

大跨度钢管拱施工阶段仿真分析

邓海¹, 林燕珊², 李海云¹, 舒赣平³

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050000; 2. 浙江航冠工程设计有限公司, 浙江 杭州 310000;
3. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 随着我国大跨度连续梁拱组合桥的不断增多, 钢管拱施工质量对成桥阶段和运营阶段的结构有着重要影响, 研究钢管拱在施工过程中的力学行为是非常有必要的。本文利用 ABAQUS 有限元分析软件创建钢管拱不同施工阶段, 分析钢管拱在各个施工阶段中受力、变形等力学特征。计算结果表明: 在钢管拱施工阶段, 要重点关注钢管拱拱脚处应力状态, 在钢管拱拼装完成后, 支架位置处拱顶和拱底分别承受拉应力和压应力。钢管拱支架拆除后, 在索力值 1 074.4 kN 作用下, 整个钢管拱处于受压状态且拱底的受压程度大于拱顶。在钢管拱整体纵移过程中, 钢管拱的应力在 -12.49~11.10 MPa 之间变化, 由于拱脚处临时拉索的作用, 在该位置处有最大压应力。在成桥施工阶段中, 钢管拱的拱顶受压程度由拱中心向两侧减小, 拱底受压程度由拱脚向拱中心减小, 经过有限软件分析计算, 钢管拱的应力、线形均满足规范要求。

关键词: 连续梁拱组合桥; 钢管拱; 施工阶段; 钢管拱整体纵移

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)01-0078-07

Simulation analysis of large span steel pipe arch in construction stage

DENG Hai¹, LIN Yanshan², LI Haiyun¹, SHU Ganping³

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang 050000, China;
2. Zhejiang Hangguand Engineering Design Co. Ltd., Hangzhou 310000, China;
3. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: With the increasing number of long-span continuous beam-arch composite bridges in China, the construction quality of steel pipe arch has an important influence on the structure of bridge completion stage and operation stage. It is necessary to study the mechanical behavior of steel pipe arch in the construction process. In this paper, ABAQUS finite element analysis software is used to create different construction stages of steel pipe arch, and analyze the mechanical characteristics such as stress and deformation of steel pipe arch in each construction stage. The calculation results show that the stress state at the foot of the steel pipe arch should be paid attention to in the construction stage of the steel pipe arch. After the completion of the steel pipe arch assembly, the arch top and the arch bottom at the bracket position bear tensile stress and compressive stress respectively. After the steel pipe arch support is removed, the entire steel pipe arch is under compression and the compression degree at the bottom of the arch is greater than that at the top of the arch under the action of the cable force value of 1 074.4 kN. During the overall longitudinal movement of the steel pipe arch, the stress of the steel pipe arch changes between -12.49 MPa and 11.10 MPa. Due to the effect of the temporary cable at the arch foot, there is the maximum compressive stress at this position. In the construction stage of the completed bridge, the compression degree of the vault of the steel pipe arch decreases from the arch center to both sides, and the compression degree of the arch bottom decreases from the arch foot to the arch center. Through the finite software analysis and calculation, the stress and linear of the steel pipe arch meet the requirements of the specification.

Key words: continuous beam arch composite bridge; Steel pipe arch; construction stage; overall longitudinal displacement of steel pipe arch

连续梁拱组合桥具有长跨度、大刚度、美外形等特点, 在铁路、公路、市政桥梁建设中得到广泛的应用。潘念等^[1]介绍了钢管拱异位拼装顶推施工方

收稿日期: 2022-04-03

修改稿日期: 2022-08-06

基金项目: 河北省重点研发项目(21375403D, 20375410D); 河北省自然科学基金项目(E2020210017)

第一作者: 邓海(1975—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为桥梁和建筑结构力学性能分析和结构监控监测, E-mail: 13933093219@126.com

