

# 基于悬拼钢拱架法的钢筋混凝土拱桥主拱圈现浇 施工关键技术及数值模拟

栗学平<sup>1</sup>,夏争志<sup>2</sup>,吕松刚<sup>3</sup>,段朋杰<sup>1</sup>,吕毅刚<sup>4</sup>

(1.中交广州航道局有限公司,广东 广州 510290;2.中交疏浚(集团)股份有限公司,北京市 100120;3.湖南省邵阳县公路建设养护中心,湖南 邵阳 422100;4.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**钢拱架代替落地支架或节段悬臂拼装等施工方法,应用于山区跨越深水峡谷的拱圈现浇具有一定的优势,值得推广应用。该文通过介绍三岔河大桥钢拱架悬臂扣索法拼装、拱架水箱法预压和主拱圈分环分层浇筑等关键施工技术,有效地解决了跨越深水峡谷桥梁施工过程中的常见难题,并基于Midas Civil有限元方法整体建模,对其采用的关键施工技术进行了数值模拟分析,指导并监控了该桥的施工建设,可为类似工程施工及受力计算分析提供借鉴。

**关键词:**钢筋混凝土拱桥;钢拱架;主拱圈;关键技术;数值模拟

中图分类号:U445.469

文献标志码:A

## Key Technology and Numerical Simulation of Cast-in-Place Construction of Main Arch Ring of Reinforced Concrete Arch Bridge Based on Suspension Steel Arch Method

SU Xueping<sup>1</sup>, XIA Zhengzhi<sup>2</sup>, LYU Songgang<sup>3</sup>, DUAN Pengjie<sup>1</sup>, LYU Yigang<sup>4</sup>

(1.CCCC Guangzhou Waterway Bureau Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510290, China; 2.CCCC Dredging (Group) Co., Ltd., Beijing 100120, China; 3.Highway Construction and Maintenance Center of Shaoyang County, Shaoyang, Hunan 422100, China; 4.School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

**Abstract:** Steel arch frame replaced such construction methods as floor bracket or segment cantilever assembly and it was applied to arch circle cast-in-place across deep water canyons in mountainous areas, which had certain advantages and was worth promoting and applying. By introducing the key construction technologies of Sanchahe Bridge, including steel arch frame cantilever fastener method assembly, arch water tank method precompression, and main arch ring layered pouring, the common problems in the construction process of crossing the deep water canyon were solved effectively. Based on Midas Civil overall modeling of finite elements, the key construction technologies adopted by the bridge were numerically simulated and analyzed, and the successful construction of the bridge was guided and monitored, aiming to provide a reference for similar engineering construction and force calculation and analysis.

**Keywords:** reinforced concrete arch bridge; steel arch frame; main arch ring; key technology; numerical simulation

## 0 引言

大跨径钢筋混凝土拱桥是跨越山区深水峡谷最适宜且经济合理的桥型之一,受地形、场地、设备条

件等限制,一般主拱圈采用缆索节段预制拼装、落地支架现浇等施工技术。缆索节段拼装受缆索吊机承载能力限制,一般采用小吨位节段,这就导致节段过多、拼装时间增加和接缝增多、薄弱处出现质量通病

收稿日期:2023-12-28(修改稿)

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(编号:2022JJ30600)

作者简介:栗学平,男,高级工程师.E-mail:21898811@qq.com

增多、高空作业时间增长、安全风险加高、工期增加等一系列问题。落地现浇支架则可能因受峡谷水深风大等影响会出现高度高、用料量大和受压稳定性差等问题,若跨越通航、泄洪河道则有可能存在影响通航或泄洪等问题。悬拼钢结构拱架(简称钢拱架)能有效地利用陡峻的V形深谷地形抵抗拱架水平力<sup>[1-4]</sup>,其跨越能力强、用料省,且因悬空不需落地不阻碍泄洪、漂流物及通航,在作为大跨径钢筋混凝土拱桥主拱圈现浇施工的支架中具有较大的优势。

部分学者对钢筋混凝土拱桥主拱圈现浇施工进行了数值模拟,汪德旺<sup>[5]</sup>采用施工荷载一次性加载模拟计算了现浇支架的受力情况;湛呈<sup>[6]</sup>运用未知荷载系数法优化索力,进行钢筋混凝土拱桥主拱圈截面应力控制计算;张基进等<sup>[7]</sup>考虑扣锚索几何非线性影响分析,计算钢筋混凝土拱桥主拱圈内力;吴月星

等<sup>[8]</sup>创新研究出扣索扣挂自平衡张拉、塔偏实时监测施工技术。以上成果未涉及悬拼钢拱架法施工技术和系统完整模拟计算分析,本文结合三岔河大桥工程实例,介绍基于悬拼钢拱架法的钢筋混凝土拱桥主拱圈现浇关键施工技术,并利用Midas Civil有限元软件整体建模<sup>[9]</sup>,数值模拟分析钢拱架悬臂扣索法拼装<sup>[10-15]</sup>、水箱法预压和主拱圈分环分层浇筑<sup>[16-17]</sup>等关键施工工艺,可为类似工程施工提供借鉴。

## 1 工程概况

新建三岔河大桥为一座主跨净跨125 m的等截面悬链线钢筋混凝土箱形无铰拱桥,主拱圈为单箱三室截面拱箱,截面高度为2.2 m,宽度为10.05 m,主拱圈共设置27道横隔板,拱上布置13孔10 m预应力混凝土装配式空心板。具体布置如图1所示。

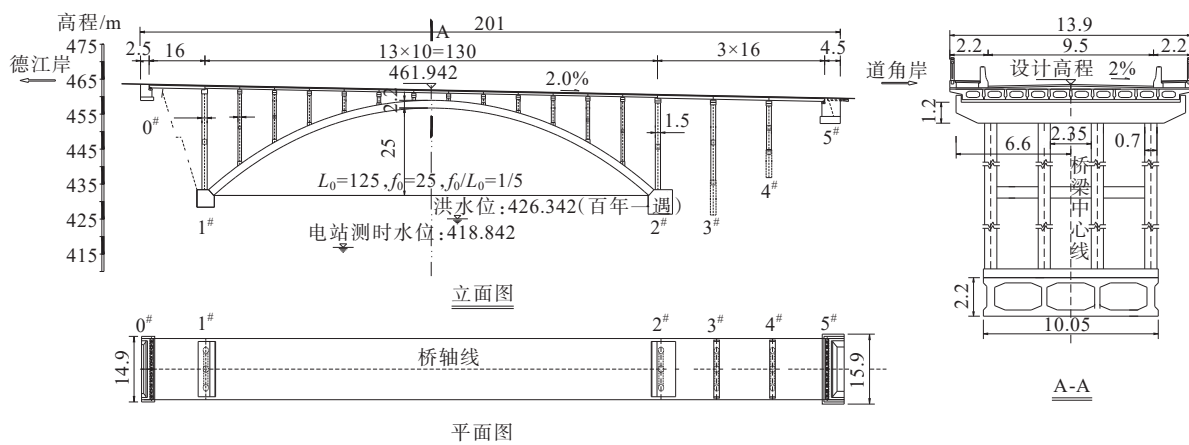


图1 桥型布置图(单位:m)

