

下承式哑铃型钢管混凝土系杆拱桥静力性能研究

王庆贺¹,王超¹,何英²,吴凤元¹,李艳凤²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究下承式哑铃型钢管混凝土系杆拱桥在施工过程中的应力与变形,为实际工程应用提供理论依据。方法 采用有限元软件 Midas/Civil 建立钢管混凝土系杆拱桥有限元模型,分析拱桥施工过程中应力、变形的变化规律及结构参数变化对拱肋受力的影响。结果 钢管与混凝土峰值压应力均位于拱脚截面,考虑收缩徐变影响时拱脚上弦管压应力较二期荷载作用下提高 61%;与先浇筑上管混凝土相比,先浇筑哑铃型下管混凝土时,组合截面中性轴下移且应力变化幅度较小;拱肋含钢率介于 4%~9% 时,增大钢管壁厚与直径可使拱脚截面、1/4 截面、跨中截面峰值压应力、峰值挠度降低;拱肋内倾角为 0°~13° 时,拱肋截面峰值挠度随内倾角的增大呈现先减后增趋势,其中内倾角为 7° 时挠度最小。结论 考虑运营期拱肋混凝土收缩徐变时,哑铃型拱肋处于全截面受压状态;对于采用哑铃型截面的下承式钢管混凝土系杆拱桥,先浇筑拱肋下管混凝土可使系杆拱桥体系受力更加合理;内倾角变化对拱肋峰值挠度有一定影响。

关键词 钢管混凝土;系杆拱桥;施工阶段;有限元分析;结构设计参数

中图分类号 TU 398.9

文献标志码 A

Mechanical Performance of Dumbbell-shaped Concrete-filled Steel Tubular Tied Arch Bridge

WANG Qinghe¹, WANG Chao¹, HE Ying², WU Fengyuan¹, LI Yanfeng²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In this paper, the stress and deformation of the through dumbbell-shaped concrete filled steel tubular tied arch bridge during construction was studied, to provide theoretical basis for the practical engineering application. The CFST tied arch bridge model was established based on

收稿日期:2021-08-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51808351);辽宁省科技厅博士科研启动项目(2019-BS-193);沈阳市中青年科技人才项目(RC200143);天津市科技计划项目(18ZXGDGX00030)

作者简介:王庆贺(1987—),男,副教授,博士,主要从事钢-混凝土组合结构等方面研究。

Midas/Civil software, the evolution law of stress and deformation and effect of structural parameters on force of arch rib during the construction stage of arch bridge was evaluated. It is found that the peak compressive stress of steel tube and concrete located within the arch foot section, and the compressive stress of the upper chord of the arch foot can be increased by 61% compared with the second stage load considering the influence of shrinkage and creep stage; Compared with the first casting upper pipe concrete, the neutral axis of the composite section moves downward and the stress variation is smaller; The method of increasing the wall thickness and diameter of steel pipe can be used to reduce the peak compressive stress and peak deflection of arch foot section, 1/4 section and mid-span section when the steel content of arch rib is between 4% and 9%; The peak deflection of arch rib section decreases first and then increases with the increase of the inclination angle when the inclination angle of arch rib is $0^{\circ} \sim 13^{\circ}$, and the deflection reaches the minimum value when the inclination angle is 7° . Meanwhile, considering long-term shrinkage and creep effects of the arch rib concrete, the whole cross-section of the arch rib is under compression state; As for CFST arch bridge with dumbbell-shaped section, first casting concrete of the dumbbell-shaped lower pipe is more feasible to obtain stable structures; The change of inclination angle has certain influence on the peak deflection of arch rib.

Key words: concrete-filled steel tube; tied arch bridge; construction stage; finite element modeling; structure design parameters

随着钢管混凝土拱桥应用不断增多、工程经验日益丰富、理论研究取得系列成果,目前其基本体系已经建立^[1]。其中,下承式系杆拱桥因其结构轻巧、跨越能力强、造型美观得到广泛应用,在上承式、中承式、下承式拱桥中占比最大^[2]。在下承式系杆拱桥施工过程中,拱脚节点受力机理较为复杂,需要寻找合适的建模方法分析拱脚节点受力性能;拱肋钢管内混凝土的浇筑是施工的难点,对桥梁使用寿命影响较大;随着跨径的增大,拱桥的设计参数对桥梁力学性能的影响越来越显著,部分人员对设计、施工方面结构参数的取值存在一定的盲目性^[3-4]。因此有必要对钢管混凝土系杆拱桥施工的薄弱环节进行力学性能分析,明晰其内力分布规律,并研究不同设计参数对拱桥力学性能的影响。