通信作者: 林燕珊(1996—), 女, 硕士, 主要研究方向为大跨度钢管拱施工受力性能研究, E-mail: 1531495342@qq.com

案和滑移中风速、顶推速度等主要控制内容,分析了滑移过程中钢管拱倾覆验算、钢管拱合龙前后应力、变形状态以及纵移中简支梁的受力性能,得出该施工方法优越性。陈俊波等^[2]利用Midas/Civil有限元软件获取临时拉索的张拉力,分析拱肋顶推过程中梁应力与变形规律。王引富^[3]结合跨南水北调干渠连续梁拱桥施工,针对异位拼装顶推施工技术,研究了拱脚、拼装支架设计和拱肋吊装、顶推系统设计等关键技术。陈海^[13]以南淝河特大桥为研究对象,介绍了拱部异位拼装整体纵移关键施工工序,纵移过程中对前进速度、风速、两侧拱肋相对位移等参数监控。黎儒国等^[14]京沪高铁跨娄江连续梁拱桥为研究背景,研究了大跨度钢管拱整体滑移技术,考虑多种影响参数研究钢管拱异位拼装整体纵移关键技术。综上所述,跨度越大,钢管拱在不同施工阶段的受力就越复杂,钢管拱施工时间越长,可能遇到的偶然因素就越多,本文针对超大跨度钢管拱,探讨不同施工阶段下钢管拱的受力变化,利用ABAQUS有限元软件对钢管拱施工阶段进行模拟,分析不同施工阶段下钢管拱的受力、变形等力学特征,以提高超大跨度钢管拱施工过程的安全可靠性。

1 工程概述

蕲河特大桥连续梁拱组合桥跨布置为(100+196+100)m,全长397.5m(含两侧梁端至支座中心线各0.75m)。连续梁为预应力混凝土结构,采用单箱双室变高度箱形截面,跨中及边支点梁高为5.5m,中支点梁高12.5m,梁底按1.6次抛物线变化。钢管拱计算跨径为 $L=196$ m,设计矢高 $f=39.2$ m,矢跨比1/5,拱轴线为抛物线,设计拱轴线方程: $y=(-1/245)x^2+0.8x$ 。两拱肋间共设置10道桁架型横撑,吊杆顺桥向间距9m,全桥共设20组双吊杆,如图1所示。



图1 连续梁拱组合桥效果图

Fig. 1 Continuous beam arch composite bridge effect diagram

钢管拱截面为哑铃型,在拱肋计算跨径2/8(A-A)、4/8(B-B)、6/8(C-C)截面处,拱肋截面上下边缘处粘贴应变计,应力监测布置如图2所示。

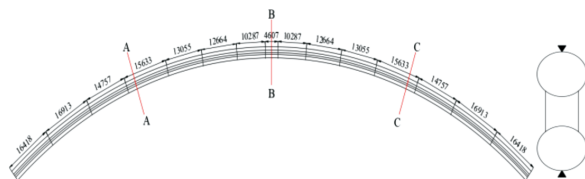


图2 钢管拱应力测点布置图

Fig. 2 Layout of stress measuring points of steel pipe arch

钢管拱在吊装、支架拆除及临时拉索满张、整体纵移到位施工过程中进行线性监测,吊装拱肋节段上弦管前端顶布置棱镜。拱肋预制时,根据监测要求在相应位置安装棱镜并采取安全措施,保证监测数据的准确性。节段吊装时,要保证棱镜与上弦管表面保持垂直。拱肋监测采用三维坐标法,将全站仪架设在控制点上,利用全站仪的三维坐标控制功能瞄准测点棱镜上,直接监测出上弦管前端顶的三维坐标,线形监测布置如图3所示。

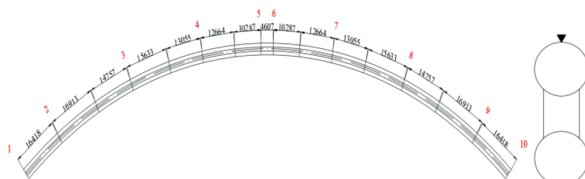


图3 钢管拱线形测点布置图

Fig. 3 Layout of steel pipe arch line measuring points

2 钢管拱施工过程有限元分析

蕲河特大桥(100+196+100)m连续梁拱组合桥采用ABAQUS有限元软件建立钢管拱模型进行施工仿真模拟,根据构件受力性能不同选取合适的单元类型,考虑各部件之间实际的相互作用和约束情况,对钢管拱不同施工阶段下的受力性能进行精细化分析。分析钢管拱在不同施工过程中受力状态的关键步骤是创建精度高的有限元模拟,需要遵守以下原则:

- (1)对实际工程中各个构件的截面尺寸、形状、厚度等参数进行零部件的建立;
- (2)建立各种材料的特性,包含杨氏模量、膨胀系数等参数,如表1所示;
- (3)根据构件受力特点选择单元类型和种子大小,能够提高网格质量来获得较为精确的收敛解。

表 1 材料参数表

Tab. 1 Material parameter table

材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量	泊松比	膨胀系数	(抗拉/抗压强度)/MPa	屈服强度/MPa
C55	2 600	3.6×10^4	0.2	-	2.23/33.7	-
Q355	7 850	2.06×10^5	0.31	-	-	355
预应力筋	7 850	1.95×10^5	0.3	1.20×10^{-5}	1 860	-
吊杆	7 850	2.05×10^5	-	-	1 670	-

本文钢管拱全施工过程分为钢管拱拆架、纵移和成桥三个阶段,利用 ABAQUS 有限元软件分别创建施工阶段模型,对钢管拱不同施工阶段进行受力分析,了解钢管拱在不同施工阶段的受力特点。

2.1 钢管拱异位拼装施工阶段模拟

利用 ABAQUS 有限元创建钢管拱、支架、风撑等实体单元零部件,钢管拱拼装节段间利用绑定约束来模拟连接,拱肋与风撑采用绑定约束进行连接,与拼装支架采用耦合进行连接。临时拉索采用受拉桁架单元,与临时拱座采用约束模拟连接。

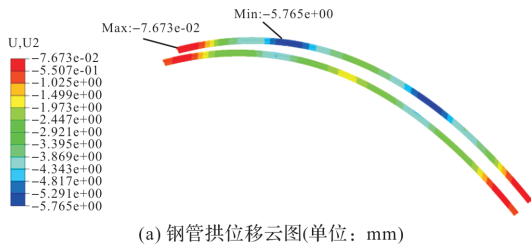
2.1.1 钢管拱拼装完成阶段

在非桥位简支梁梁面上搭设拼装支架,利用吊车吊装钢管拱节段、风撑至合龙,如图 4 所示。钢管拱线形和应力云图,如图 5 所示。

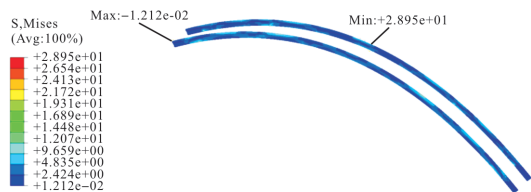


图 4 钢管拱拼装完成后模型

Fig. 4 Post assembly model of steel pipe arch



(a) 钢管拱位移云图(单位: mm)

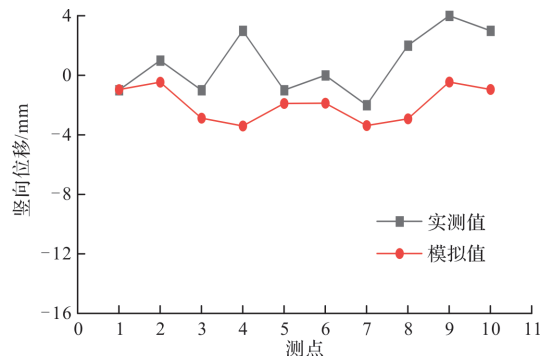


(b) 钢管拱应力云图(单位: MPa)

