

## 拱脚不同时机封铰对钢管砼拱桥受力影响分析

宛加勇, 李伟

(中交第四公路工程局有限公司, 北京 100123)

**摘要:** 钢管砼拱桥施工中, 拱脚不同阶段封铰的选择很大程度上决定其缆索吊装施工的成败, 且对桥梁施工过程及成桥后受力、线形都有极大影响。文中以张花(张家界—花垣)高速公路古丈连接线唐家河特大桥为工程背景, 借助有限元软件 MIDAS/Civil 2015 对其拱肋吊装过程进行正装模拟分析, 拟定 4 种封铰方案对施工中的结构受力进行对比分析, 确定较理想的封铰方案。

**关键词:** 桥梁; 钢管砼拱桥; 缆索吊装; 拱脚封铰; 受力分析; 正装模拟

中图分类号: U448.22

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)06-0110-04

拱桥缆索吊装施工包括缆索系统布置、拱肋吊装及拱上建筑施工, 合理的施工方法是桥梁施工过程及运营阶段安全的重要保障。拱脚封铰是拱桥缆索吊装施工中的重要步骤, 不同阶段封铰对桥梁结构受力及线形有重大影响。该文以张花(张家界—花垣)高速公路古丈连接线唐家河特大桥为工程背景, 从拱脚不同阶段封铰展开分析, 研究封铰时机对结构的影响。

## 1 工程背景

唐家河特大桥设计中心里程桩号为 K26+149.85, 起点桩号为 K26+002.75, 终点桩号为 K26+296.95。孔跨布置为 2 跨 20 m 先简支后结构连续 T 梁+主跨 200 m 上承式钢管砼拱桥+2 跨 20 m 先简支后结构连续 T 梁。主拱圈采用双片式拱肋吊装, 横向连接采用 X 撑横联, 其中单片拱肋选用变化高度的四管桁式截面, 拱脚截面高度为 5.5 m, 拱顶截面高度为 3.5 m, 拱肋宽度为 2.2 m。1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、11<sup>#</sup>、12<sup>#</sup> 拱上立柱灌注 C55 微膨胀砼, 其余 8 根立柱采用空钢管。主桥宽度为 0.5 m(护栏)+9.0 m(净宽)+0.5 m(护栏), 横向采用 5 片简支体系桥面连续 T 梁, 拱上桥面板为 12 跨 16 m T 梁。主桥结构布置及主孔设计参数分别见图 1、表 1。

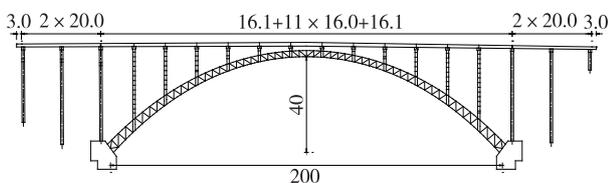


图 1 唐家河特大桥立面布置(单位:m)

表 1 唐家河特大桥主孔设计参数

项目	参数值	项目	参数值
净跨径/m	200	拱轴系数	1.756
净矢高/m	40	拱轴线	悬链线
净矢跨比	1/5		

## 2 施工阶段划分

根据该桥地质、地形、桥型及施工特点, 考虑到施工安全性及施工进度等因素, 采用双塔三跨式缆索方案。设计 2 套 40 t 横移式索鞍缆索起重机, 综合考虑现场设备起吊能力及起吊缆索机械的实际情况, 根据缆索吊的最大吊装吨位、施工工期、施工安全性等进行主拱吊装节段划分。缆索吊装拱肋过程中, 最大吊装节段重量达 800 kN。吊装单元划分见图 2, 拱圈节段参数见表 2, 施工阶段划分见表 3。

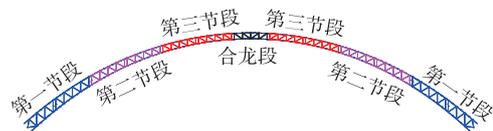


图 2 唐家河特大桥拱肋吊装节段划分

表 2 唐家河特大桥拱圈节段参数

节段编号	弦长/m	重量/kN	$L_1$ /m	横撑编号	重量/kN
左一	36.50	800	25.93	1 <sup>#</sup> ~3 <sup>#</sup>	300
左二	34.64	680	29.91	4 <sup>#</sup> ~7 <sup>#</sup>	400
左三	32.45	520	30.21	8 <sup>#</sup> ~11 <sup>#</sup>	400
合龙	16.00	350			
右三	32.45	800	30.21	8 <sup>#</sup> ~11 <sup>#</sup>	400
右二	34.64	680	29.91	4 <sup>#</sup> ~7 <sup>#</sup>	400
右一	36.50	520	25.87	1 <sup>#</sup> ~3 <sup>#</sup>	300

