

Analysis of Static Performance in the Construction Process of Concrete Arch Bridge of Upper-Carrying Steel Pipe under the Action of Wind Load

Renzhi Sha

First Engineering Co. Ltd., China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group, Dalian Liaoning
Email: 719698432@qq.com

Received: Nov. 4th, 2019; accepted: Nov. 19th, 2019; published: Nov. 26th, 2019

Abstract

Steel pipe concrete arch bridge as an internal high-situ super-static structure, the wind load will have an effect on the internal force and displacement of the structure during the construction process. In view of this influence, this paper takes the construction of the Zhaolongba Special Long Span Bridge as an example, based on the finite element analysis method, establishes a three-dimensional finite element model, and analyzes the static performance of the steel pipe concrete arch bridge under the wind load. The results show that when the rapid construction method of removing the sling and two grouting slots is used after the closed, the force and displacement of the main arch ring under the wind load are to meet the safety conditions, and the force conditions at the arch feet should be paid attention to during the construction monitoring.

Keywords

Wind Load, Steel Pipe Concrete, Finite Element, Static Performance, Rapid Construction

风荷载作用下上承式钢管混凝土拱桥施工过程中静力性能分析

沙仁智

中铁建大桥工程局集团, 第一工程有限公司, 辽宁 大连
Email: 719698432@qq.com

收稿日期: 2019年11月4日; 录用日期: 2019年11月19日; 发布日期: 2019年11月26日

摘要

钢管混凝土拱桥作为一个内部高次超静定结构, 在施工过程中风荷载必将对结构的内力及位移都产生影响。针对这种影响, 本文以找龙坝河特大桥的施工情况为例, 基于有限元分析方法, 建立三维有限元模型, 分析了风荷载下钢管混凝土拱桥的静力性能。结果表明, 在采用合龙后拆除吊索且上下拱肋分两次灌浆的快速施工方式时, 风荷载下主拱圈的受力及位移是满足安全条件的, 在施工监控时应当注意拱脚处受力情况。

关键词

风荷载, 钢管混凝土, 有限元, 静力性能, 快速施工方式

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢管混凝土拱桥作为一种新型桥型, 以轻巧的整体结构, 优秀的跨越能力和美观的造型在近 20 年得到了迅速推广与应用。钢管混凝土在受压时能够产生紧箍力, 使混凝土呈现三向应力状态, 使其承载能力大大提高。钢管混凝土构件充分发挥混凝土和钢材的材料性能, 提高了构件的承载能力, 同时又具有较好的塑性和韧性, 为高强混凝土和高强钢材的应用提供了广阔的途径。

我国的钢管混凝土拱桥多位于山区峡谷地形, 复杂的地形地貌导致气象条件十分复杂。因此, 结构在风荷载下的静力性能, 是关系到施工安全和运营安全的重要问题, 应予以高度重视。本文通过 MIDAS 软件模拟不同工况, 对湖北省恩施市找龙坝河特大桥进行了横向风荷载下的静力性能分析

2. 桥梁概况

找龙坝河特大桥是位于银川至北海高速公路建始(陇里)至恩施(罗针田)段的一座整体式桥梁, 主桥中心桩号为 K88 + 899, 起讫桩号: K88 + 692.800~K89 + 035.780, 全长 342.98 m。桥轴线自北东往南西走向, 方位角 195°。主桥为上承式钢管混凝土拱, 拱跨 225 m, 矢高 45 m, 矢跨比 1/5, 拱上桥跨共 15 孔, 单孔跨径为 16 m, 建始岸引桥为 2~40 m, 恩施岸引桥为 1~16 m, 纵坡位于 0.55%和-0.54%直线坡组成的凸型竖曲线内, 平面位于直线段内, 具体桥型布置总体布置图如图 1 所示。设计速度 80 km/h, 桥面宽 24.5 m。主拱圈空钢管采用缆索吊装法分段施工。为缩短工期, 合龙后拆卸吊索, 架设部分拱上立柱。上下拱肋分两次相隔 7 天灌注管内混凝土。

3. 有限元模型

为模拟钢管混凝土拱桥拆除吊索后, 灌注下拱肋混凝土且混凝土与钢管还未联合受力的工况下, 在横向风荷载作用下桥梁结构的工作状态, 研究风荷载对钢管混凝土拱桥静力性能的影响, 利用有限元分析软件 Midas Civil 建立了主拱圈计算模型, 如图 2 所示。模型使用梁单元模拟, 钢管混凝土拱肋截面为钢混组合的管型截面, 其中混凝土弹性模量为 3.45×10^4 MPa, 泊松比为 0.2, 密度为 2500 kg/m^3 , 主拱肋、拱上立柱、扣点反力梁及钢箱盖梁均采用 Q345D 钢, 弹性模量: $E_k = 2.06 \times 10^5$ Mpa。整个模型共建立节