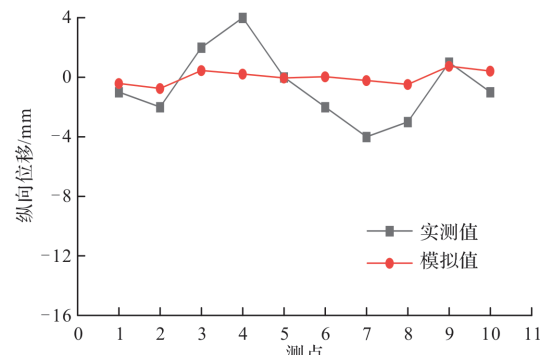
图 5 钢管拱位移和应力云图

Fig. 5 Displacement and stress cloud diagram of steel pipe arch

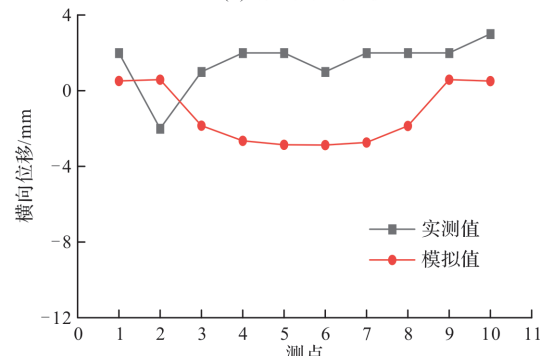
通过有限元软件建模分析,钢管拱拼装完成后各个测点位置位移分析值与实测值对比,如图 6 所示。



(a) 钢管拱竖向位移



(b) 钢管拱纵向位移



(c) 钢管拱横向位移

图 6 钢管拱位移对比图

Fig. 6 Comparison of displacement of steel pipe arch

由图 6 可知,钢管拱拼装过程有支架、临时拱座支撑,其竖、纵向位移变化幅度不大,模拟数据与实测数据基本相同。左右侧钢管拱关键截面拱顶和拱底最大主应力如表 2 所示。

由表 2 可得,钢管拱拼装合龙后,以上截面位置均位于拼装支架的周围,其拱底处于受压状态,

拱顶处于受拉状态, 而其余拱肋截面受力状态相反。

表 2 钢管拱截面应力
Tab. 2 Steel pipe arch section stress

截面 位置	应力/MPa			
	左侧		右侧	
	拱顶	拱底	拱顶	拱底
1/8	2.11	−9.14	3.37	−7.68
2/8	3.92	−6.95	4.6	−6.51
3/8	1.27	−4.11	2.64	−3.5
4/8	3.5	−6.67	5.61	−6.23
5/8	1.3	−4.2	2.92	−2.47
6/8	3.52	−6.76	4.51	−6.75
7/8	2.1	−8.97	3.43	−7.91

2.1.2 钢管拱支架拆除阶段

由于支架拆除, 拱肋自重会传递给临时拱座, 产生较大的水平推力, 使得拱肋线性偏离设计线形, 所以需要安装临时拉索来平衡水平推力来保持拱肋线形。按照支架两侧向中间拆除原则, 利用 ABAQUS 有限元软件建立钢管拱拆除支架模型, 获取在钢管拱自重荷载作用下临时拉索的轴力值。采用轴向连接单元设置刚度来模拟临时拉索, 其临时拉索编号如图 7 所示。

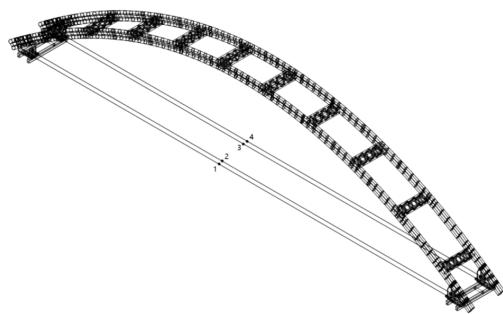


图 7 钢管拱临时拉索编号
Fig. 7 Temporary cable number for steel pipe arch

按照支架两侧向中间拆除原则, 利用 ABAQUS 有限元软件建立钢管拱拆除支架模型, 提取在钢管拱自重荷载作用下临时拉索所受的轴力值, 如图 8 所示。

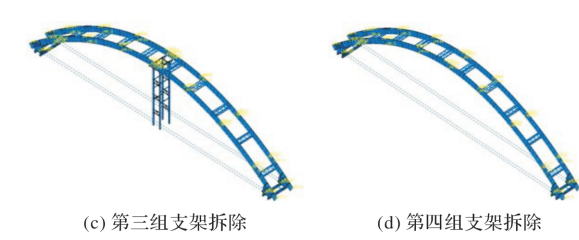
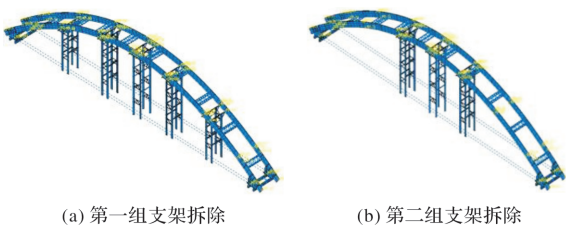


