

DOI: 10.7672/sgjs2026020052

# 中承式拱桥系杆更换方案与施工监控技术研究\*

张记峰<sup>1</sup>, 何 檠<sup>2</sup>, 梁伟俊<sup>1</sup>, 周军勇<sup>2</sup>

(1. 广东省建设工程质量安全检测总站有限公司, 广东 广州 510510;

2. 广州大学土木与交通工程学院, 广东 广州 510006)

[摘要] 我国早期中承式系杆拱桥设计阶段对系杆可更换性考虑不足, 导致在结构性能劣化后需采用切断与非原位更换方案维持承载力。以中山二桥(41+125+41)m 3跨中承式无风撑钢箱混凝土系杆拱桥大修加固为工程背景, 从技术难点、施工方案、有限元分析、监测内容和控制方法多个方面系统论述了中承式拱桥系杆更换方案与施工监控技术。提出了新系杆分级张拉与旧系杆分级切断的交叉施工工艺, 构建了以索力控制为主线、关键点位移控制为核心、结构应力监测为校核的三维监控体系。有限元分析与工程实践表明: 采用该技术方案实现了拱座水平位移 $\leq 1\text{mm}$ 、拱肋及桥面竖向位移 $\leq 10\text{mm}$ 的精准控制, 拱肋关键断面的结构应力变化幅度很小, 实现了新旧系杆索力的平稳传递, 保障了系杆更换全过程的结构施工安全。

[关键词] 桥梁; 拱桥; 系杆更换; 监控; 敏感性分析; 有限元分析; 施工技术

[中图分类号] U448.22<sup>+</sup>5; U445

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)02-0052-06

## Replacing Scheme of Tie Rod and Construction Monitoring Technology for Half-through Arch Bridge

ZHANG Jifeng<sup>1</sup>, HE Lin<sup>2</sup>, LIANG Weijun<sup>1</sup>, ZHOU Junyong<sup>2</sup>

(1. Guangdong Construction Engineering Quality and Safety Inspection Station Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510510, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

**Abstract:** Early design of half-through tied arch bridges in China inadequately addressed the replaceability of tie rods, necessitating post-deterioration cutting and non-original-position replacement strategies to maintain structural capacity. This paper investigates tie rod replacement and construction monitoring technologies based on the rehabilitation project of the Second Zhongshan Bridge, which is a (41+125+41)m three-span wind-bracing-free steel-concrete composite half-through tied arch bridge. Technical challenges, construction schemes, finite element analysis, monitoring parameters, and control strategies are comprehensively analyzed. A novel cross-construction protocol integrating graded tensioning of new tie rods with phased cutting of existing tie rods is proposed. A monitoring framework is established, prioritizing cable force control as the primary strategy, critical displacement monitoring as the core mechanism, and structural stress verification as the auxiliary criterion. Finite element analysis and field implementation show that the proposed methodology achieves precise control over arch abutment horizontal displacement ( $\leq 1\text{mm}$ ) and vertical displacements of arch ribs and bridge deck ( $\leq 10\text{mm}$ ), with minimal stress variations in critical arch sections. The smooth force transfer between old and new tie rods ensures structural safety throughout replacement operations.

**Keywords:** bridges; arch bridges; tie bar replacement; monitoring; sensitivity analysis; finite element analysis; construction

\* 广东省建筑科学研究院集团股份有限公司课题: 未知索力状态下拱桥系杆与吊杆更换的施工监控关键技术研究(0135RDY2024M0000056)

[作者简介] 张记峰, 高级工程师, E-mail: 635310396@qq.com

[通信作者] 周军勇, 副教授, 博士, E-mail: jyzhou@gzhu.edu.cn

[收稿日期] 2025-03-19

## 0 引言

中承式拱桥具有造型优美、力学性能优异、跨越能力强等技术优点,在城市及山区大跨径桥梁建设中备受青睐<sup>[1]</sup>。为使中承式拱桥适用于城市软土地质条件,通常采用预应力索作为系杆平衡拱桥水平推力,系杆成为此类拱桥的核心传力构件,其可靠性对中承式拱桥结构安全至关重要。由于系杆及其防护材料的使用寿命以及桥梁结构受到环境长期侵蚀作用,系杆的设计使用寿命通常只有 20 年,这要求在桥梁 100 年设计基准期内需对系杆进行多轮维修更换。