点 876 个, 单元 1956 个。在施工过程中, 1/3 的拱上立柱在拱肋空钢管状态下施工, 其分析模型见图 3。

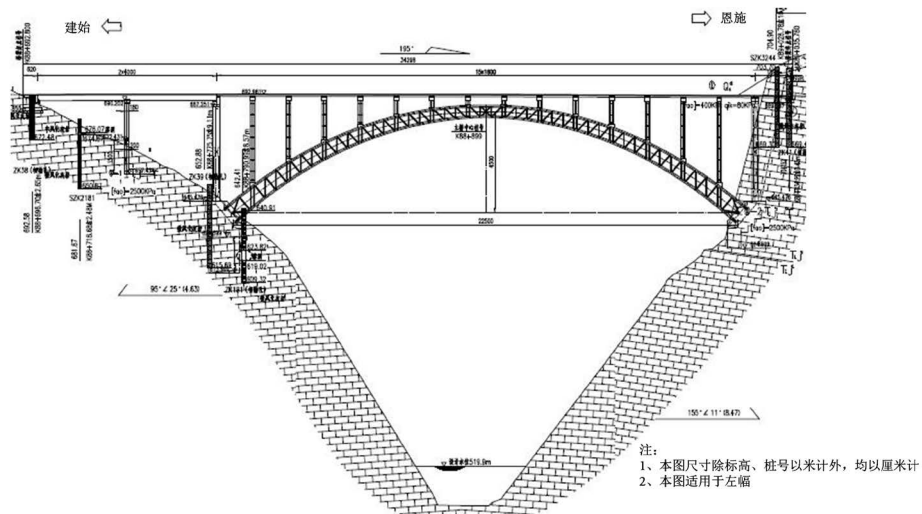


Figure 1. Zhaolongba river bridge layout
图 1. 找龙坝河特大桥梁布置图

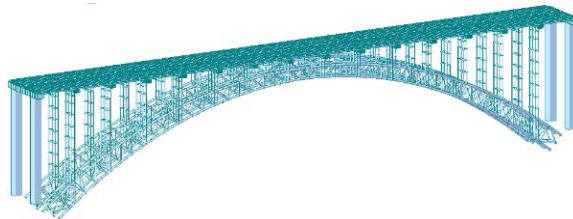


Figure 2. Full bridge model diagram
图 2. 全桥模型图

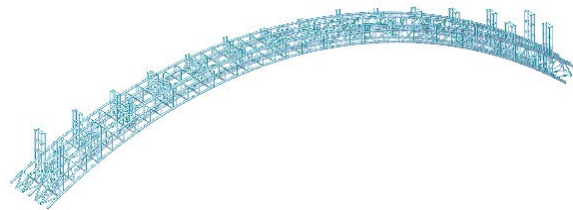


Figure 3. Main arch ribs and 1/3 arch upper column model
图 3. 主拱肋及 1/3 拱上立柱模型

4. 桥为边界层风特性分析

《公路桥梁抗风设计规范》[1]中的地表粗糙度 A、B、C、D 的分类方式适用于各向同性的开阔地形, 由于桥址处于山区峡谷特殊地形, 不适宜直接按地形归类。参考《公路桥涵设计通用规范》JTG D60-2004 [2]规定中 4.3.7 条, 峡谷地形风速高度修正系数按 B 类地表 $\alpha_1 = 0.16$ 取值, 边界层厚度 $\delta_1 = 350$ m。据《公路桥梁抗风设计规范》中的全国基本风速分布图和全国各气象台站的基本风速值, 结合设计文件的荷载参数取值, 找龙坝河大桥桥位处标准高度 10 m、平均时距 10 min、重现期 100 年的设计基本风速取为 25.8 m/s [3]。

