

Analysis of Stress State in the Whole Life Process of Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge

Xiaoyu Wu

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

Received: Nov. 6th, 2019; accepted: Nov. 21st, 2019; published: Nov. 28th, 2019

Abstract

To study the life-cycle stress state of concrete-filled steel tubular arch bridge, the finite element software MIDAS/CIVIL was used to accurately simulate the space dimensions of component, material properties, connecting details and initial stress, etc. The whole bridge was divided into 10 cases, for example, empty steel tube without hanger cable, empty steel tubes with columns on the rib, casting concrete in bottom chord, casting concrete in upper chord, and service process, to analyze the whole process stress state of the steel tube. The results show that the stress of the upper and lower steel tube increases continuously in the whole life process, but does not exceed the limit. The stresses of the steel tube at the upper and bottom chords of the arch rib have a certain deviation. The stress of lower chord of the steel tube near the arch foot and L/4 span are respectively 81.1% and 7.4% larger than those of the upper chord, while the arch top is 55.1% larger than that of the bottom chord. The stresses of steel tube at arch foot and arch top are the most unfavorable sections in the whole life process.

Keywords

Concrete-Filled Steel Tubular Arch Bridge, The Whole Process of Life, Finite Element Method, Stress State

上承式钢管混凝土拱桥钢管生命全过程应力状态分析

吴小雨

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

收稿日期：2019年11月6日；录用日期：2019年11月21日；发布日期：2019年11月28日

摘要

为研究钢管混凝土拱桥钢管生命全过程应力状态，利用有限元软件MIDAS/CIVIL准确模拟杆件的空间尺寸、材料特性、连接方式及初始应力等，对无扣索条件下合拢桁架空钢管拱肋，空钢管带拱上立柱、灌注4根下弦杆混凝土以及灌注上弦杆、服役过程等生命全过程工况进行划分，主要为10个工况，分析了钢管生命全过程的应力状态。结果得出：上下弦钢管在生命全过程中应力不断增大，但未超限；拱肋上下弦钢管应力存在一定的偏差，拱脚附近和L/4处钢管下弦比上弦分别大81.1%和7.4%，拱顶则是上弦比下弦大55.1%；生命全过程中拱脚和拱顶的钢管应力为最不利截面，在施工及服役阶段都应对其重点监测。

关键词

钢管混凝土拱桥，生命全过程，有限元，应力状态

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

钢管混凝土拱桥是钢-混凝土组合结构，钢管对管内混凝土具有套箍作用，使得拱肋具有抗压强度高、抗变形能力强、质量轻、施工难度小等特点，所以该桥型在桥梁建设中被广泛应用。自1990年四川旺苍东河大桥建成后，钢管混凝土拱桥在我国发展迅速，中国在建造大跨径钢管混凝土拱桥的技术和能力已处世界领先水平[1]。目前对钢管混凝土拱桥拱肋研究的文章主要围绕管内混凝土徐变[2] [3]、脱空及施工阶段拱肋应力展开[4]-[11]。而钢管混凝土拱桥钢管从施工到成桥服役过程等生命全过程应力状态分析显得尤为重要，但对此进行报道的研究较少。

本文依托实际工程，利用有限元软件MIDAS/CIVIL，准确模拟钢管混凝土拱桥的不同施工阶段和服役过程，分析拱肋钢管在生命全过程中的应力状态。

2. 工程背景

本文以湖北省恩施市的找龙坝河特大桥主桥(钢管混凝土拱桥，主跨225 m)为研究背景，从施工到成桥服役过程，对该桥拱肋钢管生命全过程应力状态进行分析。找龙坝河特大桥主桥拱肋为钢管混凝土桁架式结构，主跨采用横向哑铃形4管桁架式钢管混凝土拱肋的上承式拱，净跨225 m。拱轴线采用悬链线，方程为 $y = f * (\text{ch}k\xi - 1) / (m - 1)$ ，拱轴系数 $m = 1.543$ ，净矢高45 m，矢跨比1/5。