国内学者采用有限元方法分析了钢管混凝土系杆拱桥的力学性能,研究的拱肋截面类型包括桁架式、哑铃型及矩形。对于四肢桁架式截面,陈钊等^[5]研究了混凝土灌注次序对拱肋力学性能的影响,发现各分支钢管中先期灌注的混凝土所受压应力较后期灌注混凝土压应力大;Y. Geng 等^[6]认为运营期

拱肋混凝土时效变形受施工过程加载龄期的影响显著;B. C. Chen 等^[7]基于钢管混凝土拱桥徐变模型预测拱肋短期徐变效应,发现拱肋中混凝土徐变会导致桥梁挠度和钢管应力增大;周倩等^[8]指出管内混凝土灌注顺序对结构施工受力性能、钢管与混凝土共同作用效果具有较大影响。文献[9-10]依据统计数据和弹性模量缩减法,提出拱肋倾角、矢跨比等结构参数对拱桥极限承载力的影响;文献[11-13]研究改变约束条件、矢跨比、横撑布置形式等对拱桥动力特性的影响;文献[14]通过调整吊杆张拉顺序,使拱梁结构达到整体受力优化的目的;文献[15]简化拱桥受力分析过程,研究外倾方形钢管截面应力、挠度变化过程。

现有研究主要以截面为四肢桁架式的拱桥各施工阶段力学性能展开分析,对施工阶段哑铃型系杆拱静力性能和参数变化对拱桥受力的影响研究相对较少。基于此,笔者采用有限元分析方法,建立钢管混凝土系杆拱桥有限元模型,研究施工全过程拱肋各截面的受力状况,量化设计参数变化对钢管混凝土系杆拱力学性能的影响,为下承式哑铃型钢管混凝土

系杆拱桥的设计与施工提供理论依据。

1 建立有限元模型

1.1 钢管混凝土系杆拱施工过程

某钢管混凝土系杆拱跨度 72 m,桥面梁宽 17.1 m,梁高 2.5 m,顶、底板厚度为 30 cm;拱桥采用两组钢管混凝土拱肋,两组 K 撑,1 组 X 撑,18 对吊杆;拱肋矢跨比为 1/5,矢高 14.4 m;哑铃型截面高度 3 m,钢管直径 1 m、壁厚 16 mm。系杆与拱肋截面刚度比介于 1/80~80,为典型的刚性梁刚性拱^[16]。拱桥采用先梁后拱的施工方法,主要施工过程见表 1。

表 1 拱桥主要施工过程

Table 1 Main construction process of arch bridge			
步骤	施工内容	步骤	施工内容
1	临时墩施工	8	拱肋支架安装
2	钢管柱安装	9	钢管拱安装
3	支架安装	10	管内混凝土灌注
4	支架预压	11	拱肋支架拆除
5	梁部钢绞线制安	12	吊杆张拉
6	梁部混凝土浇筑	13	系梁支架拆除
7	预应力张拉		

1.2 钢管混凝土系杆拱的有限元模型

采用 MIDAS/Civil 建立拱桥有限元模型,其中系梁、横撑、拱肋采用梁单元模拟,吊杆采用桁架单元模拟,将拱肋哑铃型截面设置为施工阶段联合截面,以便分步查看钢管、上管、下管混凝土应力。由于桥梁上部结构内部超静定、外部静定,系梁承担拱脚水平推力,使上部结构内力不受基础变形的影响。因此分析时,只考虑上部结构^[17]。有限元模型见图 1,节点数量 319 个,单元数量 375 个。