然而,受限于设计理念、技术手段和施工方法,早期的拱桥系杆未充分考虑更换维修问题,设计为平行钢绞线或钢丝束形式,采用普通群锚进行张拉锚固,且锚固段内进行管道压浆,这使得既有系杆张拉端部操作空间不足、管道压降导致系杆与主梁连成整体,无法对既有系杆通过张拉释放方式进行原位更换,必须通过切断方式释放旧系杆索力,并重新设计新系杆线形及锚固区域<sup>[2]</sup>。这对中承式拱桥既有系杆更换施工带来很大技术挑战。

国内外针对拱桥系杆更换的工程报道案例较少。赵震寅<sup>[2]</sup>从理论分析角度研究了中承式钢管混凝土拱桥的不同系杆更换方案及其对结构体系影响,彭世恩等<sup>[3]</sup>采用有限元模拟分析了不同系杆力损失对下承式钢管混凝土系杆拱桥的影响,唐辉等<sup>[4]</sup>从可靠度分析角度研究了同步更换系杆数量对拱桥构件及体系的影响并确定了最优更换方案。这些研究主要从理论分析与数值有限元计算角度探讨了不同系杆更换方案对拱桥结构安全的影响,无实际工程应用。王解元等<sup>[5]</sup>报道了主跨 280m 下承式钢管混凝土系杆拱桥的系杆更换切断施工方案,在原系杆锚固位置安装应急系杆并基于张拉力相等原则进行更换;康孝先等<sup>[6]</sup>报道了主跨 80m 的 3 跨钢筋混凝土下承式系杆拱桥系杆更换施工案例,旧系杆具备张拉空间,采用千斤顶张拉释放方式进行拆除;张兆强等<sup>[7]</sup>报道了主跨 202m 的 3 跨钢管混凝土拱桥系杆更换施工及监控案例,采用旧系杆切断、拱桥临时系杆张拉思路进行分步施工,介绍了施工方案及施工监控效果,达到预期效果。

本文以中山二桥(41+125+41)m 中承式无风撑钢箱混凝土系杆拱桥系杆更换为依托,该桥建成于 1995 年,系杆采用预应力钢绞线群锚,无更换施工作业空间,锚固端钢绞线被混凝土填实,检测报告显示该桥系杆索力离散性很大,部分区域系杆破损严重,该桥出现伸缩缝错台等显著病害。既有研究

案例与本桥结构形式及系杆更换条件均不同,本文针对该桥系杆索力未知、需切割更换的特点,提出了一种切断原有系杆及非原位安装新系杆的方法,施工监控数据显示该方案实施效果良好,可为后续此类型系杆拱桥的系杆切断更换提供工程参考价值。

## 1 工程概况

中山二桥位于中山市博爱路城区段,横跨岐江河道,桥梁全长 617m,全宽 40m。主桥结构为(41+125+41)m 3 跨中承式无风撑钢箱混凝土系杆拱桥,过渡孔为 27.5m 预应力混凝土组合简支箱梁。其主拱矢跨比 1/5、边拱矢跨比 1/11.14,拱肋轴线为二次抛物线。钢箱拱肋采用矩形单箱三室截面设计,宽度为 2.5m,内、外箱室内灌注 C30 混凝土形成组合结构;主拱肋高度由跨中 2.5m 过渡至拱脚 3.5m,边拱肋高则在 2.0~2.5m 变化;桥面为钢纵横梁结构与钢筋混凝土槽形板的组合体系,横梁 5m 等间距布置,并设置 4 道伸缩缝以适应温度变形。其主墩采用直径 1.8m 钻孔灌注桩,每个拱座配置 4 根,全桥共 16 根;拱座间设置倒 T 形连系梁,其下附设 8 根直径 1.2m 辅助桩以增强整体性,如图 1 所示。