该桥拱肋断面为等宽度变高度，高度从拱顶4.5 m变化到拱脚7.5 m。单片拱肋宽度4.5 m(中到中)，上、下弦拱肋采用变截面钢管，管径由拱脚 $\phi 1000 \times 28$ mm变至拱顶 $\phi 1000 \times 20$ mm。管内灌注C50自密实微膨胀混凝土。钢管拱肋的对接接头采用内法兰盘栓接、管外焊接的形式进行连接。上、下弦钢管平联是采用 $\phi 402 \times 16$ mm钢管，腹杆采用 $\phi 402 \times 16$ mm钢管，拱肋间横向斜撑采用 $\phi 351 \times 8$ mm钢管。横桥向两片拱肋间的中心距离均为13 m。肋间设置上下横联。拱肋间上弦设14道双K撑横联；下弦设

12道双K撑横联, 2道单K撑横联, 2道一字撑横联。两片拱肋间K撑横联在立柱处设置, K撑横联采用 $\phi 402 \times 16$ mm 钢管, 竖撑采用 $\phi 351 \times 8$ mm 钢管。桥梁总体布置图如图 1 所示, 半拱断面如图 2 所示。

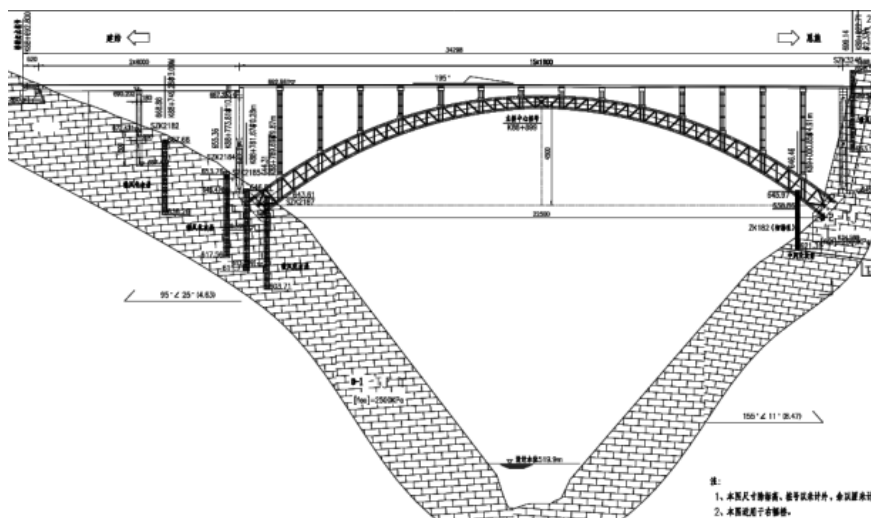


Figure 1. General layout of the bridge
图 1. 桥梁总体布置图

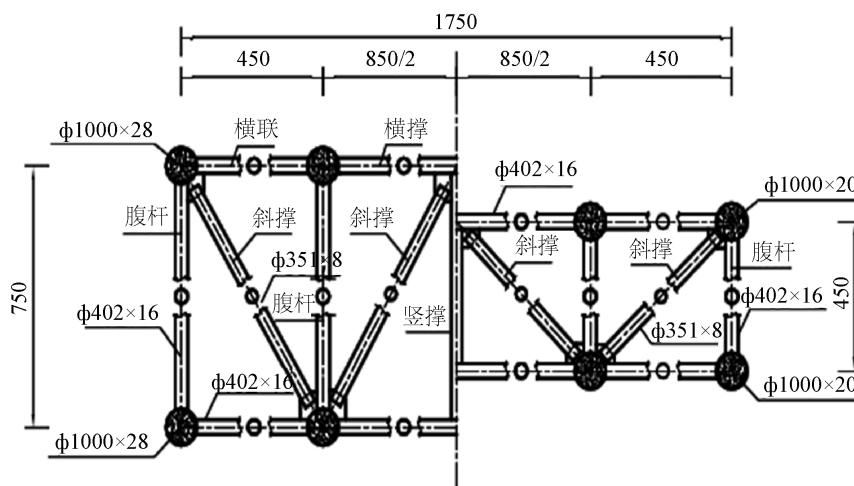


Figure 2. Semi-arch transverse view
图 2. 半拱横断面图

3. 空间有限元模型与施工工序

利用有限元软件 MIDAS/CIVIL, 将主拱圈、拱上立柱、钢帽梁及桥面系纵、横梁等按实际结构尺寸离散为空间有限元杆件, 并建立三维空间模型, 准确模拟杆件的空间尺寸、材料特性、连接方式及初始应力等。空钢管带拱上 1/3 立柱模型、全桥模型如图 3 和图 4 所示。有限元模型中, 图 3 模型共有 1956 个单元, 876 的节点, 图 4 模型共有 5176 个单元, 2954 个节点。主要材料参数如表 1 所示。施工阶段计算按施工加载顺序进行, 考虑了施工过程拱肋的弹性压缩、混凝土的收缩徐变、温度、施工荷载变化等因素的影响。为了准确地对有限元模型进行计算分析, 根据该桥的实际施工方案进行施工阶段划分。从各施工阶段到服役过程等生命全过程的工况划分如表 2 所示。

