

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.05.026

钢管混凝土连拱桥拱肋拆除施工控制 关键技术及工程应用

杨继承, 魏家乐, 余 曾, 雷波涛

(陕西交控通宇交通研究有限公司, 陕西 西安 710118)

摘 要: 大跨径危旧钢管混凝土连拱桥成桥拱肋内力复杂, 拆除过程体系多次转换, 连拱效应突出, 且受外界条件影响十分敏感, 施工风险高, 为保证拆除过程的安全, 有必要对拱肋拆除施工控制关键技术进行研究。文章以某桥为工程背景, 拟定了拱肋变形、应力、临时索索力的拆除控制原则, 制定了迭代仿真模拟计算方法, 结合温度、索力参数敏感性分析结果和拆除过程的关键风险点, 提出了拆除前拱肋刚度识别、拱顶打开应力监测与控制、全过程临时索索力检测和关键项目实施监测技术等四项措施。依托工程按照文中提出的施工控制技术顺利完成了全桥拱肋的拆除, 实施效果良好, 可为类似工程提供参考。

关键词: 钢管混凝土连拱桥; 拱肋拆除; 施工控制; 斜拉扣挂法; 迭代法

中图分类号: U445.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)05-0166-06

Key Technologies and Engineering Application of Arch Rib Demolition Construction Control of Concrete-filled Steel Tube Double Arch Bridge

YANG Jicheng, WEI Jiale, YU Zeng, LEI Botao

(Shaanxi Transportation Holding Group Tongyu Transportation Research Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710118, China)

Abstract: The internal force of the arch rib of the long-span dilapidated concrete-filled steel tubular double arch bridge is complex. The demolition process system has been converted many times which means the double arch effect is prominent. It is very sensitive to external conditions, and the construction risk is high. In order to ensure the safety of the demolition process, it is necessary to analyze the key technology of arch rib demolition construction control. Taking a bridge as an engineering background, this paper formulates the demolition control principles of arch rib deformation, stress and temporary cable force, and formulates the iterative simulation calculation method. Combined with the sensitivity analysis results of temperature and cable force parameters and the key risk points in the demolition process, four measures are proposed, including the identification of arch rib stiffness before demolition, the monitoring and control of arch crown opening stress, the detection of temporary cable force in the whole process and the implementation monitoring technology of key projects. Relying on the construction control technology proposed in this paper, the demolition of the arch ribs of the whole bridge was successfully completed, and the implementation effect is good, which can provide reference for similar projects.

Keywords: concrete-filled steel tube double arch bridge; demolition of arch rib; construction control; cable-stayed method; iterative method

钢管混凝土拱桥因其造型优美、跨越能力强、经济性较好的优点在我国桥梁建设上得到迅猛发展, 目前在役大跨径钢管混凝土拱桥数量远超同等跨径钢筋混凝土拱桥和钢拱桥数量^[1-4]。然而, 随着日

益增长的交通压力和材料的不断劣化, 早期修建的部分钢管混凝土拱桥已不能满足实际通行需求, 必须进行拆除重建。大跨径钢管混凝土拱桥拆除可采用爆破法、支架法和斜拉扣挂法^[5-7], 其中, 斜拉扣

收稿日期: 2022-05-21

修稿日期: 2022-06-17

基金项目: 陕西交通运输厅 2021 年度交通科研项目“基于缆索吊装施工的大跨径钢管混凝土连拱桥拆除控制关键技术研究”(21-65K)

作者简介: 杨继承(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事大跨径桥梁设计和施工控制研究相关工作。E-mail: 357411615@qq.com

挂法因施工过程受周边地形影响小,缆索扣挂系统施工技术成熟,且能够实现环境保护的零排放要求而受到青睐^[8-9]。

大跨径钢管混凝土拱桥新建与拆除都可采用斜拉扣挂法施工,但拱肋受力存在较大区别,新建时钢管拱肋施工一般从零开始逐段拼装、跨中合龙、拱脚封铰固结到灌注管内混凝土,整个过程受力明确,拱肋及临时索设计及施工控制简单,技术成熟^[10-12]。而危旧钢管混凝土拱桥拆除时钢管与管内混凝土已形成整体,施工时不能完全按照新建的逆序进行拆除,拱肋拆除时施工控制存在诸多难点,尤其是大跨径钢管混凝土连拱桥拱肋拆除过程中连拱效应突出,施工过程安全风险高^[13-14],因此十分有必要对该类桥梁拱肋拆除施工控制关键技术进行专门研究。

1 工程背景

1.1 桥梁概况

某桥为 2 × 120 m 中承式钢管混凝土拱桥,是横跨汉江的重要桥梁,桥面横向布置为 0.25 m(护栏) + 2.0 m(人行道,含吊索区) + 9.0 m(行车道) + 2.0 m(人行道,含吊索区) + 0.25 m(护栏),全宽 13.5 m,桥型布置图如图 1。钢管混凝土主拱矢跨比 1/5,拱肋截面为哑铃形,总高度 2.1 m,上下弦杆