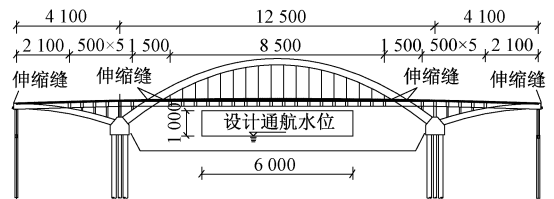


图 1 中山二桥主桥布置(单位:cm)

Fig. 1 Main bridge layout of the Second Zhongshan Bridge( unit: cm)

本桥原系杆双幅对称布置,单侧设置 20 束 12 根  $\phi 15.24$  钢绞线(配套 QM15-12 型锚具),锚固于边拱端横梁内,锚固区段长度约 11.88m。除锚固区域外,系杆主体部分与防护钢箱复合结构均嵌入桥面铺装层,沿拱肋轴线布置于吊杆平面两侧,每侧各配置 10 束,形成空间对称传力体系,如图 2 所示。

中山二桥于 2024 年 3 月突发拱肋与桥面连接处伸缩缝错位(位移量 12mm),溯源系桥面槽形板破损引发体系内力重分布,另外,根据 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》,拱桥系杆使用年限为 20 年,该桥系杆已明显超过设计使用年限。由于本桥拱座设计结构尺寸相对较小<sup>[8]</sup>,往年检测发现拱座明显结构性裂缝,虽经过粘贴钢板加固处理仍呈现发展演变趋势,拱座桩基础相对较薄弱。为保

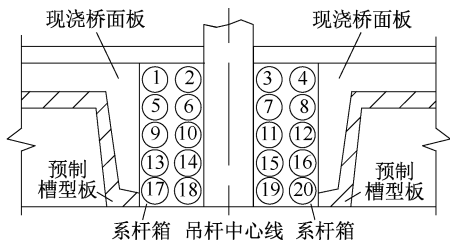


图 2 单侧旧系杆在横断面布置

Fig. 2 Single-side cross-section layout of the existing tie rods

证桥梁运营安全,决定在大修加固过程中全面更换全桥系杆。

## 2 系杆更换难点及方法

原系杆为不可更换结构,系杆锚固段被混凝土浇实,往年系杆检测时在拱脚处开窗发现系杆箱表层被混凝土填实,如图 3 所示,有可能存在系杆箱全跨长方向被混凝土浇实,因此旧系杆无法整体拔出而必须进行分段切割。此外,往年检测报告显示,通过割除系杆外包裹层后在钢丝表面粘贴应变片并切割该钢丝的方法,测得系杆应力水平在 58~787MPa 变化,平均值为 564.8MPa,说明系杆力离散性极大,部分系杆已超过设计允许应力 744MPa。考虑到旧系杆埋设于铺装层内,难以观测到其全貌及病害情况,为确保旧系杆通过切割方式完全释放应力,需在全桥多个位置进行切断,并观测切断后系杆钢绞线回缩量从而评估系杆力是否完全释放。



a 系杆开窗检测



b 系杆断丝法索力测试

图 3 往年检测系杆索力测试

Fig. 3 Detection of tie rod cable force test in previous years

由于局部与桥面系浇筑刚接,旧系杆无法在原位抽出,新系杆需重新设计锚固位置及布置形式。在新旧系杆索力传递过程中,为了确保旧系杆切断过程中索力传递平稳,一方面,需设置旧系杆分级切断、新系杆分级张拉的系杆力平稳传递方式;另一方面,需采取施工监控措施,及时监测旧系杆切断及新系杆张拉过程中拱肋受力及变形情况。为此,设计一种分级切断原有系杆而非原位安装新系杆方法进行全桥系杆更换,并制订合理的监测和调控方案进行全过程监控。该方法在国内尚属首例,其他类似工程如涪江三桥<sup>[7]</sup>虽也是采用逐步切断更换的方法,但其新系杆为原位安装,且有临时系杆及其支撑,同时本项目为应急抢修工程,工期紧,必须在 7d 内完成施工。