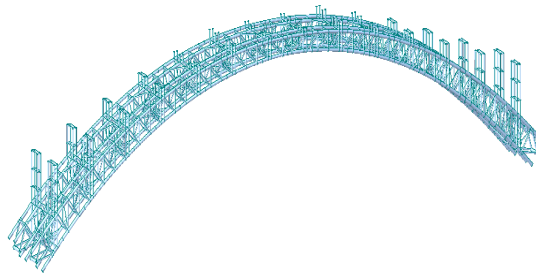


Figure 3. Model diagram of hollow steel tube with 1/3 columns on the arch rib

图 3. 空钢管带拱上 1/3 立柱模型图

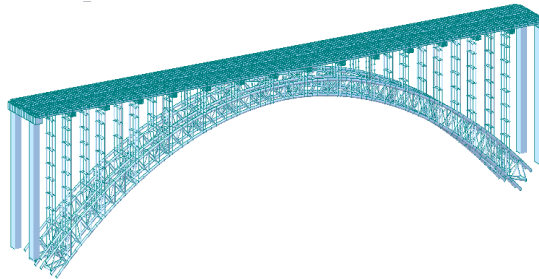


Figure 4. Full bridge model diagram

图 4. 全桥模型图

Table 1. Table of main material parameters

表 1. 主要材料参数值表

属性/类别	拱肋内混凝土	主拱肋	拱上立柱	扣点反力梁	钢箱盖梁	交界墩墩身及盖梁	桥面板系空心板	预应力钢绞线
材料	C50	Q345D	Q345D	Q345D	Q345D	C40	C50	高强钢丝
弹性模量/($\times 10^4$ MPa)	3.45	20.6	20.6	20.6	20.6	3.25	3.45	19.5
容重/($\times 10^4$ N/m ³)	2.5	7.698	7.698	7.698	7.698	2.5	2.5	7.85
泊松比	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3

备注：预应力钢绞线的公称直径为 15.2 m，松弛率小于 0.035，线膨胀系数为 1.2×10^{-5} 。

Table 2. Main bridge construction stage division

表 2. 主桥施工阶段划分

施工阶段编号	具体施工阶段内容
1	无扣索条件下合拢桁架空钢管拱肋
2	空钢管状态上 1/3 拱上立柱
3	灌注 4 根下弦杆拱肋混凝土
4	下弦杆形成联合截面
5	灌注 4 根上弦杆拱肋混凝土
6	上弦杆形成联合截面
7	安装盖梁
8	架设空心板
9	二期恒载施工
10	徐变分析

