 结构受力性能分析

3.1 内力分析

在荷载组合 I 作用下结构内力最大, 各控制截面在拱轴线偏移前后最大轴力比较见图 2。

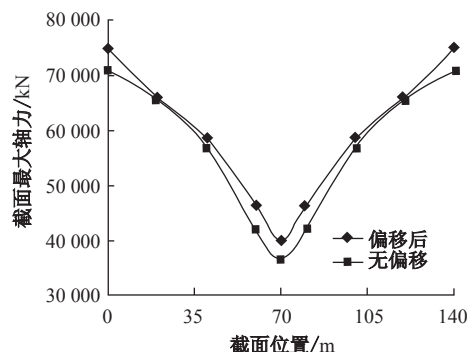


图 2 主拱偏移前后最大轴力对比

Fig. 2 Contrast of the maximum axial forces before and after offset of main arch

由图 2 的对比结果可知: (1) 主拱偏移后最大轴力大于抗压承载力, 但能满足规范要求; (2) 在拱顶附近位置, 偏移前和偏移后轴力值相差较大, 相差达到 10% 左右, 在其他位置相差较小, 在 5% 以内。

3.2 抗裂性能分析

根据《混凝土结构设计规范》^[12] 进行抗裂性计算, 计算过程为:

$$\omega_{\max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_s}{E_s} \left(1.9c_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right), \quad (1)$$

式中各参数详见文献 [12]。

荷载组合 II 作用下, 抗裂性能最为不利, 主拱

偏移前后桥梁各截面裂缝宽度对比见表 2。

表 2 主拱偏移前后裂缝对比

Tab.2 Contrast of crack widths before and after offset of main arch

位置/m	裂缝宽度/(× 10 ⁻² mm)		比值
	无偏移	偏移后	
0	21.06	21.08	1.001
20	0.32	0.83	2.594
40	5.47	5.61	1.026
60	3.89	3.79	0.974
70	3.74	3.48	0.930
80	3.89	3.75	0.964
100	5.47	5.66	1.035
120	0.32	1.24	3.875
140	21.06	19.82	0.941

由表 2 计算结果可知，主拱偏移后裂缝出现增长，尤其在 20 m 和 120 m 截面附近增长幅度较大。由于设计要求的最大裂缝宽度限值为 0.15 mm^[13]，可知在 0 m 截面和 140 m 截面即左右拱脚截面抗裂性能有所降低，裂缝宽度超过了《规范》^[13] 要求，其他截面抗裂性能变化不大。