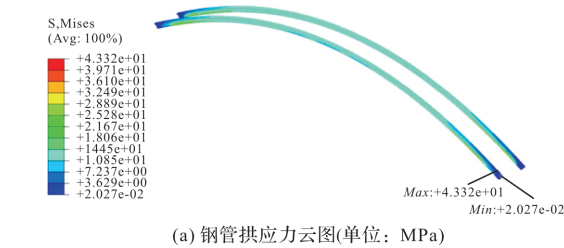
图 8 钢管拱支架拆除阶段
Fig. 8 Demolition stage of steel pipe arch support
支架按照从两侧向中间对称原则进行拆除, 四组支架拆除的施工阶段中临时拉索索力值如表 3 所示。

表 3 临时拉索轴力值
Tab. 3 Temporary cable axial force values

阶段		索号	模拟值/kN	实测值/kN
第一 阶段	第一组支 架已拆除	1	545.52	-
		2	587.79	517.58
		3	587.79	411.07
		4	545.52	-
第二 阶段	第二组支 架已拆除	1	692.72	-
		2	742.12	954.79
		3	742.12	658.33
		4	692.72	-
第三 阶段	第三组支 架已拆除	1	861.6	-
		2	934.3	967.21
		3	934.3	749.61
		4	861.6	-
第四 阶段	第四组支 架已拆除	1	979.6	-
		2	1 074.5	1 074.44
		3	1 074.5	858.44
		4	979.6	-

由表 3 得知, 根据施工现场临时拉索安装位置, 利用 ABAQUS 建模计算, 得到拆除支架前后临时索力所需的张拉力值。随着每组支架拆除, 临时拱脚处水平推力不断增加, 临时拉索索力值也不断增加。支架全部拆除后内索 2、3 的索力值为 1 074.5 kN, 与实测值一致。

将临时拉索索力实测数值加载在有限元模型上, 对钢管拱进行应力和竖向位移分析, 钢管拱最大应力为 43.3MPa, 拱顶竖向位移为 −1.66 mm, 有限元应力和位移云图如图 9 所示。



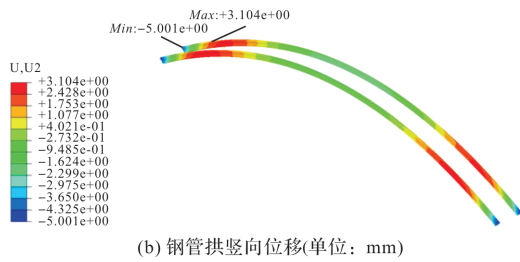


图 9 钢管拱应力云图及竖向位移

Fig. 9 Stress cloud diagram and vertical displacement of steel pipe arch

通过有限元软件建模分析钢管拱张拉后各个测点位置位移分析值与实测值对比, 如图 10 所示。

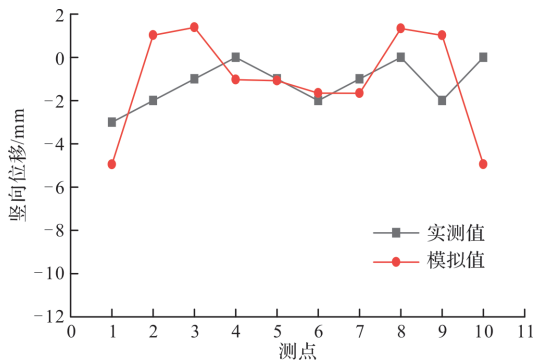


图 10 临时拉索张拉后钢管拱竖向位移

Fig. 10 Vertical displacement of steel pipe arch after temporary cable tension

由图 10 可得, 实测值与有限元模拟值趋势一致, 说明有限元模型是可靠的。临时拉索满张后整个钢管拱处于受压状态, 拱底的受压程度要比拱顶的大, 均满足设计要求。

