
几何初始缺陷与初应力对钢管混凝土拱桥的影响研究*

陈瑞麟, 李 睿, 谢小雨

(昆明理工大学建筑工程学院, 昆明 云南 650500)

[摘要] 为探讨拱圈拱轴线的几何初始缺陷和钢管初应力对拱桥结构内力与应力的影响, 基于实际工程案例, 建立了 4 个有限元模型, 分为 2 组, 一组包括 2 个模型, 考虑了拱轴线的几何初始缺陷影响; 另一组也包括 2 个模型, 首先考虑拱轴线几何初始缺陷, 然后在此基础上考虑初应力影响, 进行拱桥内力和应力分析对比。结果表明: 几何初始缺陷对拱圈轴力影响较小, 增幅 $<1\%$, 但对拱圈的弯矩和应力分布影响较明显, 特别是在拱顶部分, 在拱顶处弯矩减小高达 91.31%, 而拱脚处增加 17.03%, 拱脚和拱顶上缘的混凝土应力增加 23.19%, 下缘应力减小 51.95%; 考虑初应力影响后, 拱桥内力分布发生显著变化。拱脚处轴力增加 65.5%, 拱圈弯矩最大减小 68.21%, 拱圈截面上缘应力增加幅度高达 113.7%。因此, 实际施工阶段, 必须充分考虑拱圈拱轴线几何初始缺陷影响, 并根据实际施工顺序准确模拟初应力。

[关键词] 桥梁工程; 钢管混凝土拱桥; 几何初始缺陷; 初应力; 内力; 有限元分析; 施工阶段

[中图分类号] U448.22

[文献标识码]

A

[文章编号]

The Influence of Geometric Initial Defects and Initial Stress on Concrete-filled Steel Tubular Arch Bridge

CHEN Ruilin, LI Rui, XIE Xiaoyu

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: This paper aims to investigate the significant impacts of geometric initial defects and initial stress on the internal forces and stresses of arch bridge structures with arch ring axis. Based on actual engineering cases, four finite element models were established, which divided into two groups. One group included two models that consider the influence of geometric initial defects of the arch axis; The other group also included two models, considering the geometric initial defects of the arch axis first and then simulating the effect of initial stress. Both groups compared the internal forces and stresses of the arch bridge structure. The results show that geometric initial defects have a small effect on the axial force of the arch ring, with an increase of less than 1%. However, they have a significant impact on the bending moment and stress distribution of the arch ring, especially at the top of the arch. At the arch top, the bending moment decreases by up to 91.31%, while at the arch base, it increases by 17.03%. Additionally, the concrete stress on the arch base and upper edge increases by 23.19%, while the stress on the lower edge decreases by 51.95%. After considering the effect of initial stress, the distribution of internal forces in the arch bridge significantly changes. The axial force at the arch base increases by 65.5%, and the maximum bending moment of the arch ring decreases by 68.21%. The stress on the upper edge of the arch ring section increases by up to 113.7%. Therefore, whether it is finite element modeling

analysis or design during the actual construction phase, it is crucial to fully consider the influence of geometric initial defects of the arch axis and accurately simulate the presence of initial stress according to the actual construction sequence.

Keywords: bridges; concrete-filled steel tubular arch bridges; geometric initial defects; initial stress; internal forces; finite element analysis; construction phase

0 引言

随着我国桥梁建设的不断发展,钢管混凝土系杆拱桥在国内得到广泛应用。对于该类型桥梁,常用缆索吊装法进行施工,虽有效解决了大跨桥梁无支架施工问题,但施工过程中复杂且内力变化大。主拱圈是钢管混凝土拱桥的主要受力结构,施工方法多为先吊装架设空钢管,待两侧拱肋合龙后再向钢管内灌注核心混凝土。在各施工环节,由于钢管拱肋自重和外部荷载作用,会使得拱肋产生附加内力和变形,从而使得钢管成拱后的拱轴线往往达不到理想状态,拱圈建造过程中不可避免地会存在拱肋初始偏差,从而造成初始几何缺陷^[1]。在架设空钢管和灌注混凝土时,空钢管自重与混凝土湿重会导致钢管管内产生初应力,钢管初应力的存在会影响钢管和核心混凝土共同受力,导致部分钢管提前屈服并使拱圈产生较大变形,严重影响桥梁整体结构承载力^[2-4]。

目前,对钢管初始缺陷和初应力影响桥梁内力和应力的研究日益增多。樊开盼等^[5]建立大跨径钢管混凝土拱桥有限元模型,计算分析了拱肋初始几何缺陷对桥梁结构稳定性影响。曾勇等^[6]通过对大桥进行有限元非线性稳定性分析,得出初始几何缺陷会导致桥梁结构稳定系数变小的结论。黄福云等^[7-8]提出需结合实际施工过程考虑钢管混凝土初应力影响。赵跃宇等^[9]通过引入存在初始应力的钢管混凝土本构关系,利用有限元程序计算得出初应力对拱圈变形的影响。杨孟刚等^[10]采用有限元软件对工程实例进行施工阶段模拟仿真分析,得出初应力对钢管