3.3 应力分析

根据有限元分析计算结果可以得到主拱偏移前后应力比较见图 3 和图 4。

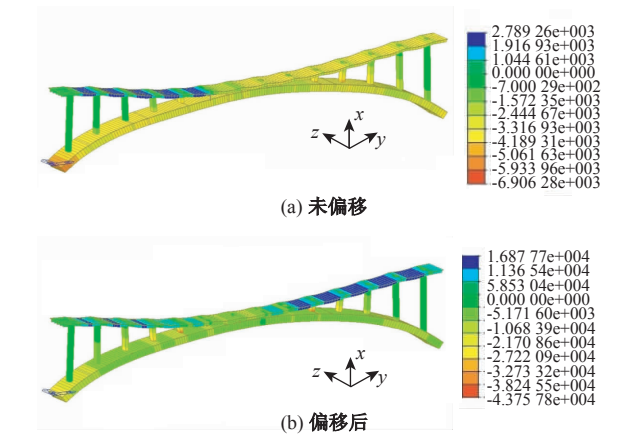


图 3 拱轴线偏差前后桥梁应力分布

Fig.3 Stress distributions of bridge before and after offset of main arch

由图 4 可知，主拱发生偏移后，桥梁各截面压应力均有所增大，但基本满足规范要求。

3.4 变形分析

在荷载组合Ⅲ作用下，结构变形最大主拱偏移前后桥梁各截面横向位移比较见图 5，竖向位移比较见图 6。

由图 5、图 6 可知因为主拱偏移，主拱圈横向的

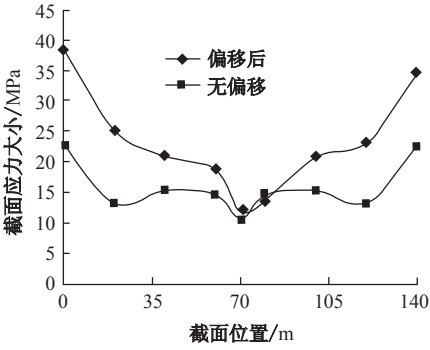


图 4 主拱偏移前后应力对比

Fig.4 Contrast of stresses before and after offset of main arch

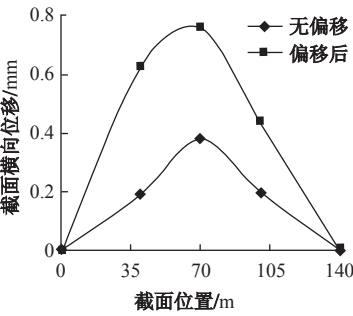


图 5 主拱偏移前后横向位移比较

Fig.5 Contrast of transverse displacements before and after offset of main arch

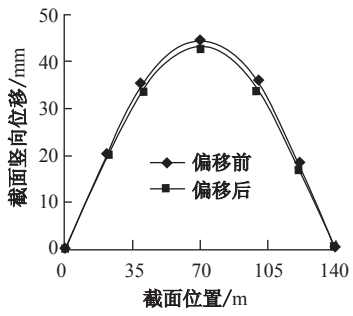


图 6 主拱偏移前后竖向位移对比

Fig.6 Contrast of vertical displacements before and after offset of main arch

位移增长较大，达到偏移前横向位移值的 2 倍左右，而主拱圈竖向位移变化较小。

3.5 拱肋的纵向稳定性分析

由《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[14]可知，拱桥的稳定性按式 (4) 计算：

$$\gamma_0 N \leq 0.9\varphi(f_{cd}A + f'_{sd}A'_s), \quad (4)$$

式中， φ 为稳定性系数，取 $\varphi = 0.73$ ； γ_0 为重要性系数，取 $\gamma_0 = 1.0$ ； f_{cd} 为主拱混凝土抗压强度设计值， $f_{cd} = 18.4 \text{ MPa}$ ； A 为构件毛面积， $A = 8.802 \text{ m}^2$ ； f'_{sd}

为钢筋抗拉强度设计值, $f_{sd} = 280 \text{ MPa}$; A'_s 为纵向钢筋面积, $A'_s = 205\,883 \text{ mm}^2$; N 为拱的轴向力组合设计值, N 按式 (5) 计算:

$$N = H_d / \cos \varphi_m \quad (5)$$

拱的水平推力组合设计值 H_d 经模型计算为 52 332.5 kN, 拱顶与拱角连线与水平线的夹角 φ_m 为:

$$\cos \varphi_m = \frac{70}{73.885} = 0.947\,4 \quad (6)$$

综上可以得到:

$$\gamma_0 N = 55\,238.0 \text{ kN} < 0.9\varphi(f_{cd}A + f'_{sd}A'_s) = 144\,763.5 \text{ kN} \quad (7)$$

由式 (7) 可以知道, 结构在拱轴线偏移后仍满足稳定性要求。

5 结论

根据对桥梁偏移前后建模进行有限元计算分析, 得出主要结论如下:

(1) 由于偏移量较小, 偏移后主拱承载力、拱肋纵向稳定性变化不大, 且均能满足规范要求, 但结构安全性有所下降;

(2) 拱轴线横向偏差对拱圈内力有一定影响, 在拱顶附近位置, 偏移前和偏移后轴力值相差较大, 在其他位置相差较小;

(3) 拱轴线出现横向偏差后, 拱圈抗裂性能较偏差前有所下降, 尤其在拱脚附近抗裂性降低程度较大, 部分截面最大裂缝宽度超出规范要求, 需要进行一定的加固措施;