2.2 钢管拱整体纵移施工阶段模拟

钢管拱整体纵移是一个缓慢的过程, 顶推过程可以近似匀速前进, 其速度大概为 0.5 m/min。本文分析在速度为 0.5 m/min、四级风荷载、自重和临时拉索索力值 1 074.4 kN 共同作用下, 钢管拱受力及位移情况, 有限元模型如图 11 所示。

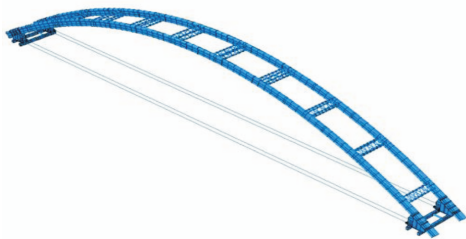


图 11 钢管拱纵移模型

Fig. 11 Longitudinal model of steel pipe arch

经计算, 有限元应力云图和位移云图如图 12 所示。钢管拱在纵移过程中拱顶应力在 $-4.32 \sim 11.10$ MPa 之间变化, 拱底应力在 $-12.49 \sim 5.38$

MPa 之间变化。监测数据钢管拱在整体纵移过程中应力在 $-7.3 \sim 14.2$ MPa 之间变化。拱顶最大拉应力为 11.10 MPa, 发生在 4/8 截面处, 最大压应力为 4.32 MPa, 发生在 3/8 截面处; 拱底最大拉应力为 5.38 MPa, 发生在 3/8 截面处, 最大压应力为 12.49 MPa, 发生在 1/8 截面处, 应力均满足设计要求。由于拱脚处有临时拉索的作用, 其截面拱底位置处受压程度最大、4/8 截面拱底处受压程度最小。

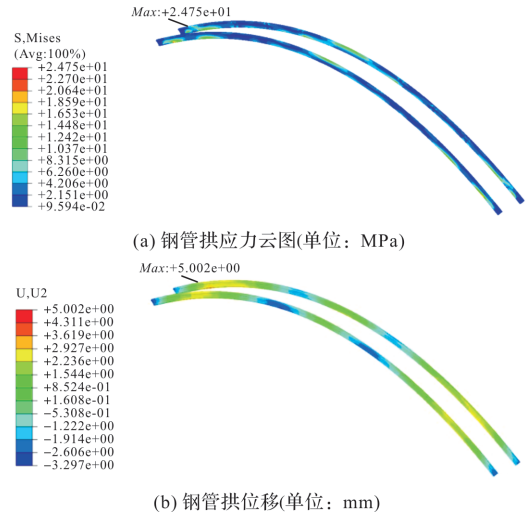


图 12 钢管拱应力云图及竖向位移

Fig. 12 Stress cloud diagram and vertical displacement of steel pipe arch

2.3 钢管拱成桥阶段模拟

由于全桥模型过于复杂, 钢管拱采用壳单元、风撑采用梁单元、吊杆采用受拉桁架单元模拟, 以降低计算量和增强收敛性, 连续梁节段间采用绑定约束进行连接, 吊杆与钢管拱、连续梁均采用绑定约束, 风撑以及预应力钢束内置于整个模型中, 有限元模型如图 13 所示。

