

# 飞鸟式拱桥系杆更换与监控技术研究

陈强<sup>1</sup>, 周彬彬<sup>1</sup>, 范冰冰<sup>2</sup>, 周锦<sup>1</sup>, 邹金岐<sup>2</sup>, 鄢荣<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电第十六工程局有限公司, 福建 福州 350108; 2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 为提高飞鸟式系杆拱桥系杆换索效率, 采用改进新增系杆法对中山二桥进行系杆更换。施工采用“边剪切边张拉”的施工工艺, 对旧系杆分级剪断、新系杆分级张拉依照横向对称且拱肋两侧对称进行, 分10级按每级10%索力进行张拉, 每级张拉切断旧系杆10%面积的钢绞线。成桥后对系杆索力进行整体校准, 完成体系转化。同时基于MIDAS Civil软件建立桥梁有限元模型, 对锚箱结构优化、体系转换施工工艺、结构受力监控和断索工序进行仿真分析。研究表明, 系杆更换过程中实测索力与施工组织设计吻合, 施工过程安全可控; 该系杆更换和监控技术体系可以方便地应用于既有飞鸟式拱桥的改造和加固施工中, 并具备良好的经济性和社会效益。

**关键词:** 飞鸟式; 系杆更换; 新增系杆法; 施工技术; 数值模拟

中图分类号: U448.22; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)05-0340-07

## Research on Replacement and Monitoring Technology of Tie Rods for Fly-Bird-Type Arch Bridges

CHEN Qiang<sup>1</sup>, ZHOU Binbin<sup>1</sup>, FAN Binghui<sup>2</sup>, ZHOU Jin<sup>1</sup>, ZOU Jinqi<sup>2</sup>, YAN Rong<sup>2</sup>

(1. Sinohydro Bureau 16 Company Limited, Fuzhou 350108, China; 2. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** In order to enhance the efficiency of tie rod replacement for fly-bird-type arch bridges, the tie rods of Zhongshan Bridge II are replaced by the improved and newly added tie rod method. The technology of “shearing and tensioning simultaneously” is used in the construction. The old tie rods are cut in grades and the new tie rods are tensioned in grades in accordance with the transverse symmetry and the symmetry on both sides of the arch ribs. Tensioning is carried out in 10 levels, with 10% of the cable force at each level. Tensioning at each level cuts the steel strands within 10% of the area of the old tie rods. After the bridge is completed, the force of the tie rod cables is calibrated as a whole to complete the system transformation. At the same time, based on MIDAS Civil software, the finite element model of bridge is established to simulate and analyze the anchor box structure optimization, system conversion construction technology, structural force monitoring and cable breaking. The study result shows that the measured cable force during the replacement of the tie rods is consistent with the construction organization design. The construction process is safe and controllable. This tie rod replacement and monitoring technical system can be conveniently applied in the reconstruction and reinforcing construction of existing fly-bird-type arch bridges, and has the good economy and social benefits.

**Keywords:** fly-bird-type; tie rod replacement; newly added tie rod method; construction technique; numerical simulation

## 0 引言

飞鸟式系杆拱桥通过吊杆承受竖向荷载, 而锚固在端部的系杆则提供预应力来平衡桥梁恒载及后期活载产生的水平推力, 因此, 系杆对整桥的安全起

着决定性作用。随着桥梁结构服役年限的增长, 系杆作为关键受力构件, 因长期承受着疲劳荷载和环境腐蚀<sup>[1]</sup>, 其性能可能显著退化, 从而影响结构的安全性和耐久性<sup>[2]</sup>。然而, 目前针对损伤系杆更换工艺的系统研究仍较为缺乏。

在拱桥系杆更换施工中, 多借鉴斜拉桥的拉索更换相关理论<sup>[3-4]</sup>。但在实际工程中, 系杆成桥索力往往与初始设计存在较大偏差, 会严重影响施工预判和控制精度。为此, 有学者提出可采用影响矩阵法<sup>[5]</sup>对系杆索力进行优化设计, 并基于闭环控制原

收稿日期: 2025-11-27

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2024J01355)

作者简介: 陈强(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 从事高速公路工程的工作。

通信作者: 范冰冰(1982—), 男, 博士, 副教授, 从事桥梁评定与维护研究工作。电子信箱: fanbinghui@fzu.edu.cn

理对结构参数进行校正,从而降低既有桥梁仿真分析的误差<sup>[6]</sup>。目前新建桥梁系杆的张拉控制已形成较为明确的分析方法<sup>[7]</sup>,并对张拉过程中的线形位移提出了具体要求<sup>[8]</sup>。在此基础上,部分工程实践进一步引入了磁通量传感器进行索力核验,并补充了二次补张拉等施工控制要点<sup>[9]</sup>;黄勇<sup>[10]</sup>提出的新系杆加固方案,也为系杆更换施工优化提供了参考。