1.2.1 划分施工阶段

有限元模型考虑 15 个施工分析步骤:阶段①:浇筑系梁混凝土→阶段②:张拉第一批纵向预应力筋→阶段③:在支架上对称安装第一段拱肋钢管→阶段④:对称安装第二段拱肋钢管、调整拱肋线型到设计标高→阶段⑤:安装合拢段拱肋钢管、安装拱顶横撑→阶段⑥:浇筑拱肋下管内混凝土→阶段⑦:浇筑拱肋上管内混凝土→阶段⑧:安装 2#吊杆并张拉。阶段⑨~阶段⑫:依次安装张拉 3#、4#、5#、1#吊杆→阶段⑬:张拉第二批纵向预应力筋→阶段⑭:施加二期恒载→阶段⑮:混凝土收缩徐变 10 a。

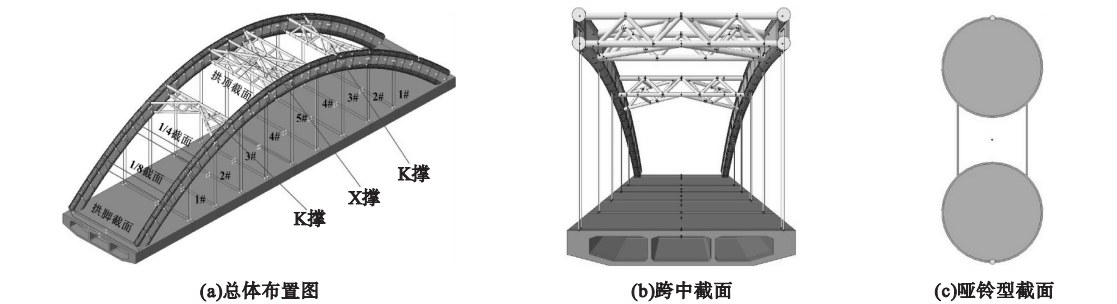


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

1.2.2 荷载工况

有限元分析中荷载工况共 13 项(见表 2)。其中,自重系数取 -1.04;二期荷载以 135 kN/m 的线荷载施加于桥面;取整体降温 20℃,整体升温 20℃;支座沉降按照每个地基及基础的最不利荷载组合(取可变荷

载效应控制组合与永久荷载效应控制组合的最大值)进行计算,拱桥东侧固定支座不均匀沉降 0.05 mm,西侧活动支座不均匀沉降 0.05 mm;活载为列车、特殊车辆荷载,根据文献[18],桥梁动力系数取 1.0。

表2 荷载工况划分

Table 2 Division of load conditions

工况	名称	工况	名称
1	自重	8	整体升温
2	二期荷载	9	整体降温
3	横向摇摆力	10	初拉力
4	梁单元梯度升温	11	预应力
5	梁单元梯度降温	12	支座沉降
6	拱单元梯度升温	13	移动荷载
7	拱单元梯度降温		

1.2.3 边界条件

边界条件包括一般支承、弹性连接与拱脚节点间的刚性连接。其中,一般支承位于系梁中性轴两端,一端释放y轴转角,一端释放沿x轴位移、y轴转角;K撑、X撑与拱肋连接处(见图1(b)),吊杆上端与拱肋、下端与主梁之间均设置弹性连接^[19]。

2 施工阶段拱肋截面受力分析

根据图1有限元模型,为明确拱肋截面钢管应力变化趋势,重点关注上下缘的应力变化情况,即顶点1和底点2(见图1(c))。图2给出了钢管应力在施工及运营过程中的变化规律。从图中可以看出,在阶段③~阶段⑤施工中,阶段④拱脚截面顶点压应力最大,1/4截面顶点1拉应力最大(见图2(a)),截面底点2应力变化与顶点1相反。分析原因,合龙段施工前结构体系处于最大悬臂状态,使拱肋钢管承受弯矩最大。收缩徐变(阶段15)使拱脚钢管截面应力增大,其中钢管上弦管压应力由73 MPa增至117.5 MPa,提高了61%。这是因为管内混凝土的收缩徐变对组合截面应力变化起控制作用,导致混凝土应力降低,钢管压应力增大。