(4) 由于主拱偏移, 主拱圈横向位移增长较大, 达到偏移前横向位移值的 2 倍左右, 而主拱圈竖向位移变化较小。

拱桥轴线横向偏差的存在导致了桥梁性能发生改变, 对于桥梁行车安全性和舒适性有一定影响。在桥梁施工中, 需要加强对桥梁横向轴线符合设计要求的监控力度, 避免此类情况的发生。若发生轴线偏差可调整主拱圈上部结构或行车道位移, 或扩大主拱圈截面有效尺寸的措施, 如根据横向偏移量在两侧各增加一条箱型拱肋以平衡拱轴线的横向偏差, 从而改善主拱圈受力状态, 提高结构整体承载力和稳定性。

参考文献:

References:

[1] 刘毓湘, 高敬红. 基于 4 次样条函数拱轴线优化设计

的 T-V 求解法 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (6): 80-85.

LIU Yu-xiang, GAO Jing-hong. Topkis-Veinott Feasible Direction Method for Optimum Axis of Arch Bridge Based on Quartic Spline Function [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (6): 80-85.

[2] 裘伯永. 拱轴线最优选择 [J]. 长沙铁道学院学报, 1991, 9 (3): 140-148.

QIU Bo-yong. Arch Axis Shape Optimization [J]. Journal of Changsha Railway University, 1991, 9 (3): 140-148.

[3] 蒋启平. 三次样条插值确定拱桥合理拱曲线的方法探讨 [J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2001, 25 (1): 14-17.

JIANG Qi-ping. A Study of Method of Determining Rational Arch Axis Using Three Order Splin Interpolation [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering Edition, 2001, 25 (1): 14-17.

[4] 林阳子, 黄侨, 任远. 拱桥拱轴线的优化与选形 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (3): 59-63.

LIN Yang-zi, HUANG Qiao, REN Yuan. Optimization and Selection of Arch Bridge Axis [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (3): 59-63.

[5] 刘九生, 王国鼎. 大跨径拱桥拱轴线允许偏差的探讨 [J]. 华东公路, 2000 (6): 17-18.

LIU Jiu-sheng, WANG Guo-ding. Investigation on the Allowable Deviation of Arch Axis of Large-span Arch Bridge [J]. East China Highway, 2000 (6): 17-18.

[6] 张佳. 拱轴线偏差对既有钢筋混凝土拱桥结构行为影响的研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011: 31-54.

ZHANG Jia. Investigation on Impact of Arch Axis Deviation on Structural Behavior of Existing Reinforced Concrete Arch Bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011: 31-54.

[7] 杨永清, 蒲黔辉, 何广汉. 抛物线单肋拱横向稳定实用计算 (一) [C]//第八届全国结构工程学术会议论文集 (第 III 卷). 北京: 中国力学学会工程力学编辑部, 1999: 866-871.

YANG Yong-qing, PU Qian-hui, HE Guang-han. Computing of the Laterally Stability of Parabolic Single Rib Arch (1) [C]// Proceedings of the 8th National Symposium on Structural Engineering (III). Beijing: Engineering Mechanics Editorial Office of CSTAM, 1999: 866-871.

(下转第 112 页)