对于系杆更换技术,施工工艺方面的现有方法主要包括分级卸载替换、临时支撑体系转换和新增系杆法等,目的均为减少对原结构的内力扰动。其中分级卸载替换法<sup>[11]</sup>通过分阶段逐步卸载原有系杆的荷载来减少结构的整体变形,卸载后的系杆再逐步拆除并更换新系杆。临时支撑体系转换法<sup>[12-13]</sup>通过设置临时支撑体系来承接卸载部分结构荷载,以此保持结构整体稳定;更换新系杆时,逐步拆除临时支撑,并将荷载转移到新系杆上。新增系杆法<sup>[14]</sup>采用分阶段施工,逐步剪切新系杆并张拉新系杆,使结构可以安全完成体系转化。该方法利用增加的临时对拉装置<sup>[15]</sup>来承受拱肋端部的水平推力,使拱肋在系杆拆除后处于平衡状态。基于新增系杆法安全性高、体系转换可控性强的特点,本文结合飞鸟式拱桥的结构特性,提出了一种优化的系杆更换方案,旨在实现施工过程的安全性及结构性能的协同提升。

## 1 工程概况

中山二桥桥梁全长617 m,桥宽40 m,主桥为41 m+125 m+41 m飞鸟式系杆拱桥,过渡段为宽29 m的预应力混凝土组合简支箱梁,东西引桥各为先张法预应力空心板。

中山二桥主桥上部结构为无风撑飞鸟式钢箱混凝土拱桥(见图1)。

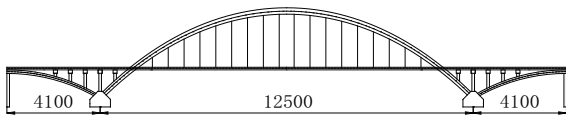


图1 中山二桥主桥立面布置图(单位:mm)

桥面系以上主拱肋投影长度为95 m,矢跨比为1/5,2片拱肋为2次抛物线变高度矩形截面钢箱,拱肋截面为单箱3室,浇筑C30混凝土。主桥设有1套水平系杆,全桥共40束。单侧拱肋采用20束12 $\phi$ 15.24 mm高强度低松弛预应力无黏结钢绞线,置于桥梁两侧主拱肋投影线的桥面上。主桥共设吊杆36根,2片拱各设18根吊杆,吊杆间距均为5.0 m,每根吊杆由109 $\phi$ 7 mm高强度低松弛预应力钢丝形成扭绞形截面。

## 2 工艺原理

### 2.1 工艺原理

(1)通过在原有系杆附近或新位置安装新的锚固端然后新建系杆,逐步将荷载从旧系杆转移到新系杆上,最终拆除旧系杆。这种方法能够在不中断交通或减少对结构影响的情况下完成更换。

(2)通过可更换系杆体系实现“主动替换、动态调控”的目标。核心原理基于荷载渐进转移与结构动态平衡,通过分级张拉新系杆、分段切断旧系杆的协同作业,确保桥梁受力状态始终可控。施工时,首先在旧系杆两侧对称布设新系杆系统,并通过分级张拉、分级切断旧索实现系杆应力的转换。

(3)分级张拉的核心在于通过多次小幅度张拉,使新系杆的受力均匀化,避免单次大幅张拉导致的局部应力突变或结构变形失控。每级张拉完成后,需同步监测桥梁关键截面的应力变化及位移数据,确保新旧系杆间的荷载传递平稳过渡。

(4)系杆由55束直径 $\phi$ 15.2 mm环氧喷涂无黏结筋钢绞线组成,钢绞线抗拉强度不小于1 960 MPa。每束索体涂抹防腐油脂后设置单独的内层HDPE护套,然后设置1层高强聚酯缠包带和外层HDPE护套。

### 2.2 施工工艺流程

施工工艺流程按下列步骤进行:

施工准备—全桥通测—拱肋开新系杆通过孔并补强—新系杆通道进行穿孔测试—工厂制造新系杆锚箱—安装新系杆钢锚箱和系杆孔道—拱肋开新系杆通过孔并补强—施工桥面上新系杆支撑辊轴—新系杆穿索并临时固定在锚箱上,全新通测—新系杆张拉至指定分级索力—监控并静置观察系统安全情况—剪断旧系杆指定分级的钢丝—监控并静置观察系统安全情况,重复进行下一分级系杆力张拉—全桥通测—判断测量数据是否满足要求(否则进行系杆力调整)—安装减震器—防腐施工—临时拆除的部分桥面板恢复—系杆更换完成。