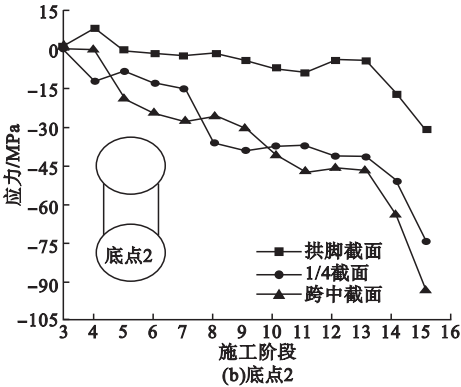
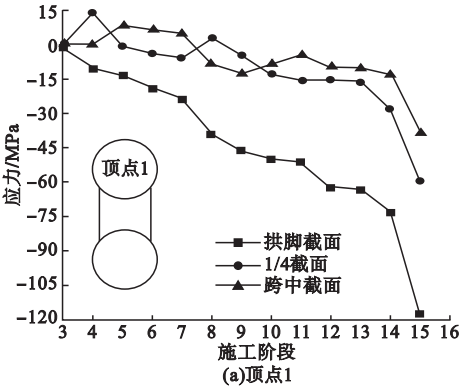
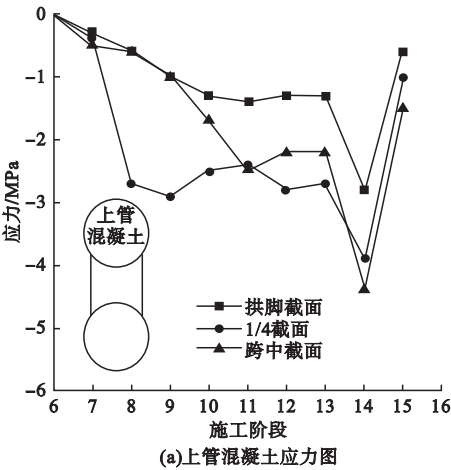


图2 钢管应力图

Fig. 2 Steel tube stress diagram

钢管混凝土拱桥拱肋管内混凝土应力变化曲线见图3。从图中可以看出,成桥后哑铃型截面处于全截面受压状态,这是因为吊杆张拉使哑铃型截面承受轴压力增大,最终使拱肋全截面整体受压。阶段⑭~阶段⑮过程中,钢管上下弦管压应力均变小。分析原因,混凝土收缩徐变使得钢管与管内混凝土发生应力重分布,钢管承担大部分压应力,核心混凝土承担压应力降低。



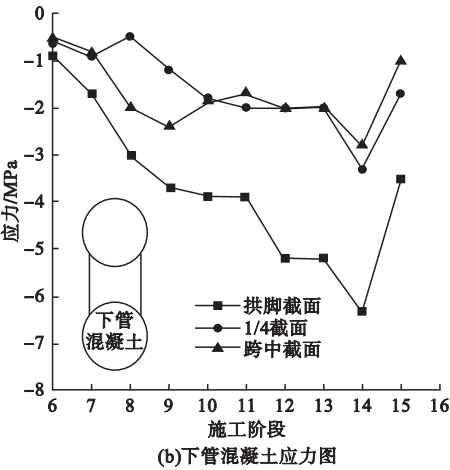


图3 管内混凝土应力图

Fig.3 Concrete stress diagram

3 拱肋静力性能有限元参数分析

3.1 混凝土浇筑顺序

由于本桥仅拱脚腹腔内需浇注混凝土,可不考虑腹腔内混凝土对拱肋受力性能的影响。笔者重点研究两种浇筑顺序,分别为浇筑下管混凝土→浇筑上管混凝土(方案Ⅰ)、浇筑上管混凝土→浇筑下管混凝土(方案Ⅱ)。表3为不同浇筑顺序时,管内混凝土的应力变化。从表中可以看出,方案Ⅰ与方案Ⅱ拱脚、拱顶截面混凝土压应力值相近。其中方案Ⅰ拱脚下管内混凝土压应力值最大,为-2.1 MPa,方案Ⅱ拱顶上管压应力值最大,为-1.2 MPa。

表3 混凝土截面应力变化

Table 3 The variation of stress in section of concrete

施工 方案	拱脚应力/MPa		拱顶应力/ MPa	
	下管	上管	下管	上管
Ⅰ	-1.2	—	-0.6	—
	-2.1	-0.3	-0.9	-0.5
Ⅱ	—	-0.7	—	-0.7
	-0.9	-1.0	-0.3	-1.2