混凝土拱桥面内、面外承载力都有不可忽略的影响。因此,有必要考虑成拱后拱肋线形几何缺陷和钢管初应力对钢管混凝土拱桥内力和应力的影响。

本文以某工程实例为背景,根据拱肋吊装完成并拆除扣索后的拱肋实测坐标数据建立考虑几何初始缺陷有限元模型,同时直接参照设计图纸建立不考虑几何缺陷的有限元模型;考虑几何初始缺陷,通过模拟钢管内混凝土的实际灌注顺序作为考虑初应力的模型,同时建立一次成拱施工不考虑初应力的模型^[11]。对比分析有限元计算结果,以研究初始几何缺陷和钢管初应力对钢管混凝土拱桥内力和应力的影响。

1 工程概况

某钢管混凝土拱桥如图 1 所示,其结构形式为(2×13)m 现浇实心板梁桥+(1×120)m 下承式钢管混凝土系杆拱桥+(1×13)m 现浇实心板梁桥,桥梁全长 168.2m,主桥设计桥面宽度为 11.3m。该桥主桥为预应力混凝土系杆拱结构,采用刚性系杆拱,计算跨径为 120m,矢跨比为 1/5,矢高为 24m,拱轴线形采用二次抛物线,拱轴线方程为: $y=0.8x-0.006\ 667\ x^2$ 。其中,拱肋采用等截面哑铃形钢管混凝土,风撑采用双管桁架型,在两侧拱肋上对称布置 5 道横撑,以将两侧拱肋连成整体;吊杆间距 5.4m,每片拱肋设 21 根吊杆,吊杆采用外径 9.5m、PE 防护的半平行钢丝索;系杆为预应力混凝土结构,高 180cm,宽 140cm,壁厚 30cm,采用箱形断面;横梁为预应力混凝土结构,端横梁为箱形断面,高 1.5~1.585m,宽 1.9m;中横梁高 1.2~1.285m,顶宽 0.9m,底宽 0.5m;行车道板采用 30cm 厚预制空心板,上铺 20cm 厚沥青混凝土和 C40 现浇层。该桥采用先拱后梁施工工艺,主拱圈采用缆索吊装施工,横梁采用现场浇筑吊装施工。

*国家自然科学基金(52068037)

[作者简介] 陈瑞麟,硕士研究生, E-mail: 1922914469@qq.com

[收稿日期]2023-12-15

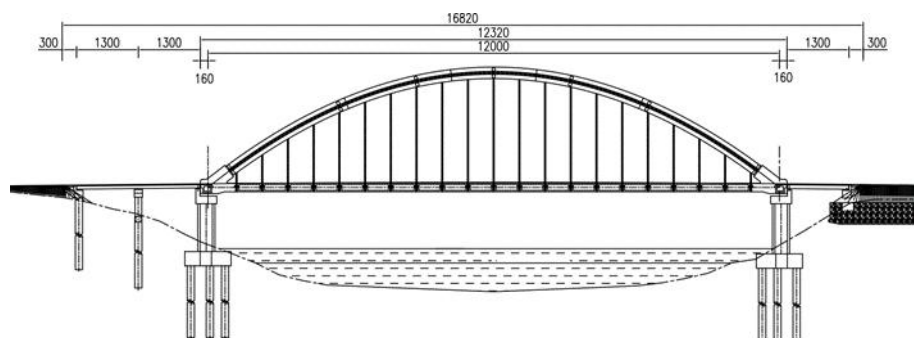


图 1 桥梁布置

Fig.1 Bridge layout

2 有限元建模

本文采用有限元软件 MIDAS 建立全桥模型，包括钢管混凝土拱肋、风撑、吊杆、系梁、横梁、桥面系与下部结构。其中，拱肋空钢管采用梁单元模拟，单元材料为 Q345 钢，截面为设计拱肋截面。添加 C50 混凝土材料与拱肋截面组成施工阶段联合截面，达到模拟钢管混凝土组合材料的目的。吊杆采用桁架单元模拟，吊杆张力结合该桥实际施工监控报告给出各阶段张力大小，通过“初拉力荷载”模拟；而桥面系、系梁、横梁与墩台基础均采用梁单元模拟，

其中系梁、横梁预应力均采用“钢束预应力荷载”模拟，系梁劲性骨架以“节点荷载”模拟。其余常规荷载类型不再详细说明。下部基础边界为固定端；拱脚与下部结构采用弹性连接模拟支座约束情况，即通过定义弹性连接的平动刚度来实现桥梁结构外部边界为整体简支^[12]；另外，横梁与系梁间、拱肋与风撑间采用刚性连接即节点耦合方式进行模拟^[13]。在施工阶段，通过添加“梁单元荷载”模拟混凝土湿重，模拟混凝土泵送进入钢管施工过程。定义钝化混凝土湿重荷载以达到钢管内混凝土凝固效果。有限元模型如图 2 所示。