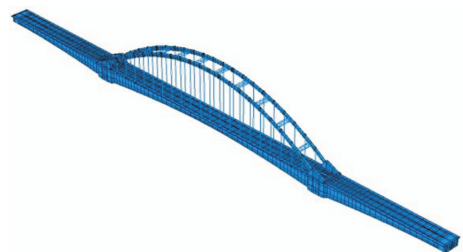


图 13 成桥阶段模型

Fig. 13 Bridge stage model

连续梁分析结果如图 14 所示, 钢管拱分析结果如图 15 所示。

图 14(a) 可知成桥后连续梁的应力分布及数值, 由于连续梁的跨度较大, 随着跨度增大, 预应力锚固区两端对连续梁应力影响明显增强, 产

生较大的应力集中,节段梁两端截面顶板中心均处于受压状态,最大压应力为 15.8 MPa,发生在 0 号块顶板中心,压应力从 0 号块向两端逐渐减小,未超过混凝土允许压应力值。图 14(b)可得,在自重、预应力、吊杆和二期荷载共同作用下,成桥阶段中跨挠度为 52.15 mm,边跨挠度为 16.64 mm,梁体竖向挠度限制为 $L/1\ 500=130.67$ mm,满足要求。

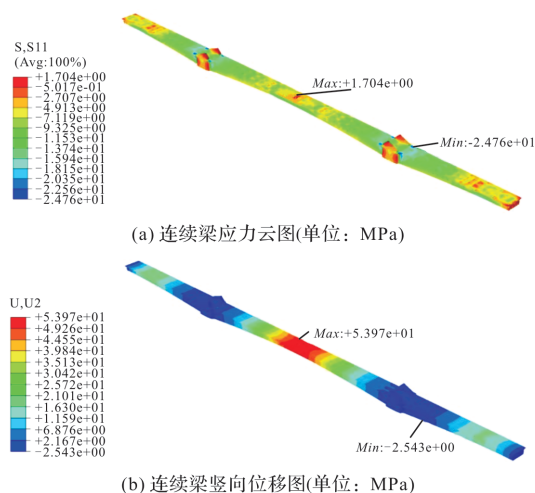


图 14 连续梁分析结果

Fig. 14 Analysis results of continuous beams

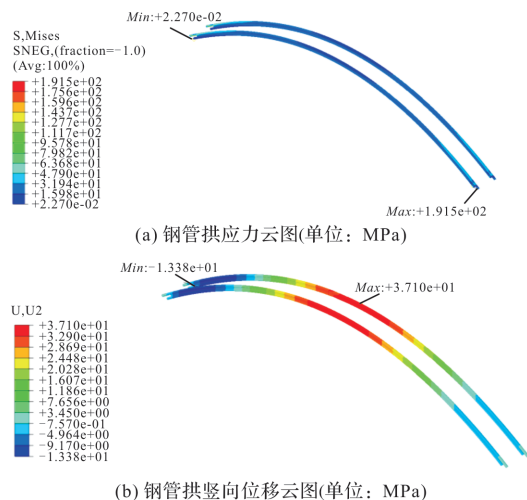


图 15 钢管拱分析结果

Fig. 15 Analysis results of steel pipe arch

由图 15 可得,钢管拱最大应力 191.5 MPa,可能由于拱肋成桥阶段,拱脚对拱肋的约束增大,导致了应力集中,小于容许值 210 MPa,拱肋与 0 号块梁段连接处较为复杂,在施工过程中需要注重监测拱脚处混凝土和拱肋的受力状态。钢管拱最大竖向位移 37.1 mm,满足 $L/3\ 000=65.33$ mm 且不大于 50 mm 的要求。拱顶受压程度由拱中心向拱脚减小,而拱底受压程度由拱脚向拱中心减小。

3 结论

本文以蕲河特大桥为工程背景,运用 ABAQUS 有限元软件建立钢管拱施工过程模型,并对钢管拱施工阶段进行模拟计算分析,得到钢管拱在各个施工过程的位移、应力,主要结果为:

(1)对钢管拱拼装模型进行静力分析,拱脚处拱顶底应力相差较大,施工过程重点关注拱脚处钢管拱应力状态;

(2)对钢管拱整体纵移进行静动力分析,拱顶应力在 $-4.32 \sim 11.10$ MPa 之间变化,应力满足要求;