4. 计算结果分析

无扣索条件拱肋上下弦在灌注湿混凝土状态，混凝土尚未凝固时对钢管具有流体压力作用，这不仅未提升拱肋的刚度，反而增加了空钢管的荷载，此状态对钢管拱肋受力较为不利。为使计算更加准确，在有限元建模时，通过将混凝土湿重作为荷载施加在拱肋上来模拟拱肋灌注湿混凝土的施工过程。由于每根拱肋由 4 根钢管组成，在各工况下，拱肋 4 根钢管同一截面处的应力并不完全相等，因此笔者均取各截面应力值最大的一根钢管。应力取值位置为：拱脚附近、L/4 处截面、拱顶截面，应力符号规定受压为“+”，受拉为“-”。

4.1. 拱脚附近钢管应力分析

在各工况下，拱脚附近拱肋钢管的应力分析如图 5 所示。从图 5 中可以看出，生命全过程各工况下拱脚附近上下弦钢管应力均不断增大，拱肋下弦钢管应力始终大于上弦钢管应力，偏大约 81.1%。特别在工况 5 时差别较大，即灌注 4 根上弦杆拱肋混凝土时下弦钢管应力值比上弦钢管应力值大 105.85%。在最不利荷载作用下考虑十年收缩徐变，上弦钢管应力极值为 131.1 MPa，下弦钢管应力极值为 200.3 MPa，二者的最大压应力均在规范规定的允许范围之内。但全生命过程中，拱脚附近拱肋上下弦钢管的应力偏差较大，在施工以及服役过程中，应当重点监测拱脚附近上下弦钢管的应力。

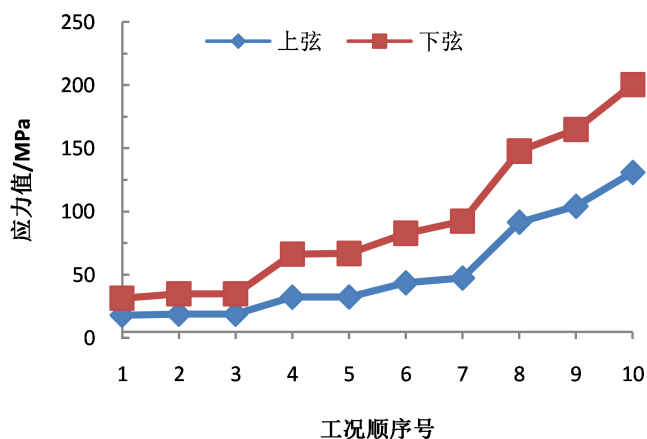


Figure 5. Steel tube stress near arch foot
图 5. 拱脚附近钢管应力图

4.2. L/4 处钢管应力分析

从图 6 中可以看出，拱肋上弦和下弦钢管应力增长的趋势基本一致，除在前 3 个工况上弦和下弦钢管应力基本相等外，其余各工况钢管应力下弦比上弦偏大仅 7.4%。拱肋钢管应力极值出现在最不利荷载下，上弦钢管应力为 150.4 MPa，下弦钢管应力为 161.2 MPa，二者的最大压应力均在规范规定的允许范围之内。

4.3. 拱顶处钢管应力分析

如图 7 所示，在拱肋钢管生命全过程各工况下，上下弦钢管应力均不断增大，且上弦钢管应力比下弦钢管应力偏大，大约为 55.1%。钢管的应力极值出现在最不利荷载作用下，上弦为 172.4 MPa，下弦为 110.3 MPa，二者的最大压应力均在规范规定的允许范围之内。