## 3 施工关键技术

### 3.1 施工准备

(1)施工组织和技术准备。配合现场测量数据,编制施工组织设计,进行技术、安全交底。确定桥梁新系杆设计参数,明确更换系杆的基本步骤,根据施工能力划分施工段。

(2)设备准备。大型器械有汽车吊、平板车、卷扬机等;高强度连接件有锚固件、螺母等;张拉设备有液压千斤顶、张拉器、油压泵等;切割设备有金刚石切割机、电动砂轮机;监测设备有应力应变传感器、位移传感器、测力计等;其他辅助设备有手拉葫芦、钢丝绳、索夹、张拉连接套、内衬套等。

(3)材料检验。对钢绞线外观、直径、抗拉强度、伸长率进行检验,抽检频率为每批10%;对锚具硬度、尺寸、锚固性能进行检验,抽检频率为每批5%;对聚脲防护层厚度、附着力、耐磨性进行检验,抽检频率为全数检测;对减震块硬度、拉伸强度、阻尼比进行检验,抽检频率为全数检测。

### 3.2 施工监控

(1)桥面变形监测:钢横梁顶板上缘测点按间隔1个系杆位置布置,同一横断面设置3个三维变形测点。桥面测点布置见图2(a)。

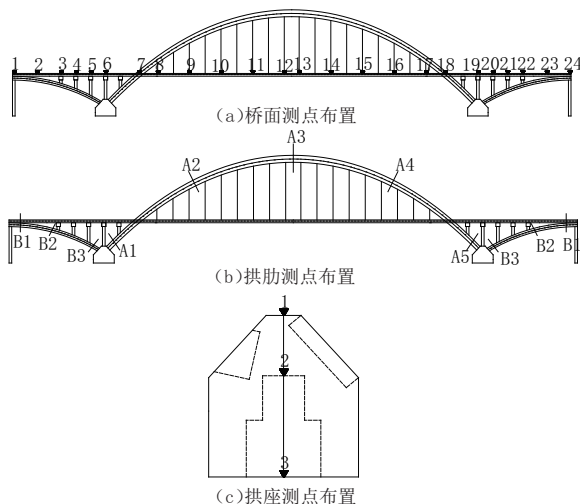


图2 监控测点布置图

(2)拱肋应力监测:在边拱设置3个测试断面,中拱设置5个测试断面,每个监测断面4个应力计应变测点。拱肋变形监测:测点位于拱肋顶板区域,按间隔1个系杆位置布置;同一截面设置1个三维变形测点。拱肋测点布置见图2(b)。

(3)拱座及边墩应力监测:在拱座、桥墩顶部和底部两侧布置应变监测点,每个拱座上布置4个应变测点,每个边墩上布置2个应变测点。拱座变形监测:测点位于拱座顶板对角以及拱座与立柱连接处区域,布置4个三维变形测点。拱座测点布置见图2(c)。

### 3.3 系杆通道施工

系杆在自由段采用支撑架支承索体重量。系杆支撑架主要由挡板、滚轴、滚轮、支架和拉板构成,并

通过预留的4个 $\phi 18$ 地脚螺栓孔,用M16地脚螺栓与地面连接。系杆支撑架在系杆施工完成后,所有外露钢构件按桥梁结构防腐同等要求做二次防腐处理。支撑架分别布置在吊杆两侧,纵向每隔5 m布置1套。支撑架构造设计见图3。

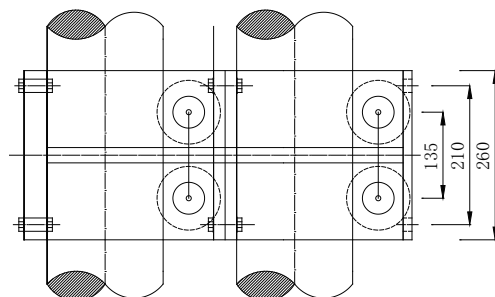


图3 系杆支撑架示意图(单位:mm)

### 3.4 系杆索牵引及安装

#### 3.4.1 系杆牵引方法

在系杆穿索牵引施工过程中,需前后端协调配合以确保索体平稳安装。首先,将10 t卷扬机布置于系杆前端的桥面上,并通过膨胀螺栓牢固固定其底座;同时在另一端也设置1台10 t卷扬机,其钢丝绳与索头连接用于牵引。索盘安放于桥面距张拉端10~20 m处,并与桥面固定,吊装时应确保外圈索头朝上,由汽车吊将对应索盘号吊入放索盘内。牵引时,前端卷扬机通过索体牵引头施加牵引力,后端汽车吊则配合放盘并调节索体进口高度,两者协同控制索体的缓慢牵引前行。整个牵引系统采用导向地轮与滑车配合导引索体,导向地轮按5~8 m间距布置,并通过膨胀螺栓固定在桥面上,以确保索体在牵引过程中保持稳定。