4.1. 设计基准风速

根据上述设计基本风速和《公路桥梁抗风设计规范》的有关规定, 桥梁设计基准风速为

$$V_d = V_{10} \left(\frac{z}{z_{10}} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中, z 表示跨中桥面离开水面的高度; z_{10} 表示标准高度, 即 $z_{10} = 10 \text{ m}$; V_{10} 表示桥位 10 m 高度处设计基本风速, 即 $V_{10} = 25.8 \text{ m/s}$; α 表示幂指数, 取 $\alpha = 0.16$ 。桥面(拱脚)离水面高度按平均水位计算为 $z = 121 \text{ m}$, 则成桥状态桥面(拱脚)高度处设计基准风速为:

$$V_{d1} = V_{10} \left(\frac{z}{z_{10}} \right)^\alpha = 25.8 \left(\frac{121}{10} \right)^{0.16} = 38.4 (\text{m/s}) \quad (2)$$

拱顶处离水面高度为 $z = 166 \text{ m}$, 则成桥状态拱顶高度处设计基准风速为:

$$V_{d2} = V_{10} \left(\frac{z}{z_{10}} \right)^\alpha = 25.8 \left(\frac{166}{10} \right)^{0.16} = 40.2 (\text{m/s}) \quad (3)$$

针对施工过程, 考虑施工期的风速重现期对计算设计基准风速的影响, 查阅《公路桥梁抗风设计规范》表 3.3.1, 偏保守取施工期重现期为 10 年, 风速折减系数为 0.84, 因此

$$V_{sd1} = 38.4 \times 0.84 = 32.3 (\text{m/s}) \quad (4)$$

$$V_{sd2} = 40.2 \times 0.84 = 33.8 (\text{m/s}) \quad (5)$$

4.2. 静风失稳检验风速

参考《公路桥梁抗风设计规范》中有关悬索桥或斜拉桥静风失稳检验风速的规定, 桥面(拱脚)及拱顶处静风失稳检验风速分别为:

$$V_{b1} \geq 2V_{sd1} = 2 \times 32.3 = 64.6 (\text{m/s}) \quad (6)$$

$$V_{b2} \geq 2V_{sd2} = 2 \times 33.8 = 67.6 (\text{m/s}) \quad (7)$$

4.3. 拱肋静气动力系数

大桥钢管桁架拱肋典型断面布置如图 4 所示。鉴于目前无试验实测拱肋气动力系数, 考虑到拱肋构件均为表面光滑圆钢管, 且为透风率较高的桁架结构形式, 因此钢管拱肋静风稳定分析中主要考虑风阻力影响, 依据抗风规范中的静风分析中桥梁结构构件阻力系数取值的规定进行取值[4] [5]。

根据《公路桥梁抗风设计规范》4.3.4 条, 桁架桥上部结构的风载阻力系数 C_H 。当上部结构为两片及以上桁架时, 所有迎风桁架的风载阻力系数均取为 ηC_H , η 为遮挡系数。根据计算, 大桥钢管桁架拱肋的实面积比为 0.54, 上下主弦杆直径 $D = 1.0 \text{ m}$, 静风检验风速 $V_o = 67.6 \text{ m/s}$, 因此按规范拱肋圆钢管风载阻力系数取值 = 0.8。同时根据钢管拱肋各桁架间距计算间距比, 取遮挡系数为 0.5。因此, 钢管桁架拱肋上静风阻力系数最终取为 $\eta C_H = 0.4$ 。拱肋钢管风载阻力按式 8 计算加载:

$$F_H = \frac{1}{2} \rho V_d^2 \eta C_H H \quad (8)$$

式中 H 为构件迎风投影高度。

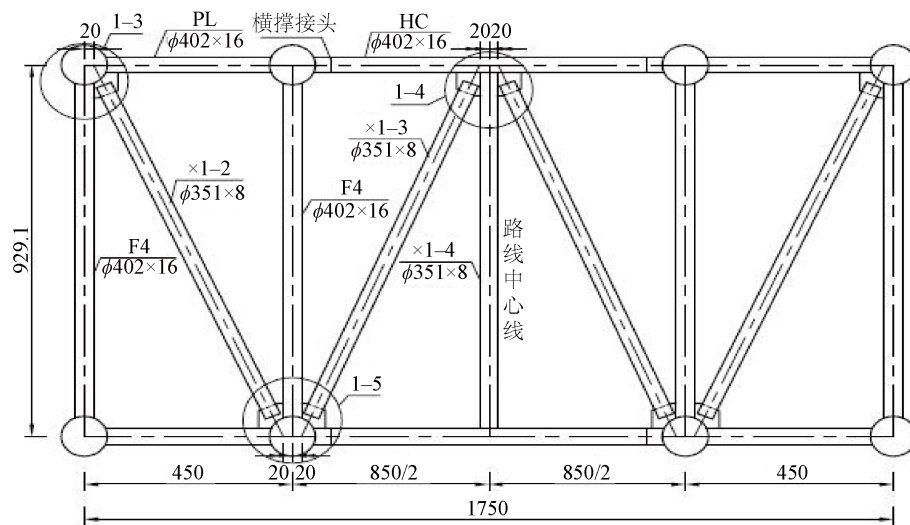


Figure 4. Master arch section layout schematic
图 4. 主拱断面布置示意

5. 静力性能计算与分析

在拆除吊索前提下，下拱肋四根钢管灌注混凝土且混凝土未与钢管联合受力时。混凝土不仅无法参与受力减轻钢管所受荷载，还会因自重对钢管产生压力[6] [7]。所以选取该工况作为最不利荷载工况进行计算分析。

5.1. 位移

其主拱结构的横桥向及竖向位移响应如图 5、图 6 所示，横桥侧向位移由拱脚至跨中均匀增大，未出现突变。其中跨中截面位移最大，最大位移响应为 8.7 cm。两拱肋一侧竖向形变趋势为在拱脚到跨中处先增大后减小至 -0.9 cm，一侧先减小后增大至 0.9 cm，在 1/4 拱肋处竖向位移皆为 0 cm。这是由于受单侧风荷载作用下主拱圈的扭转造成的。经计算，扭转角度为 0.06° ，符合安全要求。

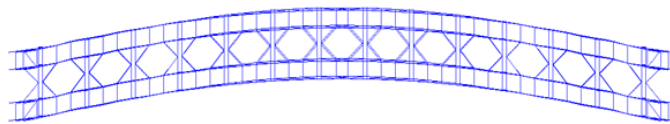


Figure 5. Lower arch ribs filled with concrete and unbound edge bridge displacement response

图 5. 下拱肋灌注混凝土且未联合状态横桥向位移响应

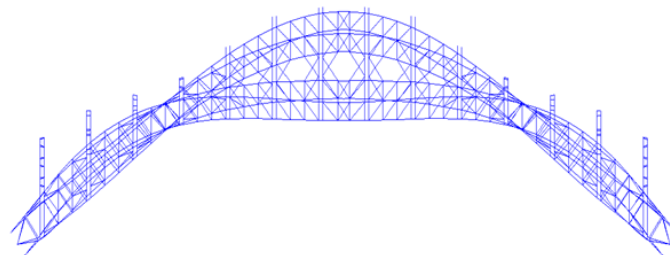


Figure 6. Lower arch ribs filled with concrete and not unioned state vertical displacement response

图 6. 下拱肋灌注混凝土且未联合状态竖向位移响应

在该工况下进行静风稳定分析,考虑结构的对称性,选取小里程一侧拱肋跨中及L/4处位移进行比较[8][9]。从计算结果可以看出,主拱位移在不同风速下位移无明显突变,如图7和图8。随风速增大拱顶处与L/4处横向位移变化趋势一致,L/4处横向位移曲线在拱顶处位移曲线的下方。当风速为150 m/s时,拱顶横向位移约为45 cm,L/4处为30 cm。而风速增大时拱顶与L/4处的竖向位移则变化趋势截然不同,由图6可知其特点是L/4处竖向位移基本为0 cm,拱顶处随风速增大竖向位移相应增大。选取主拱扭转角度大于 5° 作为失稳判别标准,经简单的三角函数计算易知静风失稳临界风速大于150 m/s,满足安全要求。