为此,设计系杆更换逐级转换方法,具体施工方法为:①在原位置桥面上方安装新系杆锚箱,在系杆穿孔肋处开孔后加固,安装系杆穿孔管道,找平系杆处桥面铺装层,以满足设计要求的系杆支撑架折角取值,安装好后进行预穿索;②在主拱与桥面交接处开窗,清理出可切断旧系杆的空间,安装限位器防止切断的旧系杆崩断伤人;③划分 20 个施工步长,先张拉新系杆后再切断对应根数的旧系杆,旧系杆按 5% 或 10% 的总数进行分阶段切断,逐步将永久系杆更换为可调节、可更换的成品系杆;④施工过程中严格控制拱脚水平位移 $\pm 1\text{mm}$ 、拱肋竖向位移 $\pm 10\text{mm}$  变化,按索力控制为主线、线形监测为引导、应力监测为辅助的施工控制方案实施。

## 3 系杆更换施工方案

系杆是本桥受力的最为关键载体,由于本桥结构状态不明、以往检测发现很多拱座结构裂缝及系杆索力高度不确定等问题,系杆更换施工的准确控制直接影响结构安全。为此,根据系杆更换施工难点分析及应对措施,制订如下系杆更换施工方案。

### 3.1 新系杆锚箱安装

新系杆锚固于两边拱肋端部向引桥延伸水平距离约 8m,增设钢结构系杆锚固箱与边拱肋连接,如图 4 所示。系杆锚固箱兼作系杆向下大角度转向的支撑构造,并需在边拱端部增设拱肋加固构件。施工步骤如下:①对系杆锚固箱处过渡跨局部补强及开孔,为防止切割端横梁腹板开孔对其横向刚度造成不可逆伤害,需对其开孔部位先进行补强;②安装新系杆锚固箱及保护罩,在工厂整体预制,到现场通过焊接安装;③在系杆锚固箱边箱浇灌 C50 微膨胀混凝土,通过预留的混凝土灌注孔进行灌浆,完成后用钢板封闭灌注孔。

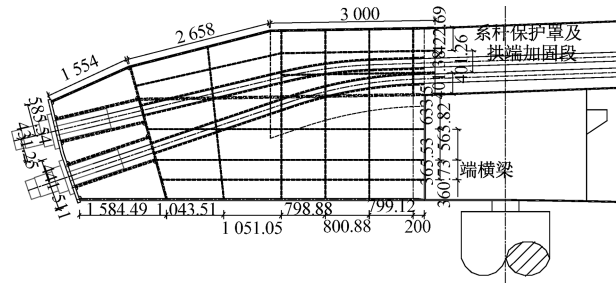


图4 新系杆锚固箱布置

Fig. 4 Layout of the anchoring box for the new tie rods

### 3.2 系杆支撑架及拱肋开孔处施工

系杆支撑架用于确保新系杆沿着桥面线形布置,纵桥向每个横梁中心上方设置1处,标准间距5m,如图5所示。在系杆穿越主拱两端出口及锚固箱预埋管出口等位置应额外设置,全桥共计168套。拱肋新系杆开孔位置需根据系杆支撑架高度确定,开孔周围进行加固,并安装应变计监测应力变化,确保局部板件受力安全。施工步骤如下:①对系杆通道范围内拟设置支撑架的点位桥面标高进行复测,保证每处支撑架相邻两段索体弯折角度 $\leq 0.2^\circ$ 且 $\geq 0.04^\circ$ ;②精确定位支撑架安装位置,保证全桥支撑架沿纵桥向呈一条直线且与锚固箱对齐;③通过地锚螺栓安装系杆支撑架,并复核支撑架标高,满足相邻两段索体弯折角度要求,可通过地脚螺栓微调;④确定开孔位置并进行边缘加固,安装拱肋开孔处导管,要求系杆与管壁无硬性接触,安装监测设备。