#### 3.4.2 牵引过程保护方法

牵引过程中,采用在入洞口处设置导向滚筒或搭钢管托架,使体外索沿滚轮或钢管托架滑行进入拱肋预留孔内和支承架上。可靠的保护措施可防止索体表面的HDPE护套受到机械损伤。洞口边角包1层垫层,该垫层可用土工布等材料制成,防止体外索进入时擦伤。最终到达锚固位置。

#### 3.4.3 剥皮与清洗

在系杆索进入锚固端的预埋管之前,测量索两端锚固的实际距离,再结合系杆索出厂前的长度标识,计算出两端PE剥除长度。在体外索进入锚固端的预埋管之后,根据精确测量的索两端锚固的实际距离,剥除两端索体外层PE层,确保在张拉后索的PE层进入密封筒的长度在100~300 mm之间。按长度剥除两端PE层后,用中性清洗剂清除裸露钢绞线

的防腐油脂。剥皮和清洗完成后,再利用卷扬机将系杆牵引到位。

3.4.4 锚具组件安装

锚具安装时分 2 个组装件进行。先将密封筒和支撑筒组装件套进索体,再按一一对应原则套进工作锚板,并用螺栓将两部分连接。锚具组件安装后,应确保外露钢绞线满足今后更换索体时张拉所需的工作长度。

3.5 张拉千斤顶安装

(1)利用手拉葫芦在锚具上精确安装连接套,再用手拉葫芦将张拉撑脚吊装至预定位置进行安装。安装时,通过手拉葫芦微调撑脚位置,使之与锚头螺母保持居中对正。

(2)在桥面搭设稳固的龙门架,在手拉葫芦的辅助下完成千斤顶的吊装和移动。张拉千斤顶需精准安装至工作位,并使其与张拉连接套严格对中。

(3)在千斤顶后端安装张拉螺母。

完成整套张拉设备的安装后,需确保系统完全就位,方可开展整体张拉施工作业。

3.6 系杆张拉前准备工作

3.6.1 技术准备

选用连接套张拉方式进行系杆的张拉施工。原理是利用张拉连接套一端与系杆锚板螺纹连接,另一端安装张拉螺母并与千斤顶活塞配合,形成一个长度可调节的反力体系。在张拉过程中,千斤顶施加荷载,促使钢绞线索体在工作夹片的夹持作用下向外延伸。同时,通过旋转锚具组件支撑筒上的螺母来实现张拉力的分级锚固,以便对张拉过程进行精确控制。

3.6.2 凿除旧系杆混凝土、切割索

为确保全桥系杆的受力完全解除,需要在整个桥梁结构上进行 12 处切割操作。首先,在拱脚前后 2 m 范围内布置 8 处切割点,同时在拱端加固保护箱前方 2 m 处设置另外 4 处切割点(见图 4)。施工过程中,划定 100 cm×75 cm 的矩形框作为作业范围。定位完成后,使用圆盘切缝机在旧系杆的两侧切割出预定宽度的断缝,确保切口深度能够穿透混凝土保护层。之后采用电镐分层凿除覆盖层的混凝土,直至旧系杆完全外露。最后使用手握式切割机对暴露出的旧系杆 PE 保护层进行剥离,使其内部的钢绞线清晰可见,为后续体系转换切割提供便利。

由于原桥钢绞线存在缠绕布置,为确保索力能够均匀释放,切割必须遵循严格的顺序控制。应优

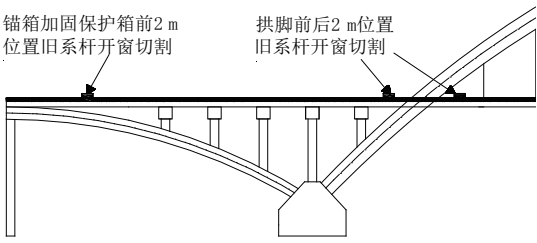


图 4 旧系杆通道凿除切割位置 1/2 平面示意图

先在桥两侧分别从拱脚往跨中方向进行切割放张,待这部分切割完成、应力平稳释放后,再依次完成其余位置的切割,以保证原桥索力能够完全解除且结构受力不发生突变。整个过程需密切监测桥梁响应,确保拆除作业的安全性。

3.6.3 防弹索夹安装

为确保桥梁系杆更换时的施工安全,需安装防弹索夹。施工时,确定距断索点 0.5~1.0 m 的桥面处。采用钻具在桥面打孔,安装匹配规格的膨胀螺栓并紧固到位。然后将防弹索夹套在螺栓上,用螺母固定,确保与桥面紧密贴合无松动。体系转换前还需对索体进行 5% 控制拉力的预加载,以验证索体受力情况和直线度是否符合要求。这一标准化安装流程能有效控制钢绞线断裂时的安全风险。