Figure 1 Bridge layout(unit:m)

## 2 基于悬拼钢拱架法的主拱圈现浇施工关键技术

### 2.1 工艺流程

主拱圈采用在其下悬拼装好的钢拱架作为支架立模现浇,具体方法为:浇筑临时拱座<sup>[18]</sup>,拼装缆索吊机,利用缆索吊悬拼扣索法拼装钢拱架节段,在拼装好的钢拱架上搭设调平支架、预压、安装模板、绑扎钢筋和分环分段现浇拱圈混凝土等一系列工作,主拱圈施工工艺流程如图2所示。

### 2.2 钢拱架拼装

#### 2.2.1 钢拱架结构

每片拱架是由型钢焊接制作成的6片桁架片,通

过顶面、底面和横向平联结栓接而成,拱架结构材料的特性参数见表1。钢拱架沿弧向共用2联拱脚节段、20联标准节段和1联拱顶合龙段现场拼装成拱,节段间下弦通过销轴连接,上弦采用调节块连接。如图3、4所示。

#### 2.2.2 拱架拼装

利用缆索吊扣挂法按照同步从两岸拱脚分节段逐步依次向拱顶推进的施工顺序进行悬拼安装,最后安装合龙段。缆索吊装系统施工跨径布置为(34+162.62+34)m,主要是用作钢拱架节段拼装和后续上部结构空心板安装;主缆选用 $\phi 52(6 \times 37)$ 为一组的钢丝绳,左右各一组,扣索采用 $\phi 26(6 \times 37)$ 普通钢丝绳,如图5所示。每节段由缆索吊装到位并与

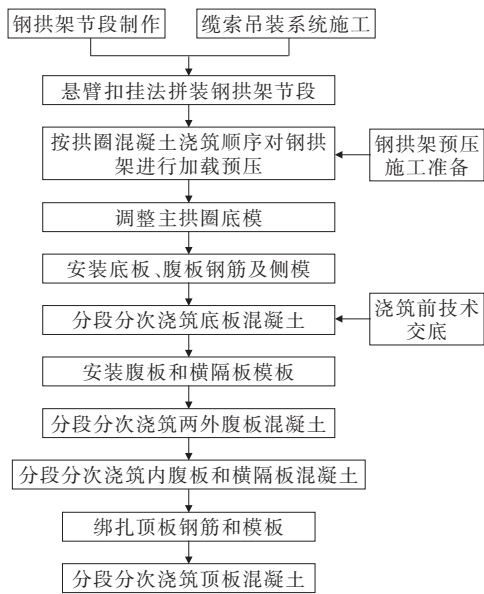


图2 主拱圈施工工艺流程  
Figure 2 Construction process of main arch ring

表1 拱架桁架片结构材料的特性参数  
Table 1 Characteristic parameters of structural materials of arch truss sheets

| 序号 | 型钢名称     | 截面面积/cm <sup>2</sup> | 截面矩W/cm <sup>3</sup> | 惯性矩J/cm <sup>4</sup> | 部位  |
|----|----------|----------------------|----------------------|----------------------|-----|
| 1  | ∠56×56×5 | 5.40                 | 3.9                  | 6.6                  | 斜杆  |
| 2  | ∠75×50×5 | 6.12                 | 3.3                  | 7.4                  | 联杆  |
| 3  | 2[8      | 20.40                | 50/44                | 200/190              | 主腹杆 |
| 4  | 2[25c    | 89.00                | 590/71               | 7 390/436            | 弦杆  |

前一段连接好后,扣上扣索,通过调整扣索长度以调整节段端头标高和拱架轴线,使其达到预抬标高,如图6、7所示。

2.3 钢拱架预压

本桥跨越三岔河,取水方便,预压采用水箱预压,最大预压重量按底板重量的120%选取,如图8、9

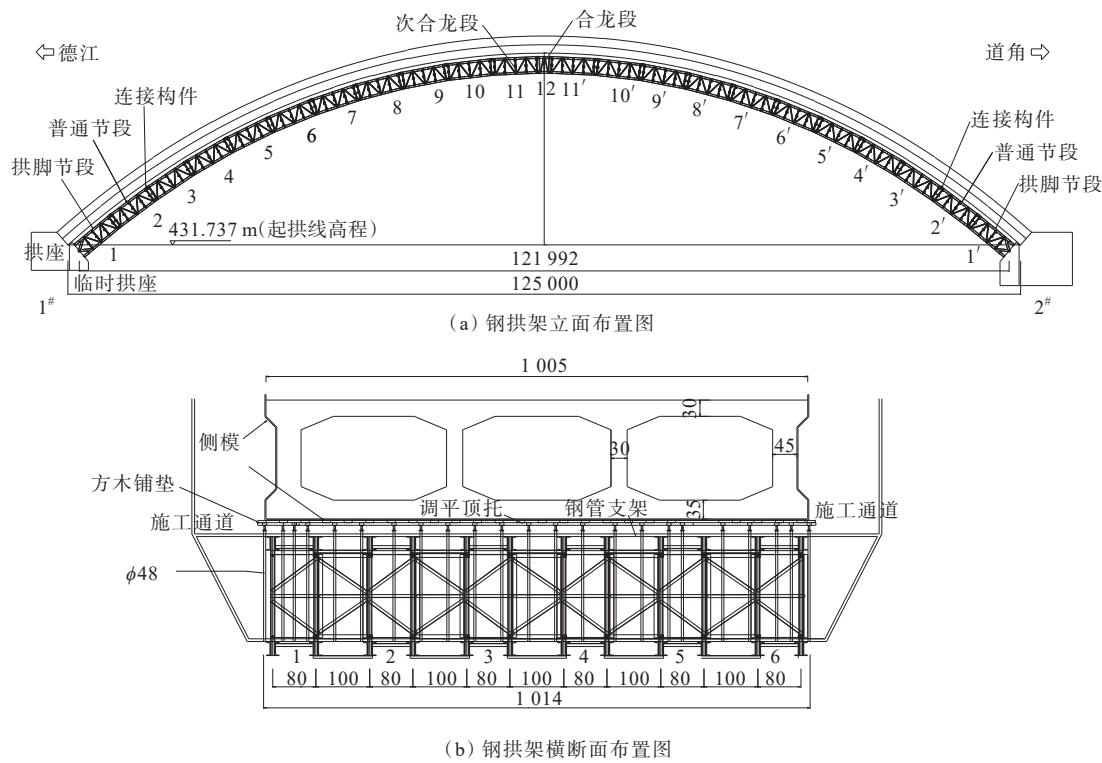


图3 拱架布置图(单位:cm)  
Figure 3 Arch layout(unit: cm)