钢管应力变化结果见表4。从表中可以看出,与方案Ⅰ相比,方案Ⅱ中拱脚顶点1、底点2压应力增大,拱顶顶点1拉应力增大。

这是因为两组方案中浇筑顺序的变化并不改变截面的惯性矩,而先浇筑下管混凝土时截面中性轴下移,同时使得结构体系更加稳定。

表4 钢管截面应力变化

Table 4 The variation of stress in section of steel tube

施工 方案	拱脚应力/MPa		拱顶应力/ MPa	
	底点	顶点	底点	顶点
Ⅰ	0.4	-20.3	-24.6	7.1
	-0.1	-25.6	-27.7	5.9
Ⅱ	-1.6	-24.3	-23.3	6.2
	-2.1	-28.2	-26.3	7.3

3.2 拱肋含钢率

3.2.1 钢管壁厚

为分析钢管壁厚变化对拱肋截面力学性能的影响,并保证拱肋含钢率介于4%~20%^[20],取钢管壁厚为12 mm、14 mm、16 mm、18 mm、20 mm。钢管应力变化如图4(a)所示。笔者取压应力为正,当壁厚由12 mm增至20 mm,钢管拱脚截面、1/4截面及拱顶截面承担的压应力均呈递减趋势,应力变化均超过10%。其中下弦管拱脚截面应力降幅最大,为26.9%;上弦管1/4截面应力减少最大,为15.6%。不同钢管壁厚时拱肋挠度变化如图4(b)所示。从图中可以看出,随着钢管壁厚的增加,拱肋跨中截面挠度由7.0 mm降至4.3 mm,降低了38.6%;1/8截面处挠度增大0.54 mm,其挠度最大值为5.3 mm,见图4(b)中 $y_{\max 2}$ 。

3.2.2 钢管直径

为分析钢管直径对拱肋力学性能的影响,选取钢管直径0.9~1.3 m,其对应含钢率为5.1%~7.5%。钢管直径改变对拱肋的影响趋势与壁厚对拱肋的影响趋势基本相同,即随着钢管直径的增加,钢管上、下弦管各截面压应力值递减,拱肋挠度最大值依次降低。图5(a)为直径变化下拱肋钢管的应力曲线,可以看出,各截面应力变化均小于10%。图5(b)为拱肋挠度变化曲线,图中

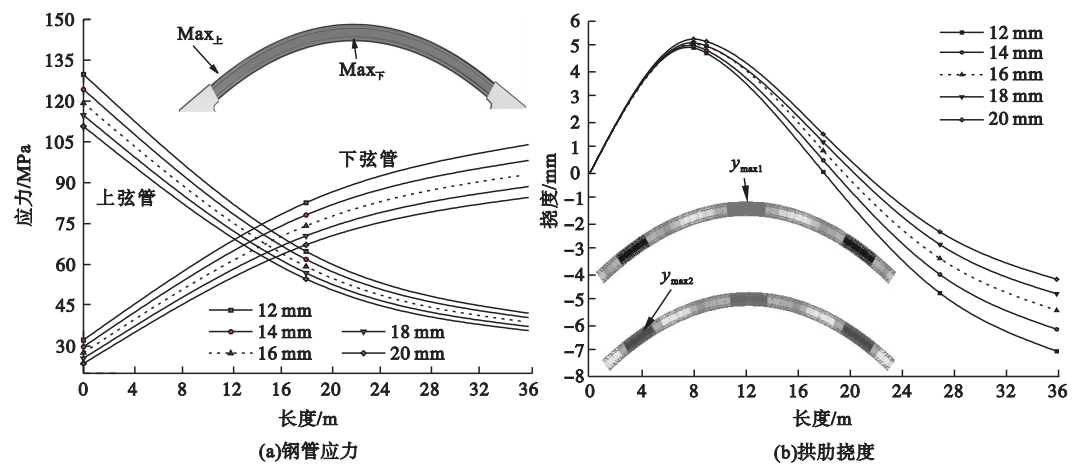


图4 钢管壁厚对拱肋应力及挠度的影响

Fig. 4 The influence of steel tube wall thickness on stress and deflection of arch rib

y_{max1} 、 y_{max2} 为对应钢管直径 0.9 m、1.3 m 时拱肋的峰值挠度,分别为 8.51 mm、5.20 mm。可以看出,随着钢管直径的增大,