表3 唐家河特大桥施工阶段划分

施工阶段	工况描述
CS1	吊装两岸第一节段
CS2	安装两岸第一节段 X 形横撑
CS3	吊装两岸第二节段
CS4	安装两岸第二节段 X 形横撑
CS5	吊装两岸第三节段
CS6	安装两岸第三节段 X 形横撑
CS7	安装合龙段
CS8	拆除所有扣索
CS9	管内砼灌注

### 3 封铰方案对比分析

根据该桥现场实际情况,拟定 4 种封铰方案(见表 4)进行对比分析。

表4 唐家河特大桥拱脚封铰方案

封铰方案编号	封铰时机
方案 1	步骤 CS1 吊装两岸第一节段封铰
方案 2	步骤 CS5 吊装两岸第三节段封铰
方案 3	步骤 CS8 扣索释放后灌注砼之前封铰
方案 4	步骤 CS9 灌注砼后封铰

#### 3.1 有限元模型建立

根据该桥设计施工图,采用 MIDAS/Civil 2015 建立全桥三维空间有限元模型进行施工过程模拟分析。主拱圈采用梁单元模拟,扣索采用仅受拉桁架单元、实腹圆形截面模拟,模型中共 340 个节点、624 个单元,节点坐标与设计图一致。主要构件的材料参数见表 5,有限元模型见图 3。

#### 3.2 吊装过程中拱肋应力分析

在钢管砼拱桥拱肋吊装过程中,随着吊装节段及吊装重量的增加,拱脚不同阶段封铰会导致后续

施工节段对已施工拱肋的影响程度有一定差异,对吊装过程中拱肋应力有较大影响。图 4 为缆索吊装拱脚分析模型,表 6 为 4 种封铰方案下拱脚附近上下弦杆应力,图 5、图 6 为拱脚上下弦杆应力随施工阶段的变化,其中拉应力为正、压应力为负。

表5 主要构件的材料参数

材料类型	弹性模量/MPa	线膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	容重/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	泊松比
C55	$3.55\times 10^7$	$1.0\times 10^{-5}$	25.00	0.2
钢绞线	$1.95\times 10^5$	$1.2\times 10^{-5}$	78.50	0.3
Q345C 钢材	$2.06\times 10^4$	$1.2\times 10^{-5}$	76.98	0.3

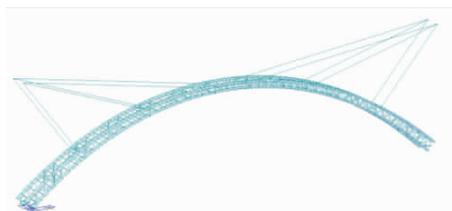


图3 唐家河特大桥吊装施工有限元模型



图4 缆索吊装拱脚分析模型

由表 6、图 5~6 可知:方案 1~4 下,拱脚附近上弦杆最大拉应力分别为 18.9、13.5、11.5、11.5 MPa,最大压应力为 -60.0、-58.0、-55.9、-54.9 MPa;拱脚附近下弦杆最大压应力为 -71.5、-70.2、

表6 各封铰方案下施工阶段上下弦杆应力

MPa

施工阶段	各封铰方案下上弦杆应力				各封铰方案下下弦杆应力			
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
CS1	6.7	3.5	2.3	2.8	-11.0	-7.4	-5.4	-5.3
CS2	9.5	5.4	4.3	4.4	-13.8	-9.3	-7.4	-7.4
CS3	14.4	9.1	7.8	7.8	-23.6	-17.2	-15.2	-15.2
CS4	18.9	13.2	11.5	11.5	-27.4	-20.3	-18.3	-18.5
CS5	-11.9	-10.3	-9.9	-9.9	-15.6	-17.7	-12.4	-12.4
CS6	-10.6	-10.6	-8.3	-8.3	-17.3	-19.4	-14.0	-14.0
CS7	-17.4	-17.3	-16.3	-16.3	-12.8	-14.8	-12.7	-12.8
CS8	-15.7	-15.7	-15.6	-15.4	-19.8	-21.8	-19.8	-18.9
CS9	-60.0	-58.0	-55.9	-54.9	-71.5	-70.2	-59.6	-59.0