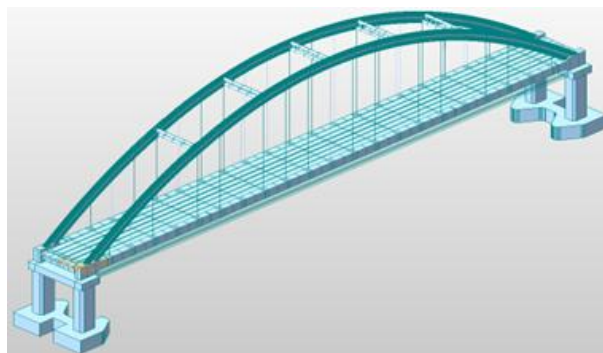


图 2 桥梁有限元模型

Fig.2 Finite element model of the bridge

3 考虑拱轴线几何缺陷的影响

3.1 工程施工误差

主拱由 2 片平行拱肋组成，每单片拱肋设置 21 根吊杆。根据桥梁设计图中给出的吊杆在 x 轴与 z 轴的设计坐标和施工监控报

告中给出的拱肋合龙后吊杆处拱肋三维坐标测量值，列出桥梁拱肋在 x 轴与 z 轴方向上、下游拱肋吊杆处设计坐标值与实测坐标值、两者差值及实测对称点高差。其中，以顺桥向左侧为下游拱肋、右侧为上游拱肋。吊杆布置与拱轴线误差如图 3、4 所示。

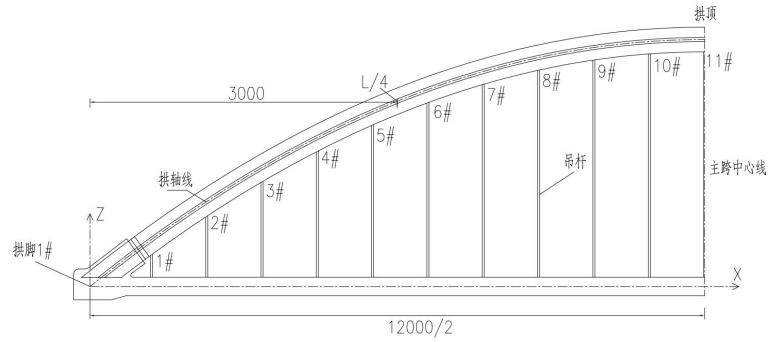


图 3 吊杆布置

Fig.3 Suspenders layout

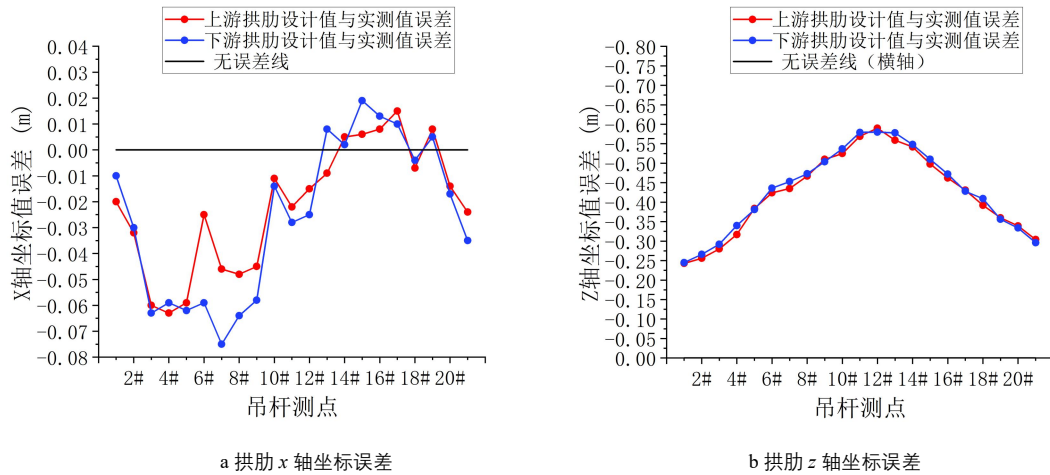


图 4 拱肋几何缺陷误差

Fig.4 Geometric defect error of arch rib

由图 4 可看出, 该桥上、下游拱肋在 x 轴与 z 轴方向上均存在不同程度的几何偏差, 在 x 轴方向上表现为拱轴线水平坐标左右偏移, 在 z 轴方向上表现为拱轴线竖向坐标向下移动。在 x 轴方向上偏差较小, 在 z 轴方向上偏差较大, 最大为 0.59m, 远大于规范所规定拱圈高程误差 ($L/3\ 000=0.04\text{m}$)。因此, 在钢管拱肋经过缆索吊装并拆除扣索后, 拱肋实测拱轴线与设计拱轴线间存在不容忽视的偏差, 有必要将拱轴线的几何偏差引入到有限元分析模型中。

3.2 考虑几何缺陷对拱圈内力影响

根据拱肋吊装完成并拆除扣索后的拱肋实测坐标数据修改计算模型, 以此作为考虑几何缺陷的有限元模型; 并将按设计图纸建立模型作为不考虑几何缺陷的模型。两模

型均从合龙成拱施工阶段开始模拟, 除成桥拱肋线形不同外, 其余材料参数、模型、施工阶段等均相同。

主拱圈是拱桥的主要受力结构, 后续的内力和应力研究均针对拱圈结构, 选取的关键截面分别为拱脚 1 号、拱肋 $L/4$ 、拱顶、拱肋 $3L/4$ 和拱脚 2 号。拱脚处承受桥梁结构主要荷载, 其余位置的选取有助于考虑荷载分布和对比分析。根据有限元模型计算, 以“成桥阶段”的内力和应力计算结果为研究数据 (后续所有图表数据均为“成桥阶段”有限元计算数据), 得出几何缺陷误差对结构内力的影响, 如表 1 和图 5 所示, 其中仅列出单片拱肋受力情况, 规定轴力、应力受拉为正, 弯矩以拱肋下侧受拉为正, 反之为负。