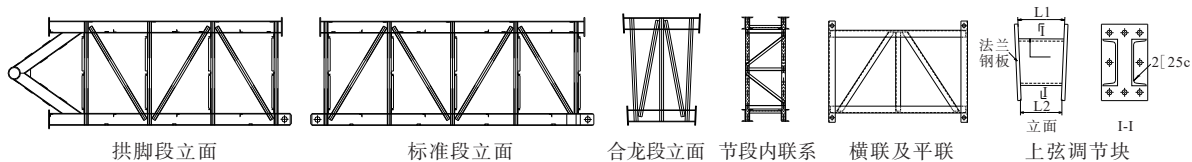


图4 拱架节段基本结构形式  
Figure 4 Basic structural form of arch frame segment

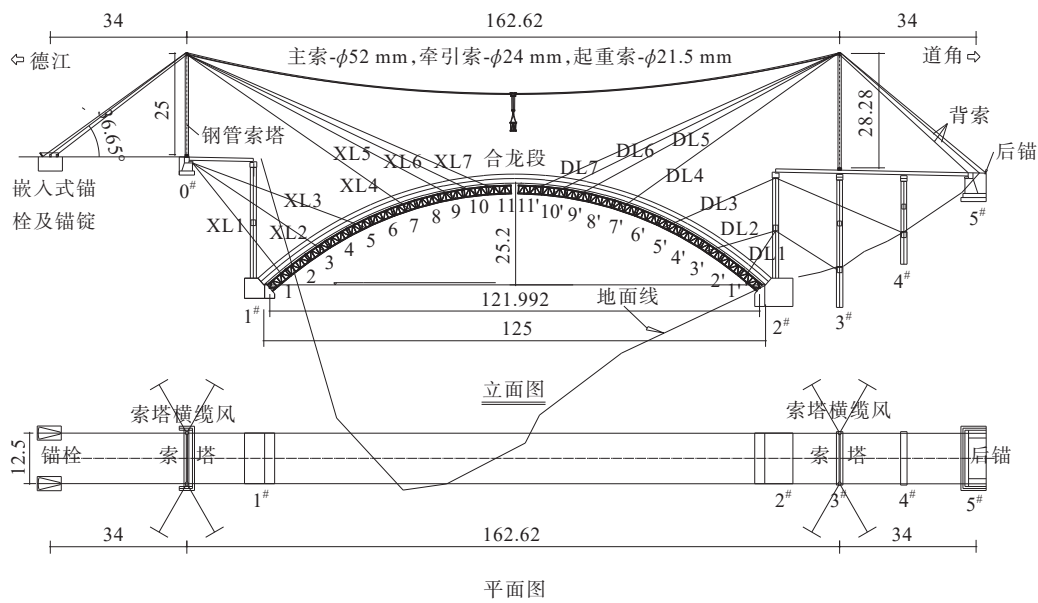


图5 缆索吊及扣挂系统布置图(单位:m)

**Figure 5** Layout of cable lifting and buckle system(unit: m)

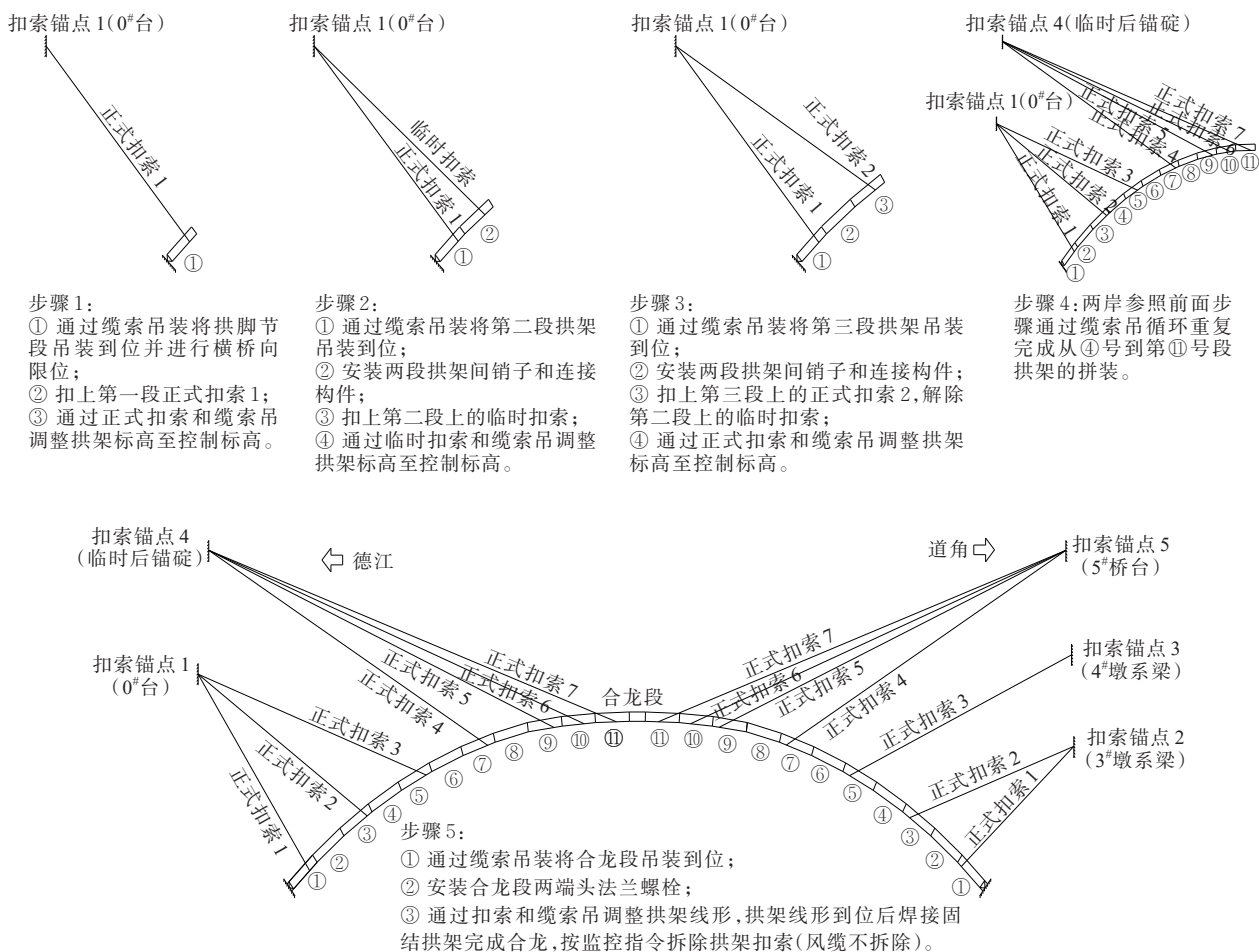


图6 拱架拼装过程示意图

**Figure 6** Schematic diagram of arch assembly process





图7 拱架节段拼装过程

Figure 7 Assembly process of arch frame segments



图8 钢拱架水箱预压加载

Figure 8 Preloading of steel arch water tank



图9 钢拱架水箱预压卸载

Figure 9 Pre-pressure unloading of steel arch frame water tank

所示。其步骤如下:

步骤1:在拼好验收后的拱架上立模并搭设水箱,布置监控测试点和监测仪器元件。

步骤2:按照第一环混凝土分段浇筑顺序对称逐个一次性加水至底板重量100%荷载,加载完观测其稳定后进行监控量测。

步骤3:按照第一环混凝土分段浇筑顺序对称逐个一次性加水由底板重量100%荷载至120%,加载完观测其稳定后进行监控量测。

步骤4:按加水顺序对称的逆序对水箱逐个全部放水,观测其稳定后进行监控量测。

步骤5:通过对监控量测数据并结合数值模拟计算分析,计算出底模立模标高、各施工阶段拱架关键点位移、应力应变预警值来控制施工。

## 2.4 主拱圈混凝土浇筑

拱圈混凝土浇筑采用纵向分底板环、腹板环及顶板环三环,每一环再分成七段,如图10所示。

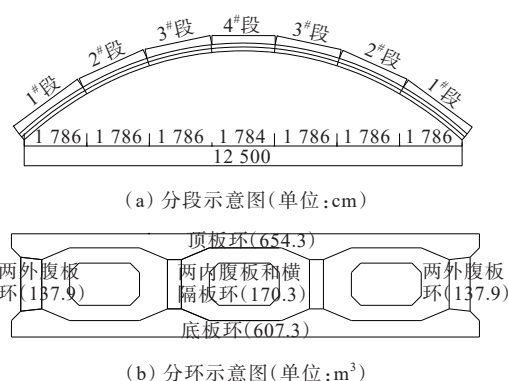


图10 主拱圈分环分段示意图

Figure 10 Schematic diagram of main arch ring segments

拱圈混凝土浇筑要严格遵循纵横对称值、均衡的原则,必须保证两岸同时对称浇筑,方量相差值控制在5 m<sup>3</sup>以内。先对称浇筑完拱脚段(1<sup>#</sup>段),再浇筑完次拱顶段(3<sup>#</sup>段),随后浇筑完次拱脚段(2<sup>#</sup>段),最后浇筑拱顶段(4<sup>#</sup>段)。每一环合龙达到100%的设计强度后,再进行下一环施工。其中腹板环分2个小环浇筑——先同时对称浇筑两外侧腹板环,待外侧腹板环混凝土达到设计要求后进行两内侧腹板和横隔板环施工。

## 3 数值模拟

钢拱架悬拼、预压和主拱圈混凝土浇筑均采用大型有限元软件Midas Civil建模进行数值模拟,钢拱架和主拱圈采用梁单元模拟实体结构建立。扣索为只受拉索单元,以实际位置建立模型,下端采用弹性连接拱架单元,两结点之间为一单元。拱架单元之间为刚结,扣索单元与拱架单元之间为铰接,预压水箱按分段均布荷载作用,主拱圈按纯混凝土实体建

模,与拱架之间只传递压力和协同变形,拱脚及锚点处均根据实际情况约束自由度。在计算过程中考虑大变形和应力重分布,另温度效应<sup>[19-20]</sup>单独计算。

### 3.1 悬拼扣挂钢拱架

#### 3.1.1 工况分析和计算模型

依据拱架悬拼顺序和受力分析,把每个节段拼装作为一个计算工况,共计12个工况,结构计算模型见图11,以下给出钢拱架最后两个吊装工况结果和所有工况计算结果最大值。

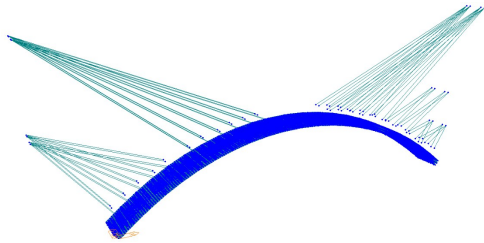


图11 钢拱架拼装结构计算模型

Figure 11 Calculation model of steel arch frame assembly structure

#### 3.1.2 数值模拟输出

(1) 工况11:拼装完成钢拱架⑩号、⑪号段(次合龙段),其计算组合应力、整体变形和扣索索力见图12~14。

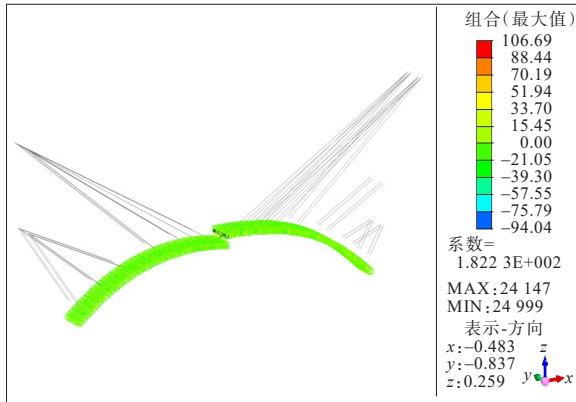


图12 拱架组合应力(单位:MPa)

Figure 12 Combined stress of arch frame(unit:MPa)

拱架的最大组合应力为106.69 MPa,最大竖向位移为44.52 mm,单根扣索最大拉力76.8 kN。

(2) 工况12:拼装完成钢拱架⑫段(合龙段),其计算组合应力、整体变形和扣索索力见图15~17。

拱架的最大组合应力为39.43 MPa,最大竖向位移为13.27 mm,单根扣索最大拉力16.8 kN。

(3) 拼装过程所有工况计算结果最大值见表2。

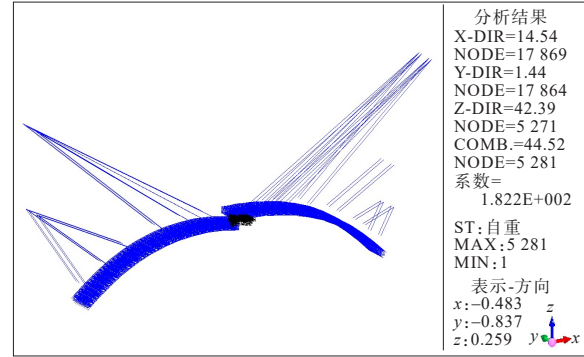


图13 拱架整体位移(单位:mm)

Figure 13 Overall displacement of arch frame(unit:mm)