跨中截面挠度由 8.51 mm 降至 1.44 mm,降低了 83.1%;拱肋 1/8 截面挠度增大了 8.1%。

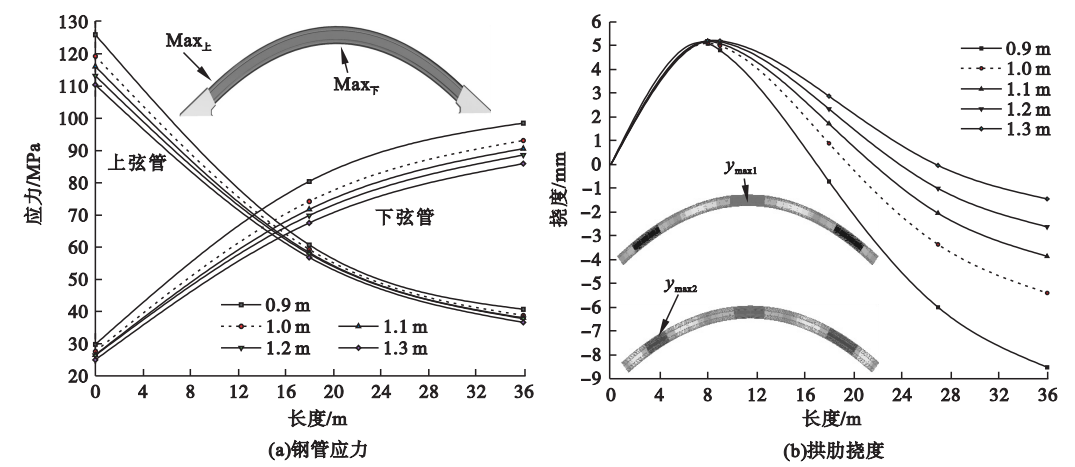


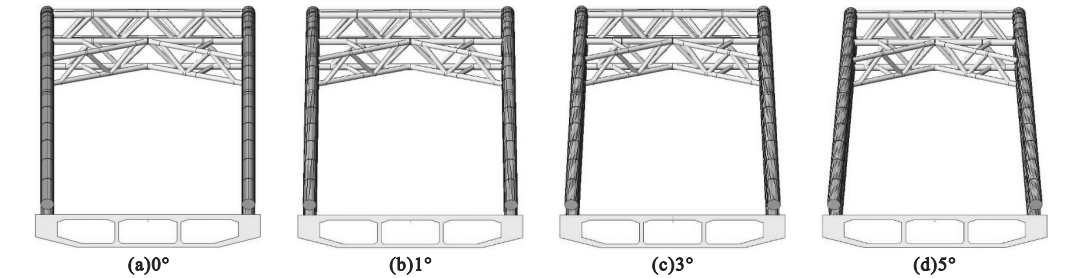
图5 钢管直径对拱肋应力及挠度的影响

Fig. 5 The influence of steel tube diameter on stress and deflection of arch rib

3.3 拱肋内倾角

通过调整拱肋内倾角进行建模,内倾角分别选取 0°、1°、3°、5°、7°、9°、11°、13°

(见图6)。拱肋结构内倾角变化时拱脚截面、1/4 截面、跨中截面的挠度变化曲线如图7所示。



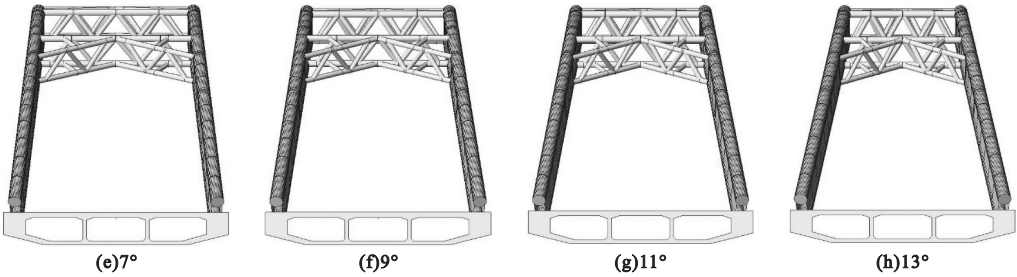


图6 内倾角变化

Fig. 6 Inclination angle change

系受力更加稳定。

(3)增大钢管壁厚或钢管直径均可使拱肋峰值应力、峰值挠度降低。增大钢管壁厚使得下弦管拱脚截面应力降低了26.9%,跨中截面挠度降低了38.6%,增大钢管直径使跨中截面挠度降低了83.1%。跨中截面挠度随拱肋内倾角增大呈现先减后增的趋势,并在内倾角为7°时达到挠度最小值。

参考文献

[1] 陈宝春,韦建刚,周俊,等.我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J].土木工程学报,2017,50(6):50-61.
(CHEN Baochun, WEI Jiangang, ZHOU Jun, et al. Application of concrete-filled steel tube arch bridges in China: current status and prospects [J]. China civil engineering journal, 2017, 50(6): 50-61.)