表 1 拱轴线几何初始缺陷对拱肋内力影响

Table 1 Impact of initial geometric defects of arch axis on the internal forces of the arch rib

关键截面	不考虑几何初始缺陷		考虑几何初始缺陷	
	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	弯矩/(kN·m)
拱脚 1 号	-17 139.6	1 264.4	-17 246.8	1 479.8
L/4	-14 662.3	-811.1	-14 782.9	-1 064.2
钢管拱肋 拱顶	-13 662.0	-1 015.2	-13 792.0	-88.2
3L/4	-14 661.9	-761.8	-14 783.8	-977.2
拱脚 2 号	-17 137.4	1 254.9	-17 225.9	1 376.6

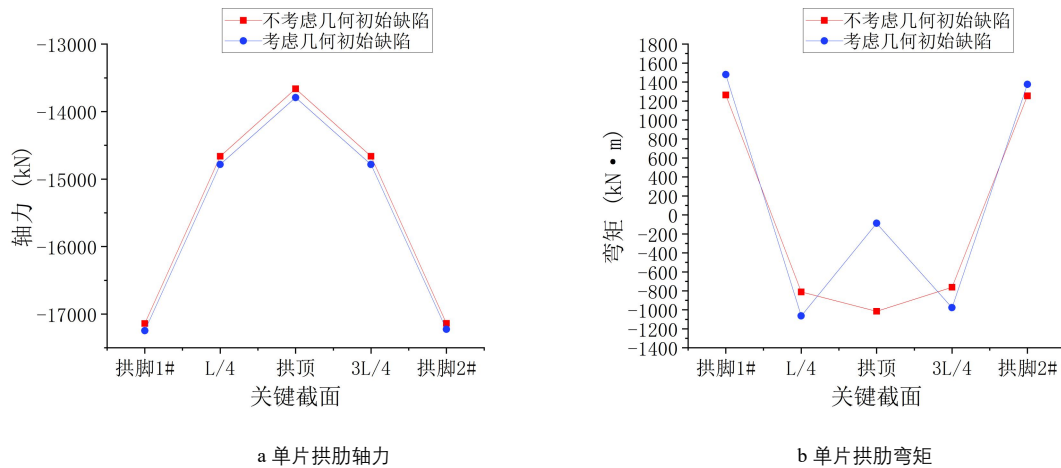


图 5 拱肋考虑几何缺陷关键截面内力值

Fig.5 Internal force values at key sections of arch rib considering geometric defects

由表 1 和图 5 可看出, 实测拱轴线与设计拱轴线下拱肋全截面受压, 符合实际拱圈内力规律, 是否考虑几何初始缺陷的影响轴力计算结果基本一致, 最大增幅出现在拱顶, 仅为 0.95%, 影响不大。但拱肋弯矩则出现明显变化, 尤其在拱顶处变化最大, 降幅达 91.31%; 拱脚处变化最小, 增幅为 17.03%。拱桥结构荷载保持稳定, 因此拱肋轴力变化微小; 然而, 拱肋线形在接近拱顶处 x 方向出现较大偏移, 导致拱肋弯矩大幅度变化。这说明拱轴线的施工误差所引起的几何初始缺陷对拱圈弯矩影响显著。

3.3 考虑几何缺陷对拱圈应力影响

同内力分析, 选取拱脚 1 号、拱肋 $L/4$ 、

拱顶、拱肋 $3L/4$ 和拱脚 2 号处作为关键截面。对比分析如表 2、图 6 所示。

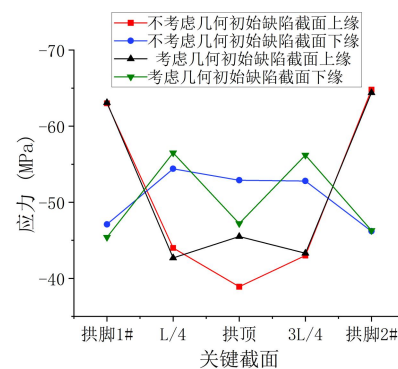


图 6 拱肋考虑几何缺陷关键截面应力值

Fig.6 Stress values at key sections of arch rib considering geometric defects

表 2 拱轴线初始缺陷对哑铃形拱肋钢管的应力影响
Table 2 Impact of initial arch axis defects on the stress of the dumbbell-shaped arch rib steel tube MPa

关键截面		不考虑几何初始缺陷					考虑几何初始缺陷				
		拱脚 1 号	L/4	拱顶	3L/4	拱脚 2 号	拱脚 1 号	L/4	拱顶	3L/4	拱脚 2 号
拱肋	截面上缘	- 63.0	- 44.0	- 38.9	- 43.0	- 64.8	- 63.1	- 42.7	- 45.5	- 43.3	- 64.4
	截面下缘	- 47.1	- 54.4	- 52.9	- 52.8	- 46.2	- 45.4	- 56.5	- 47.2	- 56.2	- 46.3