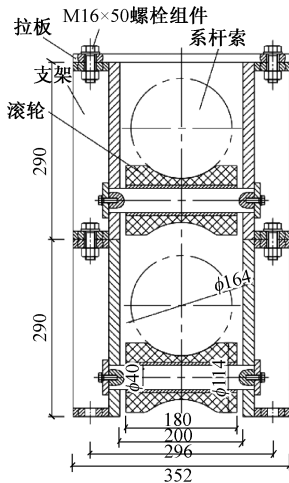


图5 新系杆支撑架典型横断面布置

Fig. 5 Typical cross-section layout of the supporting frame of the new tie rods

### 3.3 新系杆安装与张拉

新系杆采用环氧喷涂无粘结钢绞线成品索体,

每根系杆由55束 $\phi 15.2$ 环氧喷涂无粘结钢绞线组成,全桥共8根,如图6所示。钢绞线抗拉强度标准值1960MPa,破断索力15092kN。系杆牵引方法为前端用10t卷扬机牵引住索体牵引头,后端用汽车式起重机进行放盘和调整进口高度,两者相互配合缓慢前行,施工步骤如下:①通过起重机将成品索卷制的索盘上架;②采用设置在另一端的10t卷扬机的钢丝绳与索头连接并进行牵引;③剥皮和清洗,在进入锚固端的预埋管前,需根据测量的索两端锚固的实际距离,并结合系杆索出厂前的长度标识,计算出两端PE层剥除长度,将其防腐层清洗干净方可牵引到位;④安装张拉千斤顶,根据锚具规格选择合适配套的张拉连接套与内衬套、张拉千斤顶等设备;⑤进行试张拉,张拉5%设计合力观察是否出现异常,可及时调整。每根新系杆张拉力根据旧系杆在系杆更换施工阶段有限元仿真计算索力总值确定为7000kN,采用两端张拉形式,严格按南北、东西同步进行。考虑到系杆自重引起的垂度效应,第1批次在所有系杆张拉至合力的5%时进行第1次旧系杆切断,后续张拉为N1/N4(S1/S4),N2/N3(S2/S3)交替进行,每次张拉力均为新系杆合力的5%。

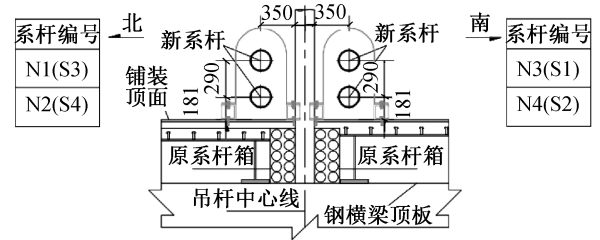


图6 新系杆典型横断面布置

Fig. 6 Typical cross-section layout of the new tie rods

### 3.4 旧系杆切割

根据旧桥设计图纸,旧系杆属于无粘结钢绞线,仅在锚固区域被混凝土填实;然而,往年检测发现在开窗检测部位系杆箱内灌满混凝土,旧系杆是否完全无粘结存疑。为了旧系杆切割可完全释放索力,全桥暂定4处切割位置,分别在2片主拱与桥面连接位置进行系杆开窗,如图7所示,切割时南北、东西对称进行,施工步骤如下:①确定开窗位置,凿除其所需切割工作空间范围内混凝土,使旧系杆完全暴露;②安装防弹索夹,以防止钢绞线切断反弹伤人;③根据施工工序切割相应旧系杆数量,根据操作空间从底下往桥面分批次切割。需要注意的是,由于钢绞线在纵向存在交错问题,2处开窗