3.7 系杆体系转换

3.7.1 张拉流程

全桥共新增 8 根系杆,根据拱肋的南北向区分 N、S,每根拱肋下设 4 根系杆。新增系杆编号平面示意图见图 5;系杆张拉流程图见表 1。

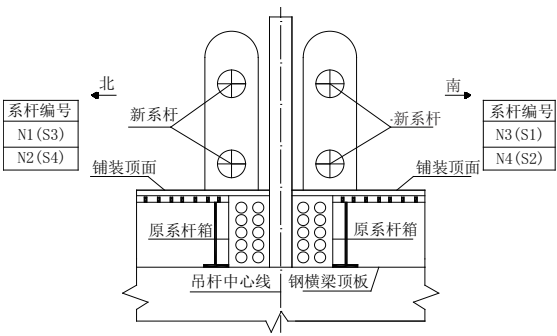


图 5 新增系杆编号平面示意图

3.7.2 张拉原则

在整体张拉装置安装及索体调整完成后,即可进行正式体系转换。整个转换过程必须严格遵循对称张拉、同步控制、分级实施的原则,确保桥梁受力和变形符合设计要求。

对称张拉原则要求旧系杆分级剪断、新系杆分级张拉必须横向对称且拱肋两侧对称进行,避免因应力集中导致桥面开裂或异常起拱。同步控制原则

表1 系杆张拉流程图

| 张拉<br>序号 | 单束系杆索力张拉比例/% |             |             |             | 切割钢绞线孔数 |     |
|----------|--------------|-------------|-------------|-------------|---------|-----|
|          | 系杆<br>N1、N4  | 系杆<br>S1、S4 | 系杆<br>N2、N3 | 系杆<br>S2、S3 | N 拱     | S 拱 |
| 1        | 5            | 5           |             |             |         |     |
| 2        |              |             | 5           | 5           | 1       | 1   |
| 3        |              |             | 15          | 15          | 1       | 1   |
| 4        | 15           | 15          |             |             | 1       | 1   |
| 5        | 25           | 25          |             |             | 1       | 1   |
| 6        |              |             | 25          | 25          | 1       | 1   |
| 7        | 全桥通测         |             |             |             |         |     |
| 8        |              |             | 35          | 35          | 1       | 1   |
| 9        | 35           | 35          |             |             | 1       | 1   |
| 10       | 45           | 45          |             |             | 1       | 1   |
| 11       |              |             | 45          | 45          | 1       | 1   |
| 12       |              |             | 55          | 55          | 1       | 1   |
| 13       | 55           | 55          |             |             | 1       | 1   |
| 14       | 65           | 65          |             |             | 1       | 1   |
| 15       |              |             | 65          | 65          | 1       | 1   |
| 16       |              |             | 75          | 75          | 1       | 1   |
| 17       | 75           | 75          |             |             | 1       | 1   |
| 18       | 全桥通测         |             |             |             |         |     |
| 19       | 85           | 85          |             |             | 1       | 1   |
| 20       |              |             | 85          | 85          | 1       | 1   |
| 21       |              |             | 95          | 95          | 1       | 1   |
| 22       | 95           | 95          |             |             | 1       | 1   |
| 23       | 100          | 100         |             |             |         |     |
| 24       |              |             | 100         | 100         | 1       | 1   |
| 25       | 全桥通测系杆索力调整   |             |             |             |         |     |
| 合计       |              |             |             |             | 20      | 20  |

要求新旧系杆索力转移必须同步,张拉过程采用三通阀系统(1台主机驱动2台千斤顶)并配备标定设备,使东西侧同步加载,以维持桥梁稳定性。分级实施原则强调分步实施,初始以5%索力为步长,后续以每10%为1级,新系杆每张拉1级索力,旧系杆对应剪断10%面积的钢绞线;重复张拉新系杆、切割旧系杆,直至完成系杆张拉。

3.7.3 体系转换步骤

首先通过测控点测量并由监控系统下达指令,实时监测旧系杆割除过程及剩余新旧系杆的索力变化,分析索力转移规律以推断剩余索力。随后安装千斤顶启动油泵,以10 MPa/min的匀速同步加载新系杆至5%设计索力,稳压后锁紧锚固螺母并记录支撑筒外露长度;此后分10级(每级10%索力)进行张拉,每次张拉后同步切割旧系杆对应截面,共11次加载,直至达到100%设计索力(7 200 kN)。