由表 2、图 6 可知，考虑拱轴线的几何缺陷误差后，拱肋截面上缘应力在拱肋 1/4 处减小，其余关键截面应力均增加；拱肋截面下缘应力则在拱肋 1/4 处增加，在其余关键截面应力均减小。其中，在拱顶处应力变化最大，上缘最大变化为 6.6MPa，下缘最大变化为 5.7MPa，变幅为 16.97%，10.77%。拱肋截面上缘其余关键截面是否考虑几何初始缺陷影响的计算结果基本一致，而拱肋截面下缘在 1/4 处最大变化为 3.4MPa，变幅为 6.4%。由此可见，应力变化在拱顶截面上下缘处最大，1/4 处次之。几何初始缺陷给拱圈内力和应力带来的变化不容小觑。

4 考虑钢管初应力的影响

4.1 考虑初应力的施工阶段细化模拟

根据实际工程的施工阶段，有限元软件中的施工模拟阶段划分如表 3 所示。在有限元模型中，要实现结构的初应力，可通过精细的施工步骤划分来实现，且精确的施工阶段模拟能使得结构在模拟施工过程中逐步获得所需初应力，确保初应力与实际施工的准确性和一致性^[11]。

表 3 施工阶段划分

Table 3 Division of construction stage

工况	施工项目
1	钢管拱肋合龙完成
2	安装系梁劲性骨架、吊杆
3	第 1 次张拉临时系杆
4	灌注下游侧上弦杆混凝土
5	下游侧上弦杆混凝土凝固
6	灌注上游侧上弦杆、风撑混凝土
7	第 2 次张拉临时系杆
8	上游侧上弦杆、风撑混凝土凝固

9	灌注下游侧下弦杆混凝土
10	下游侧下弦杆混凝土凝固
11	灌注上游侧下弦杆混凝土
12	第 3 次张拉临时系杆
13	上游侧下弦杆混凝土凝固
14	第 4 次张拉临时系杆
15	系梁施工
16	中横梁吊装前张拉系梁预应力
17	第 1 次张拉吊杆
18	安装中横梁、桥面板
19	第 2 次张拉吊杆
20	浇筑桥面混凝土和沥青铺装
21	第 3 次张拉吊杆

在钢管内混凝土灌注阶段和混凝土未凝固达到设计强度前，混凝土湿重由钢管承受。按规范天数混凝土凝固达到设计强度后，则在施工阶段进行湿重钝化处理，以达到混凝土结合钢管共同受力的目的。同时，钢管内混凝土考虑收缩徐变作用，其材料依然连接至有限元软件中的时间依存特性中以达到模拟混凝土收缩徐变效应^[14]。

4.2 初应力对成桥内力影响分析

在考虑初应力影响前，已在有限元建模中计入拱轴线的几何初始缺陷。根据有限元建模计算分析结果，对比分析如表 4，5 及图 7 所示，其中合计为拱肋钢管与混凝土内力之和。

钢管与混凝土 2 种材料具有不同的弹性模量，导致其弯矩无法简单叠加。因此，表 4，5 中合计处弯矩无法在有限元模型中显示。在计算弯矩时，需考虑材料弹性模量不同，导致其受力行为不同，无法进行简单叠加，而是应通过适当的结构分析方法进行叠加，也从侧面强调了结构设计和分析中必须

考虑各材料的物理性能、材料参数和相互作用^[15]。

表 4 各关键截面钢管与混凝土内力值

Table 4 Internal force values of steel tubes and concrete at key sections

关键截面内力		无初应力		有初应力	
		轴力/kN	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	弯矩/(kN·m)
拱肋钢管	拱脚 1 号	−5 066.6	93.5	−8 254.4	−536.9
	L/4	−4 327.8	−266.1	−7 052.8	69.9
	拱顶	−4 037.0	46.6	−6 014.0	1 349.3
	3L/4	−4 329.0	−223.6	−7 098.3	−26.0
管内混凝土	拱脚 2 号	−5 066.1	75.7	−8 384.2	−600.8
	拱脚 1 号	−12 231.5	329.2	−9 810.1	123.8
	L/4	−10 446.3	679.0	−8 475.9	−51.8
	拱顶	−9 744.8	177.5	−8 467.5	134.6
合计	3L/4	−10 450.4	582.1	−8 431.2	−38.6
	拱脚 2 号	−12 230.2	200.6	−9 672.4	119.9
	拱脚 1 号	−17 298.1	—	−18 064.4	540.7
	L/4	−14 774.1	—	−15 528.7	−455.6
合计	拱顶	−13 781.8	—	−14 481.5	2 095.2
	3L/4	−14 779.4	—	−15 529.6	−391.5
	拱脚 2 号	−17 296.3	—	−18 056.6	227.4