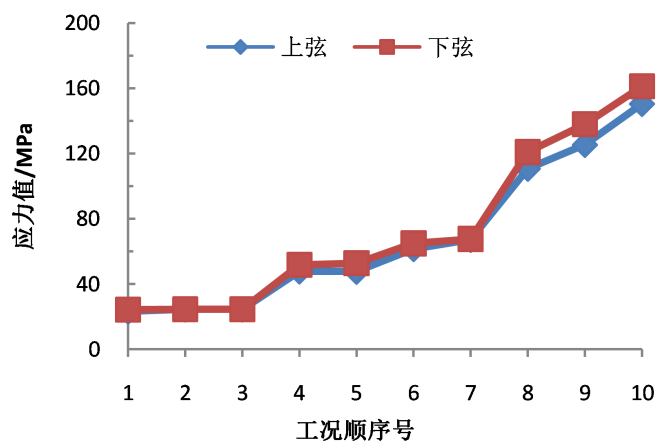


Figure 6. Steel tube stress at L/4 span

图 6. L/4 处钢管应力图

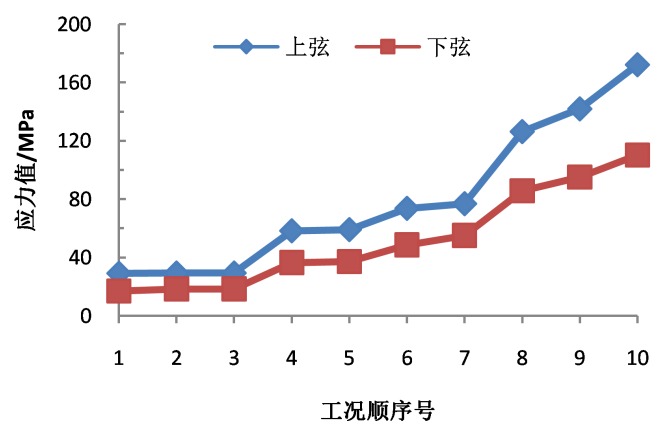


Figure 7. Steel tube stress at arch top position

图 7. 拱顶截面钢管应力图

5. 结论

无扣索条件下,先施工 1/3 拱上立柱以及下弦 4 根钢管灌注混凝土,然后灌注上弦 4 根钢管的混凝土,在此施工工序条件下,对钢管全过程中的应力进行分析,得出如下结论:

- 1) 从拱肋合拢至成桥服役过程的生命过程中,钢管应力不断增加,且应力值均满足规范要求。
- 2) 在各工况下拱肋上下弦钢管应力存在偏差,拱脚附近和 L/4 处下弦钢管应力明显偏大于上弦钢管应力,但在拱顶处则反之。拱脚附近截面下弦钢管应力比上弦钢管偏大 81.1%, L/4 处仅为 7.4%;拱顶截面应力偏差则是上弦比下弦偏大 55.1%。
- 3) 在同一工况下的拱肋上下弦钢管应力,拱脚附近和拱顶处明显大于 L/4 截面。因此,在该类拱桥施工以及成桥后的服役过程中应当重点监测拱脚附近和拱顶处的拱肋钢管应力,使整个施工过程在可控、合理的范围,以达到合理成桥状态和增加成桥后的使用寿命。

参考文献

- [1] 滕乐. 大跨度钢管混凝土桁架拱桥静动力计算和拱脚外包段详细应力计算与优化[D]. [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [2] 彭建新, 邵旭东, 程翔云, 黄政宇. 钢管混凝土拱肋徐变研究[J]. 工程力学, 2007, 24(6): 79-85.

- [3] 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.
- [4] 胡庆安, 丁鹏程, 刘健新. 工序变化对钢管混凝土拱桥应力的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006, 26(5): 54-57.
- [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]. 西安: 长安大学, 2011.
- [6] 闫广鹏. 大跨径钢管混凝土拱桥拱脚应力分析[J]. 交通科技, 2017(3): 37-39+43.
- [7] 郑建荣, 王淑妹, 袁安华. 钢管混凝土拱桥拱肋施工应力分析[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(14): 4022-4026.
- [8] 魏恒俊. 上承式钢管混凝土拱桥桁式拱肋混凝土灌注阶段应力分析[J]. 甘肃科技, 2018, 34(8): 71-73+124.
- [9] 殷林, 张文福, 高明, 宗兰. 钢管混凝土桁架拱桥施工阶段应力和位移的有限元分析[J]. 江苏建筑, 2017(1): 51-53+76.
- [10] 林初杰, 叶贵如. 哑铃形钢管混凝土拱灌注顺序分析[J]. 铁道标准设计, 2005(1): 57-59.
- [11] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥发展综述[J]. 桥梁建设, 1997(2): 10-15+24.