(3)全桥有限元模型考虑了材料非线性以及几何非线性,在施工过程中需加强控制预应力锚固区域的施工质量,避免局部拉应力过大导致混凝土开裂。

参考文献 References

- [1] 潘念,李承君. 连续梁钢管拱异位拼装整体顶推分析与施工[J]. 铁道建筑, 2011(5): 25-27.
PAN Nian, LI Chengjun. Integral jacking analysis and construction of ectopic assembling of continuous beam steel tube arch[J]. Railway Construction, 2011(5): 25-27.
- [2] 陈俊波,李延强,邢莉娜,等. 大跨度连续梁拱桥顶推施工力学行为分析[J]. 土木工程, 2018, 7(6): 969-977.
CHEN Junbo, LI Yanqiang, XING Lina, et al. Mechanical analysis of long-span continuous beam arch bridge under incremental launching construction[J]. Hans Journal of Civil Engineering, 2018, 7(6): 969-977.
- [3] 王引富. 连续梁拱拱肋异位拼装顶拉就位关键技术[J]. 铁道建筑技术, 2020(6): 100-104.
WANG Yinfu. Key technology of ectopic assembling and jacking placement of continuous beam arch rib[J]. Railway Construction Technology, 2020(6): 100-104.
- [4] 赵琳强. 大跨铁路尼尔森体系连续梁拱组合桥施工阶段受力性能分析[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
ZHAO Linqiang. Mechanical performance analysis of continuous beam-arch composite bridges with Nelson system on large-span railways during construction[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2020.
- [5] 周彦文,李书兵,唐剑. 大跨度钢管混凝土拱桥成拱线形控制技术[J]. 施工技术, 2020, 49(2): 55-60.
ZHOU Yanwen, LI Shubing, TANG Jian. Research on the control technology of long-span CFST arch bridge forming arch alignment[J]. Construction Tech-

- nology, 2020, 49(2): 55-60.
- [6] 王强. 大跨度铁路连续梁拱组合桥梁大节段钢管拱肋整体同步提升拼装技术[J]. 中国铁路, 2020(6): 65-70.
- WANG Qiang. Integral synchronous lifting and assembling technology of large-section steel pipe arch rib for continuous beam-arch composite bridges of long-span railway[J]. China Railway, 2020(6): 65-70.
- [7] 张志川. 有限元计算中预应力等效模拟方法研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(S1): 122-125.
- ZHANG Zhichuan. Research on the equivalent simulation method of prestress in finite element calculation [J]. People's Yellow River, 2020, 42(S1): 122-125.
- [8] 吴欣荣. 钢管混凝土拱施工阶段抗风性能与成桥阶段稳定性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- WU Xinrong. Research on the wind resistance performance of CFST arch during construction and the stability performance during bridge completion [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [9] 曹政. 哑铃型截面钢管混凝土系杆拱桥施工优化及受力分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
- CAO Zheng. Construction optimization and stress analysis of CFST tied arch bridge with dumbbell section [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2015.
- [10] 王松林. 连续梁拱组合体系桥梁的有限元分析与施工监控[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- WANG Songlin. Finite element analysis and construction monitoring of bridges with continuous beam-arch composite system [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [11] 仇元森. 高速铁路连续梁拱组合特大桥施工仿真及主梁监控分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- QIU Yuanmiao. Construction simulation and main girder monitoring analysis of high-speed railway continuous beam-Arch composite bridge [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [12] 杨高平. 铁路下承式钢管混凝土拱桥受力特性分析 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
- YANG Gaoping. Analysis of mechanical characteristics of railway under-loaded CFST arch bridges [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014.
- [13] 陈海. 合福铁路南淝河特大桥钢管拱异位拼装纵移就位施工技术[J]. 中国铁路, 2015(3): 71-76.
- CHEN Hai. Construction Technology of Ectopic Assembling and Longitudinal Displacement of Steel Tube Arch of Nanfeihe Bridge on Hefei-Fuzhou Railway [J]. China Railway, 2015(3): 71-76.
- [14] 黎儒国, 吴文明, 尹玉林, 等. 曲线桥大跨度钢管拱整体滑移技术研究[J]. 公路, 2010(12): 5-11.
- LI Ruguo, WU Wenming, YIN Yulin, et al. Study on Integral Sliding Technology of Large Span Steel Tube Arch of Curved Bridge [J]. Highway, 2010(12): 5-11.

(编辑 沈 波)