位置切割同一位置钢绞线并不能保证是同一根,因此实际操作过程中还需根据在一个开窗位置切割钢绞线时另一开窗位置钢绞线是否下垂来判断系杆力是否卸载,如果呈现显著下垂,说明系杆力已全部卸载,只需一侧选择 1 个开窗口切割;如果未下垂,需在 4 个开窗口同步切割。

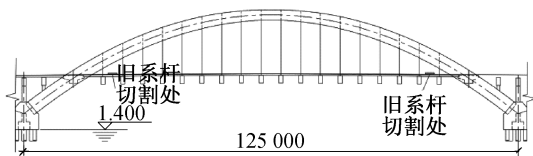


图 7 旧系杆切割位置纵向分布

Fig. 7 Longitudinal distribution of cutting position of the existing tie rods

#### 4 施工监控有限元分析

根据原设计图纸与大修加固设计图纸,在有限元软件 MIDAS Civil 中仿真旧桥施工全过程及大修施工全过程,并准确模拟系杆更换施工阶段,可得到各项参数变化的理论值,指导现场施工监测与控制。涵盖原旧桥施工过程及大修加固施工过程的中山二桥施工监控有限元模型如图 8 所示。

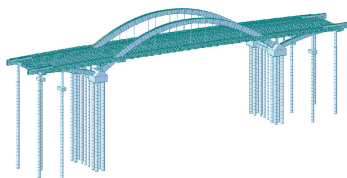


图 8 施工监控有限元模型

Fig. 8 Finite element model for construction monitoring

##### 4.1 系杆施工方案验证

系杆更换阶段为大修加固的关键阶段,在有限元模型中详细模拟新旧系杆索力转换过程(切割与张拉均为累计量):新系杆全部张拉至 5%→旧系杆切割 1×2 束→新系杆 N1/N4(S1/S4)张拉至 15%→旧系杆切割 2×2 束→新系杆 N2/N3(S2/S3)张拉至 15%→旧系杆切割 3×2 束→…→全部张拉至 100%→旧系杆切割 20×2 束。根据上述施工过程仿真分析,主要监测参数变化如表 1 所示。可看到拱座水平位移增量在  $\pm 0.8\text{mm}$  变化,拱肋及桥面竖向位移增量均在  $\pm 2.4\text{mm}$  变化,拱肋应力增量为  $65\text{MPa}$  以内,均满足控制要求。吊杆绝对应力在  $305\text{MPa}$  以内,系杆绝对应力在  $955\text{MPa}$  以内,满足安全系数要求。需说明的是,有限元仿真模拟的是静态索力传递,实际旧索切断过程中可能存在明显动力效应,需密切关注切断瞬间结构应力变化。

表 1 系杆更换过程中主要监控指标变化

Table 1 Variation of main monitoring parameters during tie rod replacement

关键监测参数	测点位置	量值	备注
桥面竖向位移/mm	主跨跨中	$[-2.4, 2.2]$	增量
拱肋竖向位移/mm	主跨跨中	$[-1.5, 2.0]$	增量
拱座水平位移/mm	主拱基座	$[-0.8, 0.7]$	增量
拱肋应力/MPa	所有	$[-65.1, 20.2]$	增量
吊杆应力/MPa	所有	$[273, 305]$	绝对量
系杆应力/MPa	所有	$[925, 955]$	绝对量

#### 4.2 系杆更换敏感性分析

往年检测数据显示旧系杆钢绞线的应力不均匀性系数平均为 30%,为考虑实际旧系杆索力分布不均匀性,有限元仿真分析将其中 1 根旧桥系杆切割阶段的钢绞线数量翻倍,新系杆张拉力不变,分析拱肋与桥面结构在该阶段旧系杆拆除前后的受力情况,如表 2 所示。由结果可知,拱肋及桥面竖向位移增量在  $\pm 1.0\text{mm}$ ,拱脚水平位移增量在  $\pm 0.6\text{mm}$ ,拱肋与钢纵横梁几乎无应力变化,说明即便考虑非常明显的旧系杆索力不均匀,变化最大的是拱脚水平位移,因此施工过程中只要紧密关注拱脚水平位移变化并控制在  $\pm 1.0\text{mm}$ ,结构受力安全可得到保障。