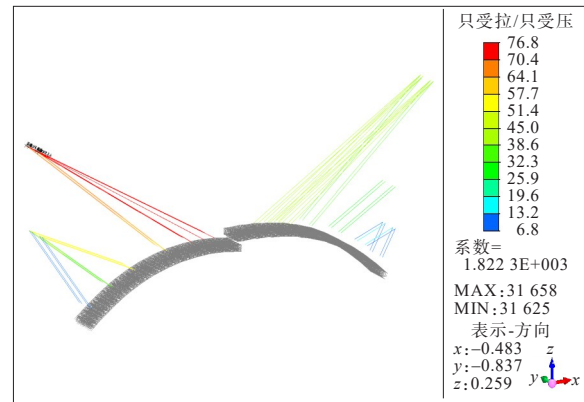


图14 扣索钢丝绳拉力(单位:kN)

Figure 14 Tension of fastener wire rope(unit:kN)

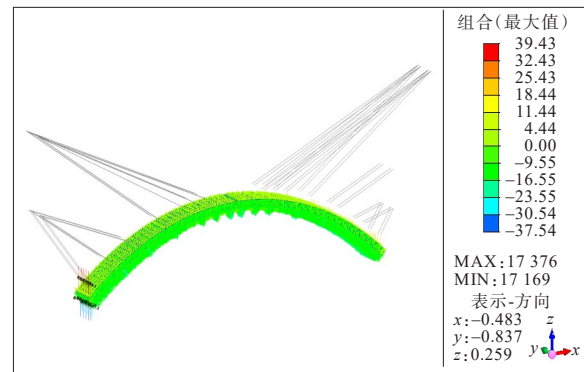


图15 拱架组合应力(单位:MPa)

Figure 15 Combined stress of arch frame(unit:MPa)

#### 3.1.3 数值模拟分析

通过对数值模拟结果分析发现:

(1) 在不同施工阶段,对于同一组扣索索力、拱架杆件的应力和位移也会随之发生变化。为使钢拱架快速合龙降低安全风险和合龙时拱轴线与设计相吻合,建议在钢拱架拼装过程中调整拱轴线尽量接近

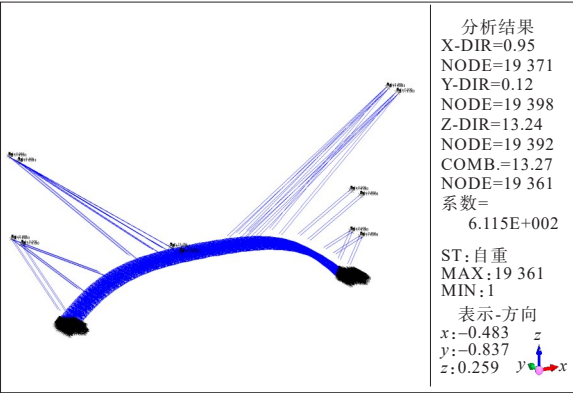


图 16 拱架整体位移(单位:mm)

Figure 16 Overall displacement of arch frame(unit:mm)

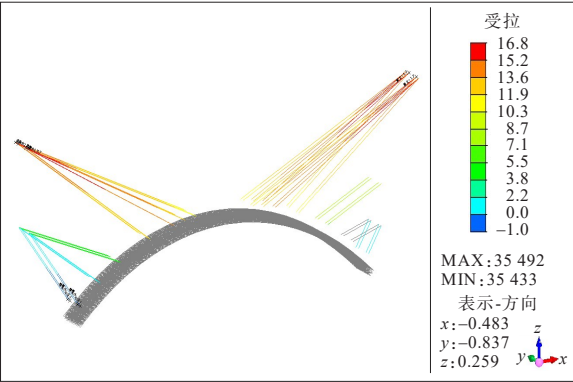


图 17 扣索钢丝绳拉力(单位:kN)

Figure 17 Tension of fastener wire rope(unit:kN)

合龙时设计拱轴线,调整以拱上扣锚点标高为主,扣索索力为辅。

(2) 整个拼装过程中钢拱架的最大组合应力和竖向位移均出现在拼装第⑩号节段,即最大悬臂阶段;其值分别为  $106.7\text{ MPa}<200\text{ MPa}$ 、 $44.5\text{ mm}<125\,000/400=312.5\text{ mm}$ ,强度和刚度均满足要求;单根钢丝绳最大扣索拉力出现在拼装第⑨号节段道角岸第5组扣索上,其值为  $95.1\text{ kN}<T_{\text{破}}/3=350\text{ kN}/3=116.7\text{ kN}$ ,满足要求。

3.2 分段浇筑主拱圈混凝土

3.2.1 工况分析和计算模型

通过对主拱圈施工过程受力分析,分为拱架预压、底板浇筑、两外腹板浇筑、内腹板及横隔板浇筑、顶板浇筑5个工况,为比较分析和验证已浇达到强度的混凝土是否参与受力且协同拱架变形情况,特增加两内腹板浇筑时底板和两外腹板不参与受力计算的工况,结构计算模型见图18。以下给出主拱圈施工计算比对工况4和5、最不利工况6的应力和变形云图及所有工况计算结果最大值。

3.2.2 数值模拟输出

(1) 工况4:两内腹板浇筑,底板和两外腹板参与受力,采用施工阶段联合截面建立模型,底板、外腹板混凝土和钢拱架协同变形联合受力模拟浇筑整个过程。其计算组合应力和整体变形见图19、20。

由图19、20可知:拱架的最大组合应力为  $115.03\text{ MPa}$ ,最大竖向位移为  $67.9\text{ mm}$ 。

(2) 工况5:两内腹板浇筑,底板和外腹板不参与

表 2 拱架拼装计算结果汇总

Table 2 Arch assembly calculation results

| 节段    | 拼装过程一组和单根扣索索力最大值/kN |         |         |         |         |         |         |        | 拱架最大组合应力/MPa | 拱架最大竖向位移/mm |
|-------|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------------|-------------|
|       | XL1/DL1             | XL2/DL2 | XL3/DL3 | XL4/DL4 | XL5/DL5 | XL6/DL6 | XL7/DL7 | 单根     |              |             |
| ①     | 100/100             |         |         |         |         |         |         | 26/27  | 56.9         | 5.8         |
| ②     | 31/32               | 72/76   |         |         |         |         |         | 193/20 | 36.2         | 1.8         |
| ③     | 80/132              | 240/272 |         |         |         |         |         | 62/70  | 104.5        | 12.4        |
| ④     | 64/124              | 180/240 | 216/182 |         |         |         |         | 56/62  | 85.5         | 11.5        |
| ⑤     | 28/64               | 172/248 | 244/248 |         |         |         |         | 62/64  | 83.6         | 16.3        |
| ⑥     | 28/60               | 160/244 | 220/272 | 200/152 |         |         |         | 55/69  | 83.4         | 17.3        |
| ⑦     | 28/60               | 180/280 | 280/352 | 300/268 |         |         |         | 75/89  | 102.2        | 26.8        |
| ⑧     | 24/56               | 164/244 | 244/320 | 252/224 | 272/244 |         |         | 68/81  | 92.6         | 25.3        |
| ⑨     | 24/48               | 164/236 | 284/364 | 340/300 | 368/352 |         |         | 951/92 | 104.7        | 42.1        |
| ⑩     | 20/40               | 140/204 | 244/324 | 300/292 | 336/320 | 336/324 |         | 84/82  | 91.3         | 43.2        |
| ⑪     | 48/32               | 156/60  | 216/128 | 260/132 | 292/164 | 300/168 | 300/164 | 77/42  | 106.7        | 44.5        |
| ⑫(合龙) | 4/4                 | 4/4     | 16/28   | 44/44   | 52/52   | 66/67   | 44/44   | 17/17  | 39.4         | 13.3        |