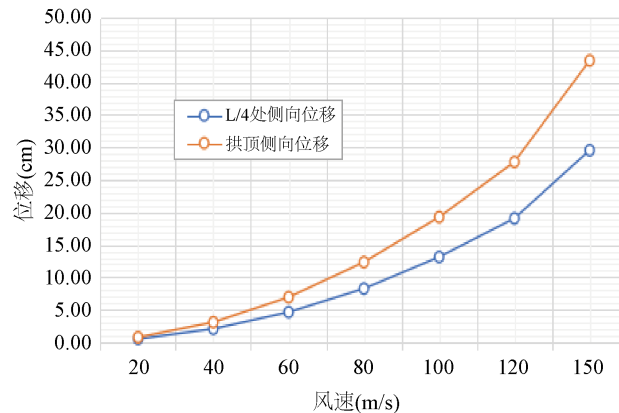


Figure 7. Horizontal displacement at different wind speeds

图7. 不同风速下的横向位移

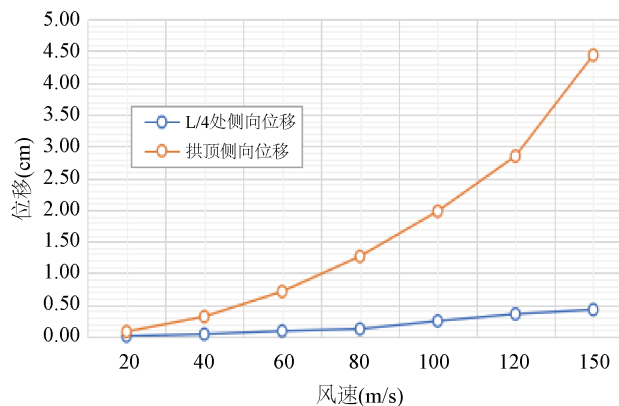


Figure 8. Vertical displacement at different wind speeds

图8. 不同风速下的竖向位移

5.2. 内力及应力

拱肋钢管静风检验风速下的内力分布如表1所示,由于主拱肋由上下各四根钢管组成,表中数值皆选取其中最大数值。

由表1可知在检验风速下,拱脚处内力及应力最大,L/4处次之,拱顶最小。剪力在横桥向与竖向的最不利荷载大小差异不大。顺桥向最大弯矩约为横桥向最大弯矩的1/3,这是由于此时拱肋受单侧横向风荷载。其应力最大值远小于钢材抗拉强度,符合安全要求。所有最不利荷载皆出现在拱脚处,因此在施工控制过程中应当对拱脚处受力情况加以重视。

Table 1. Lower arch ribs filled with concrete and uncombined state static wind-induced internal force
表 1. 下拱肋灌注混凝土且未联合状态静风风致内力

	拱脚(小里程)	L/4	拱顶	L/4	拱脚(大里程)	最不利荷载
轴力(KN)	2220.19	540.85	380.20	545.87	2548.85	2548.85
剪力 Q_y (KN)	336.16	2.10	-0.79	-2.12	-204.63	336.16
剪力 Q_z (KN)	382.79	-36.46	0.00	-36.32	-30.17	382.79
弯矩 M_y (KN·m)	-33.22	-30.76	22.31	-30.51	-167.28	-312.89
弯矩 M_z (KN·m)	193.73	47.14	17.49	-47.12	-1031.96	-1031.96
应力(MPa)	74.9	4.49	2.86	4.62	42.4	74.9

6. 结论

本文以凯峡河特大桥为例,针对钢管混凝土拱桥的结构特点建立了有限元模型,分析了横向风荷载下主拱圈的受力情况,并计算分析了不同风速下主拱圈的竖向及横向位移情况,得到以下结论:

- (1) 通过建立钢管混凝土拱桥有限元模型,可以比较系统地反应风荷载下钢管混凝土拱桥的静力特性。
- (2) 在合龙后拆除吊索,且将上下主拱圈钢管分两次相隔 7 天进行灌浆的快速施工方法是可行的。其最不利荷载符合安全受力要求,钢管所受应力在风荷载下为 74.9 MPa,没有超过限制。
- (3) 在检验风速下,横桥侧向最大位移响应为 8.7 cm,竖向最大位移响应 0.9 cm,扭转角度为 0.06°,几乎无变化。
- (4) 主拱圈最不利荷载皆出现在拱脚处,在施工过程中,应当着重对拱脚处钢管进行施工监测以确保安全。

参考文献

- [1] 部门中交公路规划设计院. 公路桥梁抗风设计规范[M]. 北京: 人民交通出版社.
- [2] JTG D60-2015 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [3] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [4] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥施工问题研究[J]. 桥梁建设, 2002(3): 55-59.
- [5] 郭聚坤. 大跨度钢管混凝土灌注的仿真模拟分析研究[D]: [硕士学位论文]. 长安大学, 2011.
- [6] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥发展综述[J]. 桥梁建设, 1997(2): 10-15+24.
- [7] 耿悦, 吴欣荣, 王玉银. 施工过程对钢管混凝土桁式拱桥长期静力性能的影响[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(S1): 52-58.
- [8] 冷捷, 张毅. 关于大跨度钢管混凝土拱桥抗风研究的若干问题[J]. 商丘师范学院学报, 2008, 24(3): 66-69.
- [9] 郑景祥. 某钢管混凝土系杆拱桥静动载试验分析[J]. 福建交通科技, 2017(3): 45-47.