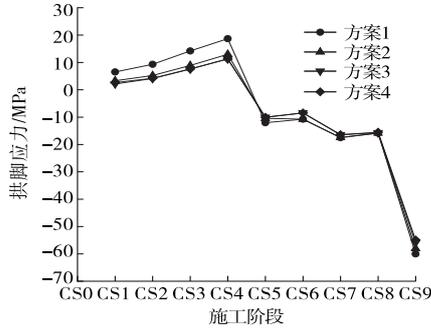


图5 施工阶段拱脚上弦杆应力变化

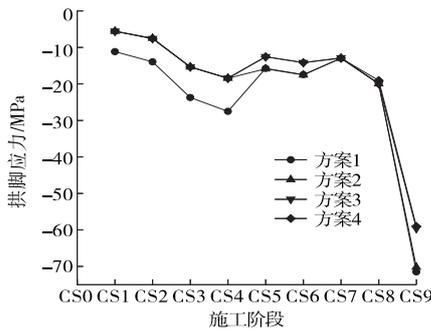


图6 施工阶段拱脚下弦杆应力变化

-59.6、-59.0 MPa。方案3和方案4是较理想的封铰方案。

### 3.3 吊装过程拱肋变形分析

钢管砼拱桥拱肋吊装中,可通过扣索的张拉改变拱肋安装线形,不同封铰时机导致后续施工节段对已施工拱肋的影响程度有一定差异,对吊装过程中拱肋线形控制有较大影响。图7为缆索吊装拱肋前端点分析模型,表7、图8~10为4种封铰方案下主拱肋各吊装节段最大悬臂前端点的累计变形。



图7 吊装节段最大悬臂前端点分析模型

表7 吊装拱肋第一节段前端点变形

mm

施工阶段	各封铰方案下第一节段前端点变形				各封铰方案下第二节段前端点变形				各封铰方案下第三节段前端点变形			
	方案1	方案2	方案3	方案4	方案1	方案2	方案3	方案4	方案1	方案2	方案3	方案4
CS1	1.07	0.95	0.95	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS2	-0.13	-0.21	-0.27	-0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS3	-4.92	-15.90	-13.10	-15.10	6.50	7.64	6.84	7.84	0.00	0.00	0.00	0.00
CS4	-7.93	-19.14	-17.14	-18.14	-0.87	-0.22	-1.22	1.22	0.00	0.00	0.00	0.00
CS5	1.28	-10.24	-12.34	-11.19	7.88	8.48	8.19	7.46	15.64	17.80	10.61	13.61
CS6	-0.89	-9.02	-14.97	-10.97	4.55	4.11	3.48	4.08	3.20	5.15	-4.17	-5.17
CS7	2.52	-20.19	-19.47	-12.47	-14.22	-10.48	-8.61	-16.44	-8.92	-14.88	-12.51	-14.83
CS8	-1.07	-25.20	-21.13	-20.15	-20.43	-16.97	-18.93	-23.94	-31.49	-27.46	-30.42	-32.45
CS9	-6.20	-29.25	-25.27	-24.28	-41.29	-39.25	-33.28	-43.11	-64.64	-68.68	-63.71	-73.69