注:斜线上为德江岸数据,斜线下为道角岸数据。



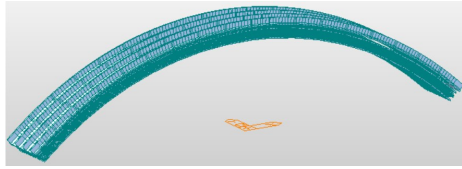


图 18 分段浇筑主拱圈混凝土结构计算模型

Figure 18 Calculation model of concrete structure of segmented poured main arch ring

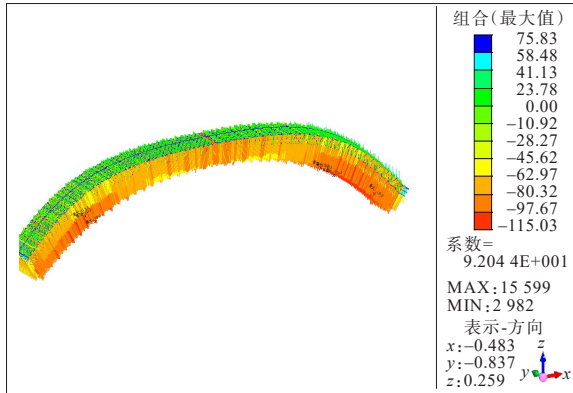


图 19 拱架组合应力(单位:MPa)

Figure 19 Combined stress of arch frame(unit: MPa)

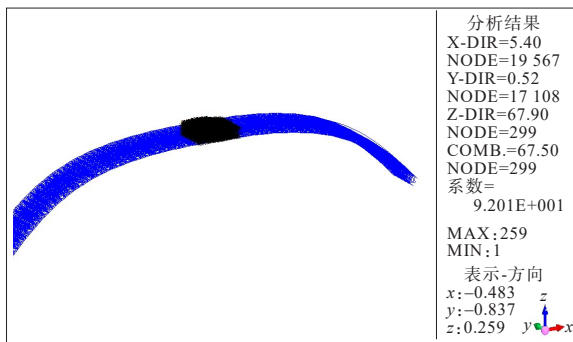


图 20 拱架整体位移(单位:mm)

Figure 20 Overall displacement of arch frame(unit: mm)

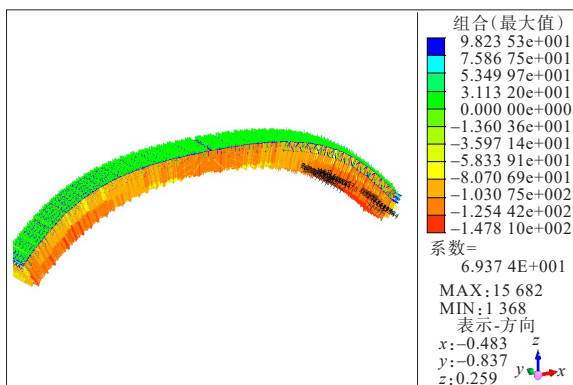


图 21 拱架组合应力(单位:MPa)

Figure 21 Combined stress of arch frame(unit:MPa)

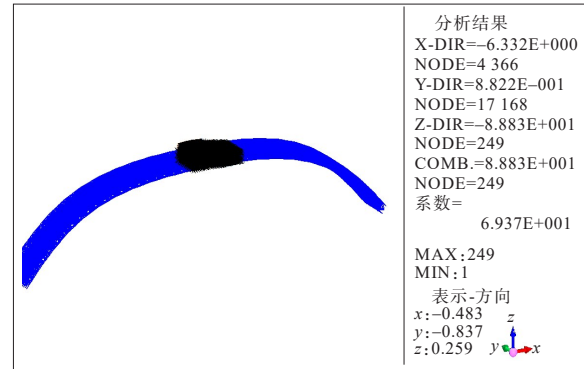


图 22 拱架整体位移(单位:mm)

Figure 22 Overall displacement of arch frame(unit:mm)

受力,其计算组合应力和整体变形见图 21、22。

由图 21、22 可知:拱架的最大组合应力为 147.81 MPa,最大竖向位移为 88.83 mm。

(3) 工况 6:顶板浇筑,底板和腹板开口箱参与受力,采用施工阶段联合截面建立模型,底板、腹板混凝土和钢拱架协同变形联合受力模拟浇筑完整过程。其计算组合应力和整体变形见图 23、24。

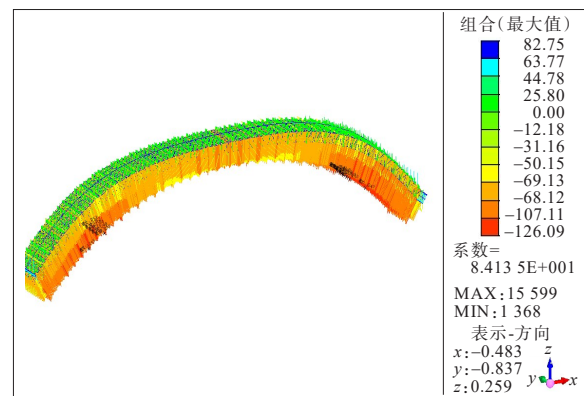


图 23 拱架组合应力(单位:MPa)

Figure 23 Combined stress of arch frame(unit:MPa)

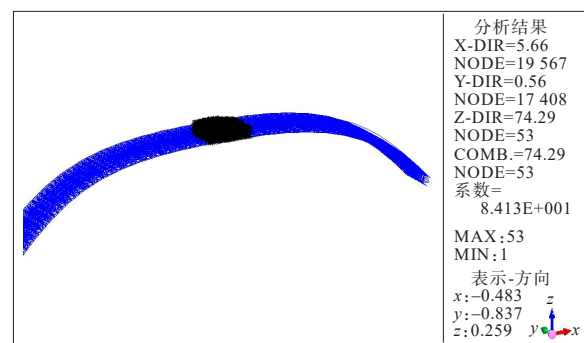


图 24 拱架整体位移(单位:mm)

Figure 24 Overall displacement of arch frame(unit:mm)



由图 23、24 可知:拱架的最大组合应力为 126.09 MPa,最大竖向位移为 74.29 mm。

(4) 各工况最大组合应力和竖向变形见表 3。

由表 3 可知:各工况最大组合应力(147.81 MPa)