表 2 旧系杆索力不均匀对结构受力影响

Table 2 Influences of non-uniform cable forces of the existing tie rods on structural behavior

关键参数	测点位置	量值	备注
桥面竖向位移/mm	所有	$[-0.6, 0.2]$	增量
拱肋竖向位移/mm	所有	$[-0.4, 0.4]$	增量
拱座水平位移/mm	主拱基座	$[-0.6, 0.6]$	增量
拱肋应力/MPa	所有	$[-0.5, 1.5]$	增量
钢横梁应力/MPa	所有	$<\pm 0.5$	增量
钢纵梁应力/MPa	所有	$<\pm 0.5$	增量

#### 5 施工过程控制

##### 5.1 施工监控方案

根据系杆更换施工方案及有限元分析结果,结合 JTG/T 3650-01—2022《公路桥梁施工监控技术规范》<sup>[9]</sup>,明确了系杆更换以“索力控制为主线、关键点位移控制为主要措施、关键点结构应力状态为辅助参考”的施工监控方案。“索力控制为主线”是通过调整旧系杆切割钢绞线数量或新系杆张拉力大小来进行结构状态调整,“关键点位移控制为主要措施”是以拱座水平位移在  $\pm 1.0\text{mm}$ 、拱肋及桥面跨中竖向位移在  $\pm 10\text{mm}$  为索力调整主要依据,“关键点结构应力状态为辅助参考”是以拱肋跨中及四分之点应力变化增量作为结构状态辅助判断依据。为保障系杆力平稳转换,在系杆更换每个工序都需关

注拱座水平位移、桥面拱肋跨中竖向位移、拱肋四分点及跨中应力状态;在系杆更换比例达到 30%, 50%, 80%, 100% 时, 还需进行全桥通测。

## 5.2 现场施工情况及方案调整

实桥在 6d 内完成了系杆更换。在旧系杆切除过程中, 听见明显的钢绞线清脆断裂声, 钢绞线回缩非常明显, 实际回缩量与理论计算回缩量平均约在 85%, 说明钢绞线属于无粘结状态, 因此后续施工中每侧旧系杆只需在 1 个开窗位置进行断裂, 旧系杆钢绞线的断口及回缩情况如图 9 所示。

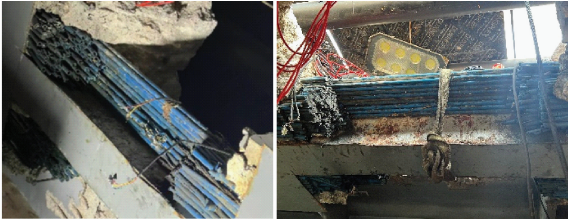


图 9 旧系杆切割断口及回缩情况

Fig. 9 Cutting fracture and retraction of the existing tie rods

在系杆更换施工阶段达到 30% 时进行全桥通测, 发现桥面跨中竖向位移 12.09mm (上挠), 超过控制阈值, 而拱肋跨中竖向位移 9.8mm (上挠), 接近控制阈值, 2 个拱座分别向河两岸水平位移 0.3, 0.6mm, 在控制阈值内, 结构应力状态均在理论值范围内。结合现场实际工况进行分析, 推断原因为切断旧系杆累计释放索力小于张拉新系杆累计索力, 因此在下一批次施工中转换工序, 先切断一批旧系杆再张拉新系杆, 通过上述调整使得桥面线形及拱肋线形有所缓和, 施工过程中持续关注关键控制指标的变化。同时, 新系杆张拉力完成 50% 时, 全桥通测显示拱肋跨中竖向变形 9.2mm (上挠)、桥面跨中竖向变形 8.1mm (上挠), 接近控制阈值, 其余监测参数在合理范围内; 为了保障线形控制及结构安全, 在进行下一批次施工前, 先切断一束旧系杆再张拉新系杆。