[2] 陈宝春.钢管混凝土拱桥[M].3版.北京:人民交通出版社,2016.
(CHEN Baochun. Concrete filled steel tubular arch bridges [M]. 3rd ed. Beijing: China Communications Press, 2016.)

[3] 周列茅.钢管混凝土系杆拱桥关键节点的受力行为[J].公路交通科技,2012,29(4):46-54.
(ZHOU Liemao. Mechanical behaviors of key joints of concrete-filled steel tube tied arch bridge [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2012, 29(4): 46-54.)

[4] 何宾旺,邓长根,巩俊松.下承式系杆钢拱桥拱脚应力及极限承载力研究[J].科学技术与工程,2020,20(29):12112-12117.
(HE Binwang, DENG Changgen, GONG Junsong. Stress and ultimate carrying capacity research of abutment of through Tied bar steel arch-bridge [J]. Science technology and engineering, 2020, 20(29): 12112-12117.)

[5] 陈钊,王建欣,王江宇,等.钢管混凝土系杆拱桥施工中受力性能及稳定性分析[J].桥梁建设,2012,42(6):27-32.
(CHEN Fan, WANG Jianxin, WANG Jiangyu,

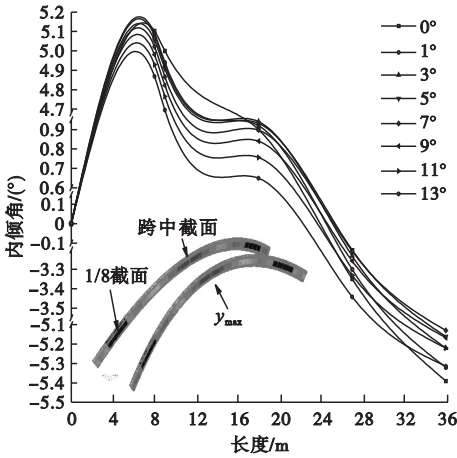


图7 拱肋内倾角对挠度的影响

Fig. 7 The influence of inclination angle of arch rib on deflection

从图7可以看出,内倾角的变化对拱肋峰值挠度有一定影响。当内倾角由0°增至13°时,拱肋峰值挠度位置均位于跨中截面且截面挠度随着内倾角的增大呈先减小后增加趋势。其中内倾角0°时峰值挠度为5.39 mm,内倾角7°时峰值挠度为5.13 mm。

4 结 论

(1)考虑拱肋混凝土长期收缩、徐变时,哑铃型拱肋处于全截面受压状态,其中钢管与管内混凝土峰值压应力均位于拱脚截面,拱脚顶点压应力最大,钢管压应力较施加二期荷载阶段增大了61%。