表 5 关键截面轴力增降幅度

Table 5 Table of axial force increase and decrease at key sections %

关键截面内力增降幅度	钢管拱肋		管内混凝土		合计	
	轴力	弯矩	轴力	弯矩	轴力	弯矩
拱脚 1 号 (2 号)	65.60	723	− 20.1		4.43	—
拱肋 L/4 (3L/4) 处	63.97	102	− 19.3	− 68.2	5.08	—
拱顶	48.97	2 795	− 13.1		5.08	—
平均增降幅度	60.86	—	− 18.4	—	4.86	—

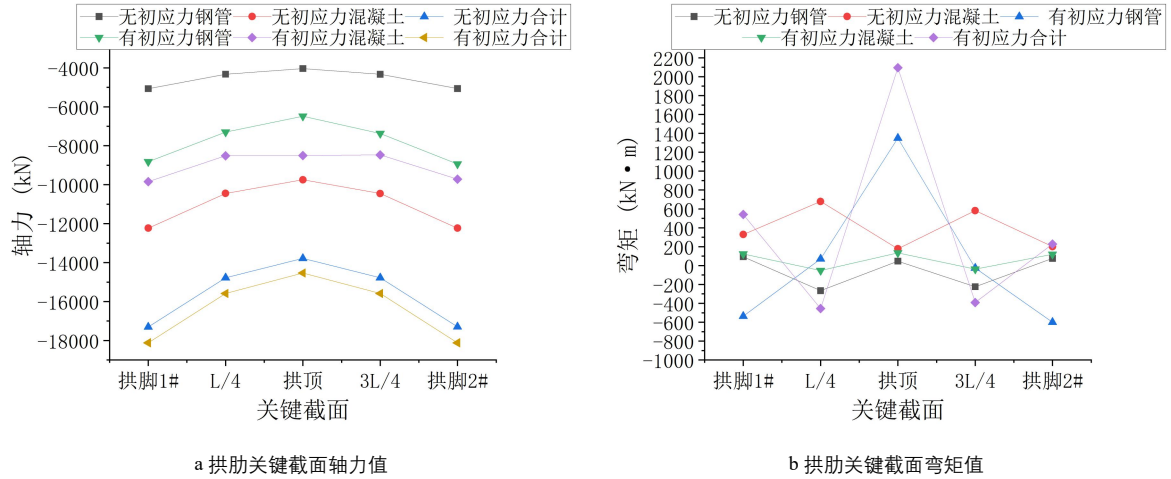


图 7 拱肋关键截面内力值

Fig.7 Internal force values at key sections of arch rib

由表 4、5 及图 7 可知，关键截面的轴力：考虑初应力的钢管模型所表现的轴力远大于不考虑初应力的钢管模型的轴力，且在拱脚处轴力增幅最大，为 65.6%；拱肋 $L/4$ 处（ $3L/4$ ）增幅次之，为 63.97%；拱顶处增幅最小，但仍有 48.97%。拱肋钢管截面的平均增幅达到 60.86%。考虑初应力的管内混凝土模型所表现的轴力均小于无初应力的管内混凝土模型，在拱脚处降幅最大为 20.19%；拱肋次之，降幅为 19.32%；拱顶处降幅最小，为 13.11%。拱肋管内混凝土关键截面的平均降幅为 18.4%。合计拱肋钢管和钢管混凝土轴力表现为有初应力模型略大于无初应力模型，拱肋各关键截面增幅

不大，平均增幅为 4.86%。而从关键截面的弯矩来看，考虑拱肋钢管的弯矩，有初应力模型与无初应力模型间差距较明显，且在拱顶处大幅度增加，高达 2795%，并且其余关键截面均发生较大幅度变化。管内混凝土各关键截面弯矩表现为减小，平均降幅为 68.21%。初应力的存在会改变拱桥结构内部受力分布，弯矩考虑初应力前后变幅大，但仍左右对称分布，拱圈受力依然合理^[16]。