施工全程需动态监测拱肋、桥面的线形和应力,

再依据反馈数据调整后续张拉参数;若线形变化超预警值,需立即采取断索或降低索力等措施来控制拱肋和桥面变形,待成桥后再优化最终索力。完成分级张拉后,需全桥通测并对系杆索力进行整体校准,消除因分批张拉导致的索力不均问题。在全桥受力和线形均符合设计要求后,体系转换最终安全完成。

4 有限元数据模拟

4.1 有限元模型介绍

采用MIDAS Civil软件建立全桥三维有限元模型(见图6)。模型包含11 270个节点和10 905个单元。其中:桩基础、桥墩、拱座倒T型横梁和承台采用梁单元模拟;主拱肋和边拱肋采用钢-混凝土组合截面,以组合单元模拟;横撑、拱上立柱、钢横梁和钢纵梁采用梁单元模拟;吊杆和水平系杆采用桁架单元模拟。

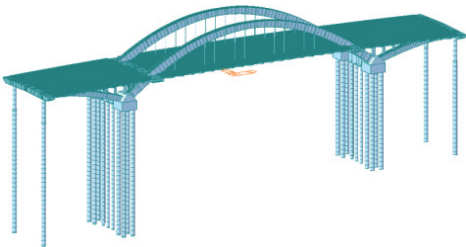


图6 全桥有限元模型

材料本构和参数如下:

(1)全桥钢结构主拱肋、拱上横梁等采用A3钢,弹性模量 $2.06\times10^5$  MPa,泊松比0.3,屈服强度235 MPa,本构采用理想弹塑性模型,极限应变取0.025。

(2)混凝土均采用C30,弹性模量 $3.00\times10^4$  MPa,泊松比0.2,轴心抗压、抗拉强度标准值分别为20.1、2.01 MPa;拱肋钢箱内填充混凝土,与钢箱形成组合截面,混凝土本构采用Kent-Park模型,钢-混凝土界面通过设置弹簧单元来模拟其黏结滑移行为。

(3)预应力体系中,系杆采用 $12\phi 15.24$  mm钢绞线,吊杆采用 $109\phi 7$  mm钢丝,强度均为1 860 MPa,弹性模量分别为 $1.95\times10^5$ 、 $2.05\times10^5$  MPa,本构采用CEB-FIP模型并考虑松弛效应。

荷载工况和组合按施工阶段设定,包括恒载(结构自重与二期恒载)、预应力荷载(计入各项瞬时及长期损失)、施工临时荷载(主跨两侧2辆50 kN大型设备、引桥2辆15 kN作业车辆、系杆更换阶段的支撑架和张拉设备荷载)以及整体温度荷载( $25\pm 5$ )℃。施工阶段承载能力极限状态验算中,荷载分项系数

取为:恒载 1.2、临时荷载 1.3、温度 1.0;同时,设置包含偶然荷载组合,以评估结构的抗风险能力。

桩基础底部采用固结约束,桩身设置侧向土弹簧来模拟弹性约束;桩顶与承台、承台与桥墩采用刚性连接。上部结构中,桥墩、承台、拱肋等关键部位通过耦合自由度或刚性约束来确保受力协调;拱肋与吊杆、立柱、横梁等采用共用节点连接;系杆与端横梁之间通过耦合自由度和法向约束,以精确模拟其锚固和传力边界。上述处理有效保证了模型在施工阶段和偶然状况下的力学合理性及计算可靠性。

4.2 数据模拟

采用有限元软件对中山二桥进行系杆更换过程中的安全验算分析。该施工阶段中,旧桥经历了系杆箱和转向块等装置安装、旧系杆和新系杆按照 5% 和 10% 等阶梯式放张及张拉作业过程,仿真分析中直接按照新旧系杆力准静态传递。

系杆更换各个工序之间要求桥面和拱肋线形变化不超过 1 cm、拱座位移不超过 1 mm。本节针对位移的分析结果是系杆更换后与更换前的位移变化增量,系杆力根据设计要求按照 7 000 kN 施加,所有新系杆的系杆张力均相同。根据图 2 所示的应力和位移监测点监测到的各位置应力、位移变形见图 7。

由图 7 可见:

(1)拱座纵向位移变化量在-0.8~0.7 mm 范围内,横向位移变化量在-0.004~0.006 mm 范围内,竖向位移变化量在-0.014~-0.003 mm 范围内。显然,拱座位移变化量满足 1 mm 施工精度控制要求。

(2)桥面竖向位移在-2.0~2.0 mm 范围内变化,中间桥面整体上拱量在 2 mm 范围内,边跨桥面整体下落量在 2 mm 以内。系杆更换前后桥面位移增量都在 1 cm 范围内,满足施工精度控制要求。

(3)拱肋应力水平在-70~-20 MPa 范围内变化,最大应力水平仍然在安全范围内,拱肋强度满足要求。吊杆应力在 273~305 MPa 范围内变化,相对初始阶段吊杆索力变化不大,吊杆仍然处于安全受力状态。