(2)对于采用哑铃型截面的下承式钢管混凝土系杆拱桥,先浇筑哑铃型下管混凝土对拱肋受力更有利。浇筑过程中拱肋截面中性轴下移且钢管截面应力变化较小,结构体

- et al. Analysis of mechanical behavior and stability of CFST tied arch bridge in construction progress [J]. Bridge construction, 2012, 42(6): 27-32.)
- [6] GENG Y, WANG Y Y, RANZI G, et al. Time-dependent analysis of long-span, concrete-filled steel tubular arch bridges [J]. Journal of bridge engineering, 2014, 19(4): 1-9.
- [7] CHEN B C, LAI Z C, LAI X Y, et al. Creep-prediction models for concrete-filled steel tube arch bridges [J]. Journal of bridge engineering, 2017, 22(7): 1-15.
- [8] 周倩, 周建庭, 张嘉诚, 等. 大跨钢管混凝土拱桥混凝土自调载灌注方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(3): 82-89.
(ZHOU Qian, ZHOU Jianting, ZHANG Jiacheng, et al. Self-regulating loading pouring method of long span CFST arch bridge [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2020, 52(3): 82-89.)
- [9] 韦建刚, 陈家炜, 谢志涛, 等. 钢管混凝土哑铃形截面提篮型标准拱桥的构建与分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 663-668.
(WEI Jiangang, CHEN Jiawei, XIE Zhitao, et al. Establishment and analysis of standard cfst x-type dumbbell-shaped cross-section arch bridge [J]. Journal of Fuzhou university (natural science edition), 2019, 47(5): 663-668.)
- [10] 杨绿峰, 解威威, 郑健, 等. 哑铃型钢管混凝土拱肋极限承载力的线弹性分析方法[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(3): 25-35.
(YANG Lufeng, XIE Weiwei, ZHENG Jian, et al. Linear-elastic analysis method of ultimate bearing capacity of dumbbell-shaped CFST arch rib [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2017, 17(3): 25-35.)
- [11] 陈淮, 朱倩, 李静斌, 等. 结构参数变化对斜靠式拱桥动力特性的影响[J]. 中国公路学报, 2009, 22(1): 47-52.
(CHEN Huai, ZHU Qian, LI Jingbin, et al. Influence of structural parameter variation on dynamic characteristic of leaning-type arch bridge [J]. China journal of highway and transport, 2009, 22(1): 47-52.)
- [12] 孙建平, 季日臣, 徐岳震. 铁路大跨度系杆拱桥结构稳定性设计参数研究[J]. 铁道建筑, 2011(12): 26-28.
(SUN Jianping, JI Richen, XU Yuezen. Study on structural stability design parameters of railway long span tied arch bridge [J]. Railway engineering, 2011(12): 26-28.)
- [13] 黄永忠. 钢管混凝土拱桥结构受力及参数设计分析[J]. 武汉理工大学学报, 2019, 43(6): 1085-1088.
(HUANG Yongzhong. Structure force and parameter design analysis of concrete filled steel tubular arch bridges [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2019, 43(6): 1085-1088.)
- [14] 黄育凡, 吴庆雄, 陈康明. 钢管混凝土拱梁组合桥整体架设施工受力性能分析[J]. 桥梁建设, 2018, 48(1): 25-30.
(HUANG Yufan, WU Qingxiong, CHEN Kangming. Analysis of mechanical behavior of hybrid bridge of CFST arch and girder in construction of integral erection [J]. Bridge construction, 2018, 48(1): 25-30.)
- [15] 李艳凤, 于欢, 包龙生. 下承式系杆拱桥施工阶段受力特性研究[J]. 公路工程, 2019, 44(4): 149-153.
(LI Yanfeng, YU Huan, BAO Longsheng. Study on mechanical characteristics of through tied-arch bridge at construction stage [J]. Highway engineering, 2019, 44(4): 149-153.)
- [16] 崔凤坤, 朱谊彪. 基于影响矩阵的钢管混凝土系杆拱桥成桥吊杆内力的优化[J]. 中外公路, 2015, 35(6): 195-199.
(CUI Fengkun, ZHU Yibiao. Optimization of sling internal force of concrete-filled steel tubular tied-arch based on influence matrix [J]. Journal of China & foreign highway, 2015, 35(6): 195-199.)
- [17] 季日臣, 石明星. 大跨径铁路钢管混凝土系杆拱桥稳定性分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(8): 87-91.
(JI Richen, SHI Mingxing. Stability analysis of long span railway CFST tied-arch bridge [J]. Journal of vibration and shock, 2011, 30(8): 87-91.)
- [18] 中国铁路设计集团有限公司. 铁路桥涵设计规范: TB 10002—2017 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
(China Railway Design Corporation. Code for design on railway bridge and culvert: TB 10002—2017 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.)
- [19] 隋伟宁, 李航, 王占飞, 等. 内倾角对中承式钢箱提篮拱桥抗震性能影响分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 182(5): 796-804.
(SUI Weining, LI Hang, WANG Zhanfei, et al. Effect of leaning angle on seismic performance of half-through steel box basket-type arch bridges [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 182(5): 796-804.)
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢管混凝土拱桥技术规范: GB 50923—2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. Technical code for concrete-filled steel tube arch bridges: GB 50923—2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)