4.3 初应力对成桥应力影响分析

同内力分析，依旧选取拱脚 1 号、拱肋 $L/4$ 、拱顶、拱肋 $3L/4$ 和拱脚 2 号处作为关键截面，对比分析如表 6、图 8 所示。

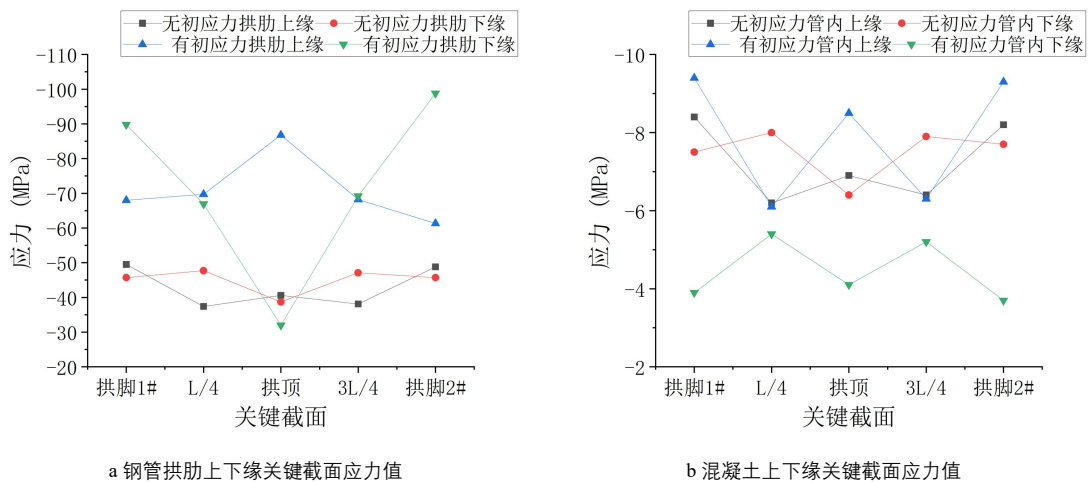


图 8 关键截面钢管与混凝土应力曲线

Fig.8 Stress curves of steel tubes and concrete at key sections

表 6 关键截面钢管与混凝土应力值

Table 6 Stress values of steel tubes and concrete at key sections MPa

关键截面	无初应力					有初应力				
	拱脚 1 号	L/4	拱顶	3L/4	拱脚 2 号	拱脚 1 号	L/4	拱顶	3L/4	拱脚 2 号
钢管	拱肋上缘	-49.5	-37.4	-40.6	-38.1	-48.8	-68	-69.7	-86.8	-68.2
	拱肋下缘	-45.7	-47.7	-38.7	-47.1	-45.7	-89.8	-66.9	-32.0	-69.2
混凝土	钢管上缘	-8.4	-6.2	-6.9	-6.4	-8.2	-9.4	-6.1	-8.5	-6.3
	钢管下缘	-7.5	-8.0	-6.4	-7.9	-7.7	-3.9	-5.4	-4.1	-5.2

由表 6、图 8 可知,对于钢管应力,考虑钢管初应力后除钢管下缘拱顶应力减小外,拱肋钢管上、下缘各关键截面应力均增加,其中在拱肋上缘应力表现为拱顶应力增幅最大,最大为 113.79%,1/4 截面处次之,拱脚处增幅最小,最小为 25.61%;拱肋上缘应力平均增幅为 68.43%。而在拱肋下缘应力则表现为拱脚应力增幅最大,最大为 116.19%,1/4 截面处次之,拱脚处变幅最小,最小为-17.31%;拱肋下缘应力平均变幅绝对值为 63.44%。对于混凝土应力,考虑钢管初应力后拱肋混凝土上管上缘表现为拱脚与拱顶处的应力增大,拱肋 1/4 截面处应力减小,最大变幅为 23.19%,位于拱顶处,最小变幅为-1.56%,位于 3L/8 处,上管上缘混凝土应力平均变幅绝对值为 10.34%。而拱肋混凝土下管下缘则均表现为应力减小,其中最大降幅为-51.95%,位于拱脚 2 号处,最小降幅为-32.5%,位于 L/4 截面处,下管下缘混凝土应力平均变化幅度为-40.51%。根据其变幅,说明是否考虑初应力拱肋应力前后变化大,影响显著。

5 结语

1)是否考虑拱轴线几何初始缺陷或钢管初应力,拱圈轴力均表现为拱脚>1/4 截面处>拱顶,且轴力与弯矩均基本关于拱顶

参考文献:
[1]. 卢伟升,颜东煌.大跨度钢管混凝土拱桥拱肋施工误差影响分析[J].中外公路,2015,35(3):84-88.

LU W S, YAN D H. Analysis of construction error effects on arch rib of large-span steel pipe-concrete arch bridge[J]. Journal of China & foreign highway,

处对称。

2)考虑拱轴线几何缺陷影响,拱圈轴力计算结果基本一致,最大增幅仅为 0.95%,影响较小。拱圈弯矩和应力受几何初始缺陷影响明显,尤其在拱顶处,弯矩降幅高达 91.31%,拱脚处增幅为 17.03%;应力变幅最大达 16.97%。这说明拱圈施工误差对拱圈内力和应力有重要影响。考虑拱轴线的几何初始缺陷影响,应重点关注拱圈弯矩和应力变化,特别是在拱顶处。

3)初应力对钢管混凝土拱桥的成桥阶段会产生较大影响。在内力方面,考虑初应力后,拱肋钢管模型的拱脚处轴力增加 65.5%,管内混凝土拱脚轴力减小 20.91%,且管内混凝土截面弯矩最大减小 68.21%;在应力方面,初应力对拱肋上缘应力最敏感,增加 113.7%。拱脚和拱顶的管内上缘混凝土应力增加 23.19%,管内下缘应力减小 51.95%。这说明考虑初应力对拱桥的承载力验算结果产生显著影响,未充分考虑可能导致结构破坏。

4)在进行有限元建模时,必须充分考虑实际施工导致的拱圈拱轴线几何初始缺陷,并根据施工顺序准确模拟初应力影响,以降低模型的内力和应力误差。

2015,35(3):84-88.

[2]. 解威威,唐睿楷,叶志权,等.钢管混凝土拱桥钢管初应力自动化监测与控制[J].世界桥梁,2021,49(1):83-88.