小于允许应力值 200 MPa,最大竖向位移(88.8 mm)小于允许值  $125\ 000/400=312.5\text{ mm}$ ,强度和刚度均满足要求。

表 3 拱架主拱圈施工各工况最大组合应力和竖向变形计算结果汇总

Table 3 Calculation results of maximum combined stress and vertical deformation under each working condition of arch frame and main arch ring construction

| 工况 | 工况名称               | 最大组合应力/MPa | 最大竖向位移/mm | 备注        |
|----|--------------------|------------|-----------|-----------|
| 1  | 拱架预压               | 123.68     | 74.4      | 120% 底板自重 |
| 2  | 底板浇筑               | 111.69     | 64.2      |           |
| 3  | 两外腹板浇筑,底板参与受力      | 113.15     | 66.2      |           |
| 4  | 两内腹板浇筑,底板和外腹板参与受力  | 115.03     | 67.9      | 计算对比,为监控  |
| 5  | 两内腹板浇筑,底板和外腹板不参与受力 | 147.81     | 88.8      | 提供理论数据    |
| 6  | 顶板浇筑,底板和腹板开口箱参与受力  | 126.09     | 74.3      |           |

3.2.3 数值模拟分析

通过监控量测数据和数值模拟结果对比分析,可知:

- (1) 各工况监测量测数据与混凝土参与受力模拟计算结果基本吻合,均在规范和设计允许范围内。
- (2) 两内腹板浇注施工的“底板和两外腹板参与受力”监控数据最大应力和最大竖向位移值分别为 114.9 MPa、67.7 mm,跟数值模拟计算结果 115.03 MPa、67.9 mm 较吻合;远远小于“底板和两外腹板不参与受力”数值模拟计算结果 147.81 MPa、88.83 mm。

(3) 底板浇筑时监控数据最大应力和最大竖向位移值分别为 111.4 MPa、63.7 mm,与模拟计算结果 111.69 MPa、64.2 mm 基本一致;顶板浇筑时监控数据最大应力和最大竖向位移值分别为 125.7 MPa、73.6 mm,跟模拟计算结果 126.09 MPa、74.29 mm 也基本一致。

4 结论

在三岔河大桥主拱圈施工过程中,利用监控量测数据,提取对应阶段临时结构(扣索、钢拱架等)和主拱圈基于有限元 Midas Civil 数值模拟分析出的受力、变形结果,与之比对、分析验证,并采取措施不断进行修正模拟计算、分析和优化施工工艺,指导和监控现场施工,有效解决了施工难题,保证了施工质量和安全,节省了施工成本,值得进一步推广与研究,得出的主要结论及相关建议如下:

- (1) 扣挂法悬拼钢拱架、定制钢拱架作为现浇主拱圈混凝土支架、水箱法预压、分环分段浇筑混凝土等关键施工技术顺利成功实施,监测结果验证了数值模拟计算分析的正确性和精确性,可为类似工程施工及受力计算分析提供借鉴。
- (2) 在悬拼钢拱架不同施工阶段,对于同一组(根)扣索索力、钢拱架杆件的应力和位移都会发生变化,因此拼装每一节段拱架时要监控和比对模拟计算中扣索、钢拱架杆件、特征值和极值,确保扣索索力、钢拱架杆件的应力和位移在预警值范围内。
- (3) 施工过程中的各特征值、极值的监控数据与主拱圈采用联合截面协同变形整体建模进行动态数值模拟计算结果基本一致,其值均满足规范要求和在允许值之内,更好地指导和监控了现场施工。
- (4) 模拟计算要不断根据施工工艺、日照、温度、材料力学参数、混凝土浇筑重量偏差等实际情况进行修正,计算结果才能准确地指导和监控施工,保证施工质量和安全。建议已浇筑完且达到一定强度的主拱圈混凝土要纳入参与受力,可考虑作为安全储备提高施工安全系数。

参考文献:

References:

[1] 万景刚. 钢拱支架在拱桥施工中的应用与研究[D]. 贵阳: 贵州大学,2009.

WAN Jinggang. Application and research of steel arch

- support in arch bridge construction[D]. Guiyang: Guizhou University, 2009.
- [2] 秦绪勇, 石珂, 崔巧林, 等. 钢筋混凝土拱桥外置钢拱架的施工控制[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(6): 228-230.
- QIN Xuyong, SHI Ke, CUI Qiaolin, et al. Construction control of outside the steel arch centre of RC arch bridge[J]. Sichuan Building Science, 2008, 34(6): 228-230.
- [3] 高忠虎, 吴忠铁, 狄生奎, 等. 考虑行波效应下钢管混凝土系杆拱桥隔震研究[J]. 中外公路, 2023, 43(5): 84-90.
- GAO Zhonghu, WU Zhongtie, DI Shengkui, et al. Study on seismic isolation of concrete filled steel tubular tied arch bridge considering traveling wave effect[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(5): 84-90.
- [4] 张远传, 苏成, 王勇辉, 等. 大跨度钢拱桥多指标综合预警体系研究[J]. 中外公路, 2023, 43(6): 120-126.
- ZHANG Yuanchuan, SU Cheng, WANG Yonghui, et al. Research on comprehensive early warning system with multi-indicators for long-span steel arch bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(6): 120-126.
- [5] 汪德旺. 大跨度钢管混凝土拱桥支架法施工仿真分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2021, 38(6): 104-108.
- WANG Dewang. Simulation analysis on construction of long-span concrete-filled steel tube arch bridge with bracket method[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2021, 38(6): 104-108.
- [6] 湛呈. 大跨径钢筋混凝土拱桥拱肋斜拉扣挂施工扣索索力计算与优化[J]. 湖南交通科技, 2022, 48(1): 84-88, 99.
- CHEN Cheng. Calculation and optimization of cable tension of arch rib in long-span reinforced concrete arch bridge with oblique tension and hanging[J]. Hunan Communication Science and Technology, 2022, 48(1): 84-88, 99.
- [7] 张基进, 郭吉平, 龙金文. 混凝土拱桥悬臂施工法超长扣锚索几何非线性的影响研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(11): 201-205.
- ZHANG Jijin, GUO Jiping, LONG Jinwen. Study on the influence of geometric nonlinearity of super-long buckle anchor cable in cantilever construction method of concrete arch bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development(Application Technology Edition), 2019, 15(11): 201-205.
- [8] 吴月星, 龚兴生, 周建庭, 等. 大跨悬浇钢筋混凝土拱桥施工关键技术[J]. 公路工程, 2020, 45(6): 73-78, 116.
- WU Yuexing, GONG Xingsheng, ZHOU Jianting, et al. Key construction techniques of long-span cantilever casting reinforced concrete arch bridge[J]. Highway Engineering, 2020, 45(6): 73-78, 116.
- [9] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- ZHU Bofang. The finite element method theory and applications[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 1998.
- [10] 郑春玲, 雷霆. 某钢管拱桥拱肋悬拼中的扣索计算[J]. 桥梁建设, 2001, 31(4): 35-37.
- ZHENG Chunling, LEI Ting. Calculation of the temporary stays in the erection of steel tube arch ribs by cantilever method[J]. Bridge Construction, 2001, 31(4): 35-37.
- [11] 周水兴, 蔡净, 熊洪滨. 定长扣索法安装拱桁架节段控制索力计算[J]. 工程力学, 2001(s1): 838-842.
- ZHOU Shuixing, CAN Jing, XIONG Hongbin. Fixed-length buckle method installation arch truss segment control cable force calculation[J]. Engineering Mechanics, 2001(s1): 838-842.
- [12] 吴平琴, 潘荣斌, 郭吉平. 混凝土拱桥悬臂浇筑法施工扣塔偏位对拱肋高程的影响研究[J]. 中外公路, 2020, 40(4): 154-157.
- WU Pingqin, PAN Rongbin, GUO Jiping. Study on influences of phlon displacement on arch rib elevation of concrete arch bridge using cantilever casting method[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(4): 154-157.
- [13] 余钱华, 李威, 张家琪. 大跨悬拼钢筋混凝土拱桥施工索力计算分析[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(2): 45-53.
- YU Qianhua, LI Wei, ZHANG Jiaqi. Calculation and analysis of construction cable force of long-span cantilever reinforced concrete arch bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(2): 45-53.
- [14] 邓钰. 大跨度钢筋砼拱桥扣索索力计算分析[J]. 公路工程, 2017, 42(2): 165-169.
- DENG Yu. Calculation and analysis of cable force on large span reinforced concrete arch bridge[J]. Highway Engineering, 2017, 42(2): 165-169.
- [15] 李友明, 白晓红, 王启富. 山区公路变宽度连续箱梁设计特点与支架法现浇施工技术[J]. 中外公路, 2022, 42(6): 146-151.
- LI Youming, BAI Xiaohong, WANG Qifu. Design features and cast-in-place construction technique of support methods of continuous box girder for mountain road[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(6): 146-151.