5 结 语

(1)中山二桥依照优化的系杆更换方案进行系杆更换,施工中采用旧系杆分级剪断、新系杆横向对称且拱肋两侧对称进行张拉,分阶段完成了体系转化,并通过有限元分析验证了该方案的可行性。

(2)优化的系杆更换方案应用于飞鸟式拱桥时,

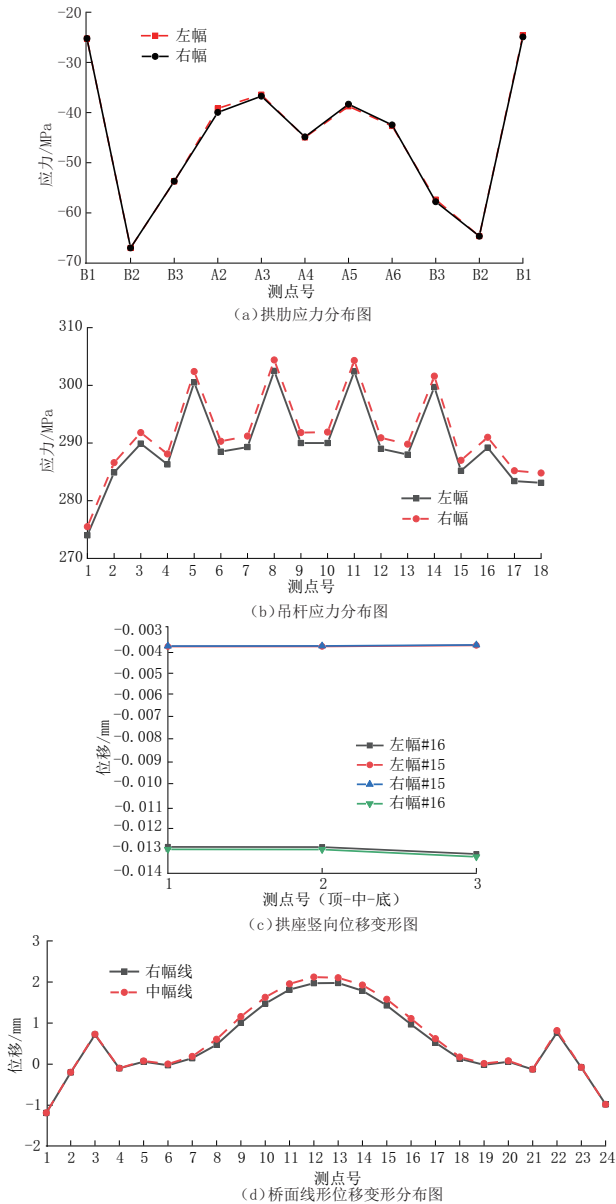


图 7 结构有限元模拟结果

可解决系杆通道布置的难题。该方案与边拱联结效果好、受力明确、工程量小,可大大降低施工难度;工程造价低、工期快、交通影响小,可解决随时更换保养,以及更换过程中因拱肋刚度削弱所造成的变形大、拱座位移明显等技术难题。

(3)设计了一种系杆拉索可调可换可修的体系,提出了系杆更换施工过程体系转换监控主要内容。施工过程中应以桥梁变形控制为主,索力控制为辅;成桥后调整索力时应以索力控制为主,桥梁变形控制为辅。通过精确控制桥梁线形,可达到体系平稳转换的效果。系杆更换安全可控、精确度高、适用性强、经济和社会效益显著。

(3)系杆更换过程中拱座水平位移未超过 1 mm,结构线形偏差控制在 1 cm 以内。在成桥索力误差控

制方面,单根索力张拉相对误差可严格控制在理论索力的 $\pm 5\%$ 以内,成桥索力控制在设计索力的 $\pm 10\%$ 以内,同时可保证各对称(包括轴对称和旋转对称)索杆的索力相对误差值在3%(张拉)及5%(成桥)以内,索力更换前后偏差控制在5%以内。另外,优化的系杆更换方案可将工期缩短30%~50%,减少临时支撑材料用量、人工和设备租赁费用,经济性好。

(4)与传统整体更换或单侧交替施工方法相比,分阶段同步切断和张拉系杆的方法在技术可行性、经济性和社会接受度上更具优势,尤其适用于需维持交通运营的复杂城市桥梁。未来可结合预制化、数字化技术进一步优化工艺,推广至同类桥梁的维修加固工程。

#### 参考文献:

- [1] 陈宝春,刘君平.世界拱桥建设与技术发展综述[J].交通运输工程学报,2020,20(1):27-41.
- [2] 康孝先.系杆拱桥病害和维修加固关键技术综述[C]//中国公路学会养护与管理分会第八届学术年会论文集.绵阳:绵阳市交通运输局,2018:155-160.
- [3] LI H J, FAN X P. Replacement of cable stays in yonghe bridge in Tianjin, China[J]. Advances in Civil Engineering, 2020: 6650393.