XIE, W W, TANG R K, YE Z Q, et al. Automated monitoring and control of initial stress in steel

- pipe-concrete arch bridges[J]. World bridges, 2021,49(1):83-88.
- [3]. 陈宝春,黄福云.有初应力的钢管混凝土偏压构件极限承载力计算[J].长沙交通学院学报,2008(2):1-8.
- CHEN B C, HUANG F Y. Calculation of Ultimate Bearing Capacity of Pre-Stressed Steel Pipe-Concrete Compression Members[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2008(2):1-8.
- [4]. 秦荣,谢肖礼,彭文立,等.钢管混凝土拱桥钢管开裂事故分析[J].土木工程学报,2001(3):74-77.
- QIN R, XIE X L, PENG W L, et al. Analysis of steel pipe cracking accidents in steel pipe-concrete arch bridges[J]. China civil engineering journal, 2001(3):74-77.
- [5]. 樊开盼,张元峰.初始缺陷对大跨径钢管混凝土拱桥稳定性的影响分析[J].中国公路,2019(15):91-93.
- FAN K P, ZHANG Y F. Analysis of the influence of initial defects on the stability of large-span steel pipe-concrete arch bridges[J]. China highway, 2019(15):91-93.
- [6]. 曾勇,于福,谭红梅.考虑初始几何缺陷的大跨度上承式钢管混凝土拱桥的非线性稳定研究[J].铁道建筑,2014(6):17-19.
- ZENG Y, YU F, TAN H M. Nonlinear stability study of large-span upper-arch steel pipe-concrete arch bridges considering initial geometric defects[J]. Railway engineering, 2014(6):17-19.
- [7]. 黄福云,陈宝春.钢管混凝土拱桥初应力问题[J].公路交通科技,2006(11):68-72.
- HUANG F Y, CHEN B C. Initial stress issues in steel pipe-concrete arch bridges[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2006(11):68-72.
- [8]. 黄福云,李建中,徐艳,等.钢管混凝土拱桥初应力调查与分析[J].福州大学学报(自然科学版),2013,41(6):1098-1103.
- HUANG F Y, LI J Z, XU Y, et al. Investigation and analysis of initial stress distribution in steel pipe-concrete arch bridges[J]. Journal of Fuzhou University(natural science edition),2013,41(6):1098-1103.
- [9]. 赵跃宇,易壮鹏,王连华.初始应力对钢管混凝土拱桥面内极限承载能力的影响[J].湖南大学学报(自然科学版),2007(3):1-5.
- ZHAO Y Y, YI Z P, WANG L H. Influence of initial stress on the ultimate bearing capacity of steel pipe-concrete arch bridges in the transverse direction[J]. Journal of Hunan University(natural sciences), 2007(3):1-5.
- [10]. 杨孟刚,曹志光.初应力对大跨度钢管混凝土拱桥极限承载力的影响[J].铁道科学与工程学报,2010,7(4):6-10.
- YANG M G, CAO Z G. Influence of initial stress on the ultimate bearing capacity of large-span steel pipe-concrete arch bridges[J]. Journal of railway science and engineering, 2010,7(4):6-10.
- [11]. 谭中法,许春荣,王志金,等.德余高速公路乌江特大桥拱肋混凝土灌注顺序研究[J].公路,2023,68(10):17-20.
- TAN Z F, XU C R, WANG Z J, et al. Study on the concrete pouring sequence of the arch ribs of Wujian Extra-Large Bridge on De-Yu Expressway[J]. Highways, 2023,68(10):17-20.
- [12]. 周萌,宁晓旭,聂建国.系杆拱桥拱脚连接结构受力性能分析的多尺度有限元建模方法[J].工程力学,2015,32(11):150-159.
- ZHOU M, NING X X, NIE J G. Multiscale finite element modeling method for analysis of the force performance of arch foot connection structures in cable-stayed arch bridges[J]. Engineering mechanics, 2015,32(11):150-159.
- [13]. 查晓雄,钟善桐.用有限元法分析钢管初应力对钢管混凝土轴压构件基本性能的影响[J].哈尔滨建筑大学学报,1997(1):45-53.
- ZHA X X, ZHONG S T. Analysis of the influence of initial stress on the basic performance of steel pipe-concrete compression members using finite element method[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1997(1):45-53.
- [14]. 刘栋.考虑施工步骤收缩徐变因素的钢管混凝土拱桥线形控制研究[J].水利与建筑工程学报,2023,21(2):143-148.
- LIU D. Study on line control of steel pipe-concrete arch bridges considering construction sequence shrinkage and creep factors[J]. Journal of water

resources and architectural engineering, 2023,21(2):143-148.

[15]. 武文杰,王元丰,马伊硕.考虑几何非线性及施工的钢管混凝土拱桥徐变[J].西南交通大学学报,2013,48(4):645-650.

WU W J, WANG Y F, MA Y S. Creep analysis of steel pipe-concrete arch bridges considering geometric nonlinearity and construction effects[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2013,48(4):645-650.

[16]. 黄红兵,崔海兴,王耀君,等.考虑初应力的大跨度钢管混凝土拱桥极限承载力计算方法研究[J].工程质量,2011,29(8):70-73.

HUANG H B, CUI H X, WANG Y J, et al. Research on calculation method of ultimate bearing capacity of large-span steel pipe concrete arch bridge considering initial stress[J]. Construction quality, 2011,29(8):70-73.