## 5.3 最终完成结果

在全桥施工过程中进行了 3 个批次转换调整, 因此最终的新系杆张拉力也需调整。在所有新系杆张拉至 75%、旧系杆切断第 18 束时, 桥面跨中竖向位移最大为 11.5mm (上挠)、拱肋跨中竖向位移最大为 9.0mm (上挠), 为使桥面及拱肋上挠趋势减弱, 最终决定将新系杆最终张拉力定为原来设定张拉的 80%。在所有新系杆张拉至 80% 且旧系杆完全拆除时, 桥面竖向位移最大 10.15mm (上挠), 超出控制阈值 0.15mm, 可认为基本满足要求; 拱肋竖

向位移最大 6.6mm, 在控制阈值内; 拱座水平位移相对稳定, 均在  $\pm 0.5$ mm; 关键应力监测参数在整个系杆更换全过程的变化量如表 3 所示, 可看到拱肋应力变化较小且低于理论计算值, 系杆锚固位置应力最大 68MPa, 也低于理论计算值。以上最终系杆更换完成后位移及应力监测结果显示, 本桥达到预期系杆更换平稳索力转换要求, 旧系杆实际索力只有理论计算的 80%, 原因可能在于系杆更换前实际桥面卸除恒载高于理论计算。综上所述, 所提出的施工及监控方案很好地保障了系杆更换施工安全。

表 3 系杆更换施工完成后结构应力状态变化

Table 3 Variation of structural stress state after the entire replacement of the existing tie rods MPa

关键监测参数	测点位置	量值	备注
拱肋应力	所有	[-19.0, 21.2]	增量
拱肋开孔应力	所有	[-23.1, 15.4]	增量
拱座应力	所有	[-6.7, 5.9]	增量
系杆锚固应力	所有	[-68.1, 19.2]	增量

## 6 结语

本文依托中山二桥 (41+125+41)m 中承式无风撑钢筋混凝土系杆拱桥大修加固工程, 研究了中承式拱桥系杆更换切断方案与施工监控技术, 详细介绍了切断非原位系杆更换的技术难点、施工方案、有限元分析、监测内容与控制方法。主要研究结论如下。

1) 新旧系杆索力平稳转移是施工宗旨, 提出了新系杆分级张拉、旧系杆分级切断、新旧系杆每级索力相等的施工方案, 新系杆通过调整支撑脚保证相邻索段弯折角度  $\leq 0.2^\circ$  且  $\geq 0.04^\circ$ 。

2) 施工监控有限元分析表明, 采用分级张拉与分级切割交叉作业的施工方案, 拱座水平位移增量在  $\pm 0.8$ mm、拱肋及桥面竖向位移增量在  $\pm 2.4$ mm、拱肋应力增量在 65MPa。考虑旧系杆极端索力不均匀情况下, 仅拱座水平位移变化达到 0.6mm, 其余影响很小, 说明施工中可主要监控拱座水平位移。

3) 建立了“索力控制为主线、关键点位移控制为主要措施、关键点结构应力状态为辅助参考”的系杆更换施工监控方案, 通过调整新系杆张拉力大小控制结构状态, 通过拱座水平位移在  $\pm 1.0$ mm 和拱肋及桥面竖向位移在  $\pm 10$ mm 作为索力调整依据, 以拱肋应力监测作为辅助判断。

4) 实桥在 6d 内完成系杆更换, 施工过程中由于实际旧系杆索力低于理论计算值, 进行了 3 次工序调整, 最终新系杆索力按理论值的 80% 作为系杆更换阶段最终索力, 全部系杆更换后拱肋与桥面竖向位移、拱座水平位移、拱肋应力均达到预期状态。

(下转第 81 页)