- construction technology of cradle assembly with front support point and anchor block positioning for prestressed concrete cable-stayed bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(6):153-156.
- [4] 吴明威,刘冬冬,周雷,等.桥梁施工挂篮智能化控制系统研究[J].中国港湾建设,2018,38(1):66-70.  
WU Mingwei,LIU Dongdong,ZHOU Lei,et al.Intelligent control system of hanging basket for bridge construction [J].China Harbour Engineering,2018,38(1):66-70.
- [5] 中交二航局乌江大桥项目部.乌江大桥上部结构施工方案[R],2016.  
Wujiang Bridge Project Department of CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Construction scheme for superstructure of Wujiang bridge[R],2016.
- [6] 周苏,李新生,刘陈韬,等.复合式牵索挂篮施工过程受力分析与监测[J].中外公路,2023,43(4):188-195.  
ZHOU Su, LI Xinsheng, LIU-CHEN Tao, et al. Stress analysis and monitoring of composite cable hanging basket during construction[J].Journal of China & Foreign Highway,2023,43(4):188-195.
- [7] 姜永生,陈诚,范超.高墩大跨径混凝土梁斜拉桥0号块支架设计[J].施工技术,2018,47(13):135-138,147.  
JIANG Yongsheng, CHEN Cheng, FAN Chao. Design of No.0 block bracket of high pier long span concrete cable stayed bridge[J]. Construction Technology, 2018, 47(13): 135-138,147.
- [8] 靳会武,周春华,陈占明.镇山大桥44 m宽桥面挂篮施工技术[J].公路,2019,64(11):147-152.  
JIN Huiwu, ZHOU Chunhua, CHEN Zhanming. Construction technology of hanging basket for 44 m wide deck of Zhenshan bridge[J]. Highway, 2019, 64(11): 147-152.
- [9] 刘增武,周建庭,马虎,等.夜郎湖特大桥挂篮悬浇施工关键技术[J].世界桥梁,2019,47(5):22-26.  
LIU Zengwu,ZHOU Jianting,MA Hu,et al.Key techniques of cantilever casting construction for Yelang Lake bridge using form travellers[J].World Bridges,2019,47(5):22-26.
- [10] 刘晨,李美林,刘红波,等.柴埠大桥前支点挂篮施工技术[J].公路,2017,62(4):118-123.  
LIU Chen, LI Meilin, LIU Hongbo, et al. Construction technology of hanging basket at the front fulcrum of Chaibu bridge[J].Highway,2017,62(4):118-123.
- [11] 吴明威,陈林,刘冬冬,等.PC斜拉桥大型前支点挂篮安装技术[J].中外公路,2017,37(1):102-105.  
WU Mingwei,CHEN Lin,LIU Dongdong,et al.Installation technology of large front fulcrum hanging basket for PC cable-stayed bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway,2017,37(1):102-105.

#### (上接第200页)

- [16] 王东旭.大跨度铁路钢管混凝土拱桥施工阶段受力特性分析[J].铁道建筑,2021,61(4):21-24.  
WANG Dongxu. Analysis of mechanical characteristics in construction stage of long span railway concrete-filled steel tube arch bridge[J].Railway Engineering,2021,61(4): 21-24.
- [17] 王贵明,彭文平,周超.木蓬大桥高温合龙效应下拱圈内力调整研究[J].世界桥梁,2015,43(6):42-46.  
WANG Guiming, PENG Wenping, ZHOU Chao. Study of internal force adjustment for arch ribs of mupeng bridge under high temperature closure effect[J]. World Bridges, 2015,43(6):42-46.
- [18] 孙智慧,滕乐,秦健淇.大跨度钢管混凝土桁拱桥拱脚外包段受力分析与优化设计[J].中外公路,2020,40(4):141-146.  
SUN Zhihui, TENG Le, QIN Jianqi. Optimal design and mechanical analysis of arch foot in long-span concrete filled steel truss arch bridge[J].Journal of China & Foreign Highway,2020,40(4):141-146.
- [19] 李清,张基进,郭吉平.混凝土拱桥悬臂浇筑施工温度效应影响研究[J].中外公路,2020,40(3):196-199.  
LI Qing, ZHANG Jijin, GUO Jiping. Study on construction temperature effect for concrete arch bridge during cantilever casting construction[J]. Journal of China & Foreign Highway,2020,40(3):196-199.
- [20] 廖万辉,岳亚超,颜东煌,等.空心钢管混凝土拱桥截面设计参数影响分析[J].中外公路,2022,42(4):92-95.  
LIAO Wanhui, YUE Yachao, YAN Donghuang, et al. Influence analysis of section design parameters of hollow concrete-filled steel tube arch bridge[J].Journal of China & Foreign Highway,2022,42(4):92-95.