- 面内塔-线耦合效应与TMD减震控制研究[J]. 振动工程学报, 2012, 25 (4): 431-438.
- ZHAI Chang-hai, WU Gang, LI Shuang, et al. Tower-lines In-plane Coupling and TMD Seismic Control of Large Crossing Transmission Tower Lines System [J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25 (4): 431-438.
- [5] 李枝军, 韩晓林, 李爱群, 等. 悬索桥桥塔挂缆前后动态特性分析与测试[J]. 中国公路学报, 2007, 20 (5): 54-58.
- LI Zhi-jun, HAN Xiao-lin, LI Ai-qun, et al. Dynamic Analysis and Test of Bridge Tower of Suspension Bridge Before and After Cable Installed [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20 (5): 54-58.
- [6] FEI Q G, ZHOU H G, HAN X L, et al. Structural Health Monitoring Oriented Stability and Dynamic Analysis of a Long-span Transmission Tower-line System [J]. Engineering Failure Analysis, 2012, 20 期?: 80-87.
- [7] ÖZTÜRK H, SABUNCU M. Stability Analysis of a Cantilever Composite Beam on Elastic Supports [J]. Composites Science and Technology, 2005, 65 (13): 1982-1995.
- [8] WU J S, CHEN C T. Forced Vibration Analysis of an Offshore Tower Carrying an Eccentric Tip Mass with Rotary Inertia Due to Support Excitation [J]. Ocean Engineering, 2007, 34 (8/9): 1235-1244.
- [9] LI X F, TANG A Y, XI L Y. Vibration of a Rayleigh Cantilever Beam with Axial Force and Tip Mass [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 80: 15-22.
- [10] AUCIELLO N M, ERCOLANO A. A General Solution for Dynamic Response of Axially Loaded Non-uniform Timoshenko Beams [J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41 (18/19): 4861-4874.
- [11] MAZANOGLU K, SABUNCU M. Vibration Analysis of Non-uniform Beams Having Multiple Edge Cracks along the Beam's Height [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2010, 52 (3): 515-522.
- [12] YOSHIDA O, OKUDA M, MORIYA T. Structural Characteristics and Applicability of Four-span Suspension Bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9 (5): 453-463.
- [13] 柴生波, 肖汝诚, 张学义, 等. 多跨悬索桥中塔纵向刚度研究[J]. 中国公路学报, 2012, 25 (2): 67-71.
- CHAI Sheng-bo, XIAO Ru-cheng, ZHANG Xue-yi, et al. Study of Longitudinal Stiffness of Middle Pylon in Multi-span Suspension Bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25 (2): 67-71.
- [14] 王俊, 孙航, 刘伟庆, 等. 悬索桥裸塔振动基频快速算法[J]. 公路交通科技, 2011, 28 (11): 90-94.
- WANG Jun, SUN Hang, LIU Wei-qing, et al. A Rapid Algorithm of Fundamental Frequency for Free-standing Pylon of Suspension Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (11): 90-94.
- [15] 邹敏勇, 郑修典, 王忠彬, 等. 泰州长江公路大桥三塔悬索桥中塔方案设计[J]. 世界桥梁, 2008 (1): 5-7.
- ZOU Min-yong, ZHENG Xiu-dian, WANG Zhong-bin, et al. Conceptual Design of Intermediate Tower of Three Tower Suspension Bridge of Taizhou Changjiang River Highway Bridge [J]. World Bridges, 2008 (1): 5-7.

(上接第95页)

- [8] 杨永清, 蒲黔辉, 何广汉. 抛物线单肋拱横向稳定实用计算(二)[C]//第八届全国结构工程学术会议论文集(第Ⅲ卷). 北京: 中国力学学会工程力学编辑部, 1999: 872-879.
- YANG Yong-qing, PU Qian-hui, HE Guang-han. Computing of the Laterally Stability of Parabolic Single Rib Arch (2) [C] // Proceedings of the 8th National Symposium on Structural Engineering (Ⅲ). Beijing: Engineering Mechanics Editorial Office of CSTAM, 1999: 872-879.
- [9] 杨永清. 抛物线双肋拱在保向力作用下的横向稳定性[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38 (1): 43-48.
- YANG Yong-qing. Lateral Stability of Parabolic Double-rib Arch under Directional Loads [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 38 (1): 43-48.
- [10] 杨永清, 蒲黔辉. 抛物线双肋拱在非保向力作用下的横向稳定性[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38 (3): 309-313.
- YANG Yong-qing, PU Qian-hui. Lateral Stability of Parabolic Double-rib Arch under Non-directional Loads [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 38 (3): 309-313.
- [11] 刘山洪, 李放, 袁长红. 拱轴线横向偏离对拱圈静力行为影响[J]. 重庆交通学院学报, 2007, 26 (1): 14-18.
- LIU Shan-hong, LI Fang, YUAN Chang-hong. Influences of Transverse Bias of Arch Axis on the Arch Ring Behavior under Static Loads [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2007, 26 (1): 14-18.
- [12] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures [S].
- [13] GB 50204—2002, 混凝土结构工程施工质量验收规范[S].
- GB 50204—2002, Code for Acceptance of Constructional Quality of Concrete Structures Engineering [S].
- [14] JTG D62—2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- JTG D62—2004, Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts [S].