- [4] FU Z Q, JI B H, YANG M Y, et al. Cable replacement method for cable-stayed bridges based on sensitivity analysis[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015, 29(3): 04014085.
- [5] 王蔚丞,罗小斌,罗超,等.基于影响矩阵法的大跨劲性骨架拱桥一次张拉索力确定方法研究[J].桥梁建设,2025,55(3):155-162.
- [6] 孙成贵,纪尊众.钢管混凝土拱桥拱肋的施工控制[J].铁道建筑技术,2001,39(2):23-25.
- [7] 赵健,魏木熊,常海,等.飞燕式系杆拱桥施工关键工序控制分析[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(5):223-224.
- [8] 张振伟,张伟.飞燕式钢管混凝土系杆拱桥参数分析与线形控制[J].中外公路,2018,38(6):105-108.
- [9] 袁迪迪.中承式三拱肋钢管混凝土系杆拱桥水平系杆补张施工关键技术研究[J].建筑科技,2025,9(5):165-169.
- [10] 黄勇.中承式系杆拱桥系杆加固方案比选[J].公路工程,2010,35(6):66-69.
- [11] 王解元,潘德鹏.某拱桥系杆换索设计与施工[J].世界桥梁,2010,39(2):66-69.
- [12] 赵艳纳,何俊辉,谢雨珊.六律邕江特大桥临时系杆安装施工技术探讨[J].西部交通科技,2019,14(12):119-122.
- [13] 张兆强,姜山,康孝先,等.大跨度飞燕式系杆拱桥系杆更换关键技术[J].施工技术,2018,47(22):96-100.
- [14] 姜山.涪江三桥系杆更换施工技术研究[D].绵阳:西南科技大学,2018.
- [15] 丁玉春.增加临时对拉装置拆除系杆拱桥的施工技术[J].公路,2021,66(9):192-196.

(上接第315页)

复等工程措施的比选与适用场景,为类似工程提供了实际参考,对水下生态建设提出了合理化建议。

河湖生态整治的关键点在于选择合适的整治措施,最经济有效地提升水体整体生态环境。措施应综合评判整治效果、周边影响、实施可行性、造价经济性等因素,综合选择最适合的工程措施。

#### 参考文献:

- [1] 吴强,崔晨甲,刘汗.科学推进湖库生态清淤的几点建议[J].水利发展研究,2025,25(10):1-4.
- [2] 王珏.河湖生态清淤聚泥塑滩技术研究[J].水利规划与设计,2023(6):72-78.
- [3] 张岳,王佳,刘嘉裕,等.富营养水体沉积物磷素释放机理及控制技术进展[J].杭州师范大学学报(自然科学版),2014,13(1):53-59.
- [4] 杨海全,陈敬安,刘文,等.草海底泥原位钝化工程示范及其生态环境效应[J].环境工程学报,2017,11(7):4437-4444.
- [5] 沈世龙,刘畅快,洪思远,等.原位钝化处理对污染底泥氮磷释放

- 的影响[J].环境科技,2021,34(1):30-34.
- [6] 陈国敏.河湖生态清淤及淤泥固化一体化技术应用[J].智慧中国,2024(9):86-87.
- [7] 李富春,李洪斌,梁旭清.真空联合堆载预压法在公路软基处理中的应用[J].广东建材,2012,28(3):63-66.
- [8] 吕广阔,徐吉平,李志豪.生态清淤污染底泥调查及风险分析评价方法[J].价值工程,2022,41(35):137-139.
- [9] 周源,高玉峰,陶辉.疏浚淤泥中的拱架结构防淤堵机理[J].土木建筑与环境工程,2010,32(2):7-13.
- [10] 吴艳华,杨墨,叶克,等.沥溪垃圾填埋场二期工程污泥坑原位固化案例分析[J].净水技术,2019,38(5):109-114.
- [11] 夏天.软土地区地基处理方法对比分析[J].科技创新与应用,2012(31):228.
- [12] 李广,陈龙,刘兴峰.浅谈河湖生态淤泥固结技术与资源再利用[J].绿色环保建材,2021(11):22-23.
- [13] 潘琤琤.基于鱼类栖息地修复的浙江省城市湖泊公园设计研究[D].杭州:浙江农林大学,2013.
- [14] 毛子涵.海绵城市视角下的长沙洋湖湿地公园三期景观改造设计[D].长沙:中南林业科技大学,2023.