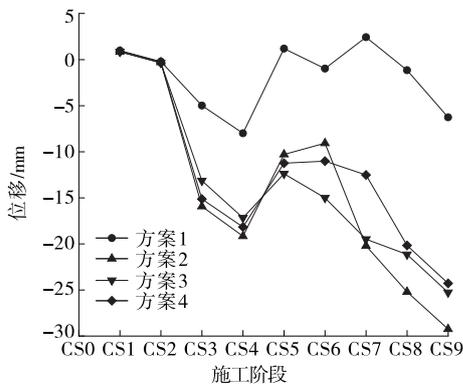


图8 吊装拱肋第一节段前端点变形

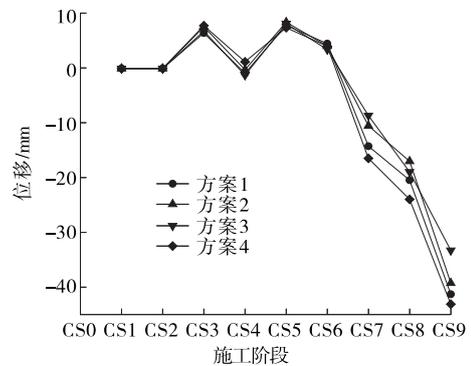


图9 吊装拱肋第二节段前端点变形

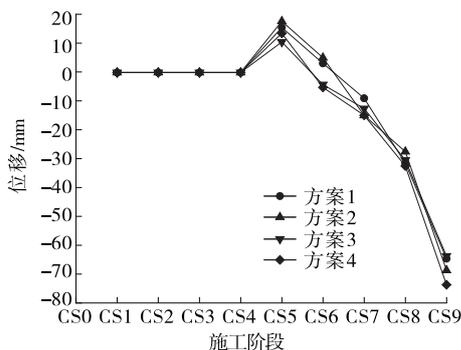


图 10 吊装拱肋第三节段前端点变形

由表 7、图 8~10 可知:方案 1 下吊装拱肋第一节段前端点的竖向位移最小,方案 2 下的最大;方案 3 下吊装拱肋第二节段前端点的竖向位移最小,方案 4 下的最大;方案 3 下吊装拱肋第三节段前端点的竖向位移最小,方案 4 下的最大。拱肋吊装过程中第三节段的变形最大,故主要考虑第三节段变形,其次考虑第二节段变形,最后考虑第一节段变形,保证施工过程中第三阶段位移最小。钢管砼拱桥以控制线形为主,在应力满足的情况下,要求变形的理想状态为最优。方案 3 下变形更理想,按该方案封铰的施工效果最好。

### 4 结语

以唐家河钢管砼拱桥为工程背景,针对缆索吊装过程中封铰时机对桥梁结构的影响,通过有限元

软件进行施工过程正装模拟分析,对比步骤 CS1 吊装两岸第一节段封铰、步骤 CS5 吊装两岸第三节段封铰、步骤 CS8 扣索释放后灌注砼之前封铰、步骤 CS9 灌注砼后封铰 4 种拱脚封铰方案下拱脚附近上下弦杆应力及各吊装拱肋最大悬臂前端的累计变形,得步骤 CS8 扣索释放后灌注砼之前封铰方案下应力及变形比其他方案更合理,按该方案封铰的施工效果最好。

### 参考文献:

- [1] JTG D56-06-2015,公路钢管混凝土拱桥设计规范[S].
- [2] 刘中原.大跨度钢管混凝土拱桥无支架缆索吊装施工受力计算分析[D].长沙:长沙理工大学,2017.
- [3] 四川公路桥梁建设集团有限公司,四川路桥建设股份有限公司.公路桥梁施工系列手册:拱桥[M].北京:人民交通出版社,2000.
- [4] 陈宝春.拱桥技术的回顾与展望[J].福州大学学报:自然科学版,2009,37(1).
- [5] 牟开.拱脚封铰时机对缆索吊装施工拱桥的受力影响分析[J].山西交通科技,2017(1).
- [6] 王小成.大跨度钢管混凝土拱桥拱肋吊装施工过程空间仿真计算[D].武汉:武汉理工大学,2006.
- [7] 王勃.大跨经拱桥缆索吊装施工系统仿真分析[D].西安:长安大学,2012.

收稿日期:2019-01-15

\*\*\*\*\*  
(上接第 109 页)

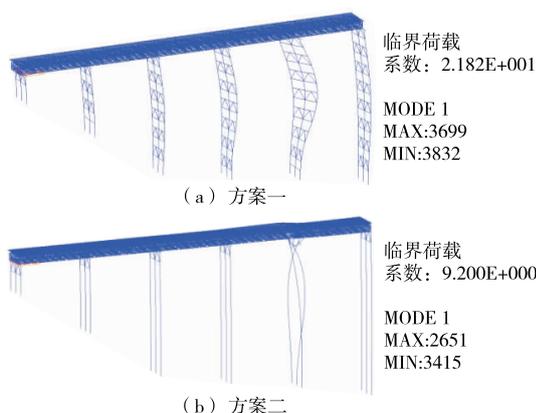


图 10 结构改善后洪水作用下栈桥弹性屈曲模式

键构造。如施工期间洪水有淹没栈桥的风险,应在贝雷梁间加设平纵联。

(3) 为改善钢管立柱的受力,提高结构的稳定性,可采取增强立柱间横向联系、在立柱内灌注砼、

加大立柱直径等措施,其中增强立柱间横向联系的作用最显著。

### 参考文献:

- [1] 凌鹏飞.洪水期高栈桥抗倾覆研究[J].西部交通科技,2018(1).
- [2] 冯燕平,鲍军岗,杨辉.洪水期钢栈桥横向稳定性分析[J].西部交通科技,2012(6).
- [3] 陈强,林玉明.跨海特大桥栈桥设计与施工技术研究[J].铁道建筑技术,2018(2).
- [4] JGJ 300-2013,建筑施工临时支撑结构技术规范[S].
- [5] 黄绍金,刘陌生.装配式公路钢桥多用途使用手册[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [6] JTG D60-2015,公路桥涵设计通用规范[S].
- [7] JT8 144-1-2010,港口工程荷载规范[S].

收稿日期:2019-01-15