采用 Φ820 × 12 mm 钢板卷制形成;吊杆采用 110Φ5 高强碳素钢丝;桥面系为纵向 T 梁置于横梁上,简支体系结构;两端拱座采用倒 V 形结构,中墩为空心薄壁墩、承台桩基础。桥梁设计荷载为汽-20,挂-100。

该桥近期检测发现钢管混凝土拱肋横向偏位、桥面线形异常,桥梁承载能力显著降低,整体评价为四类桥。经对该桥处治方案展开多次论证和专家评审,确定本桥采用拆除上部结构,加固利用下部结构,新建相同跨径钢管混凝土拱桥的改造方案。

1.2 拆除方案

该桥位于汉江水资源环境保护区,附近有一大型水电站,综合考虑原桥拆除和新建桥梁施工安全、环保、经济性要求,经充分比选确定采用斜拉扣挂法施工。为解决拱肋拆除时中墩临时扣塔施工难度大的问题,采用水平临时索对拉替代常规的扣塔系统。同时为加强拆除过程双悬臂结构的稳定性,拟在中墩两侧增加多对缆风索,具体的斜拉扣挂系统布置如图 2 所示,拱肋从西至东共划分为 I ~ IV 区,边跨单侧扣索共 5 组(编号为 A - E),中间水平拉索 5 组(编号为 H - K 及临时索 L),风缆索 4 组(编号为 H - K)。单个主拱拱肋共划分为 23 个吊装节段,单个节段最大长度 7 m,最大重量约 23 t。拆除总体施工流程见表 1。

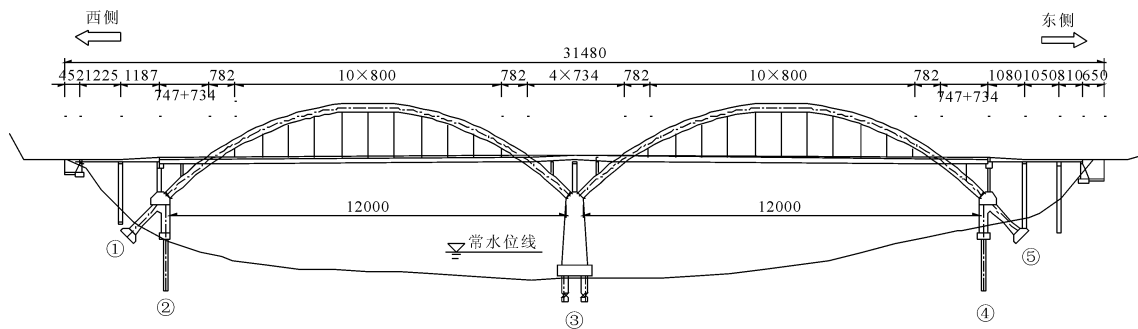


图 1 桥型布置图

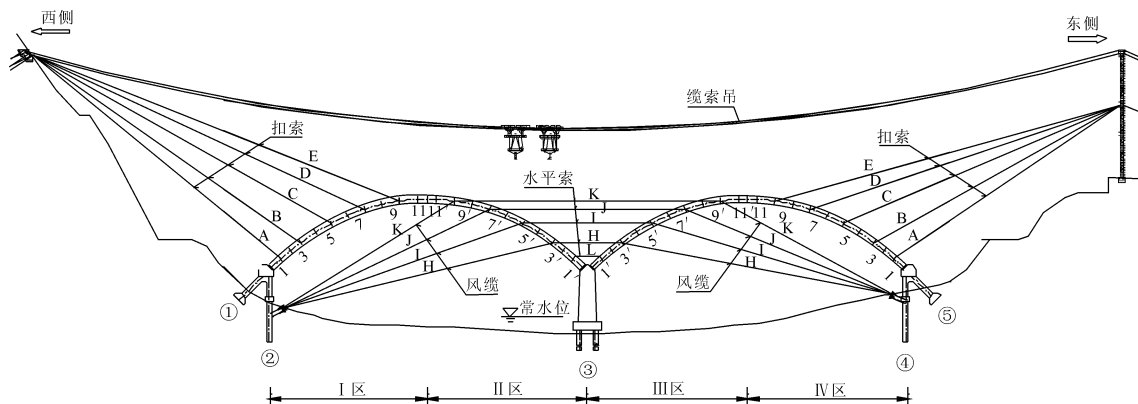


图 2 斜拉扣挂系统布置图

表 1 拆除总体流程图

步骤	工作内容
1	采用缆索吊对称拆除人行道、栏杆、桥面系纵梁、横梁
2	拆除拱上立柱、吊杆,形成钢管混凝土裸拱
3	张拉 I 区和 IV 区扣索 A,张拉 II 区和 III 区水平索 L
4	张拉 I 区和 IV 区扣索 B,张拉 II 区和 III 区风缆 H,水平索 H
5	张拉 I 区和 IV 区扣索 C,张拉 II 区和 III 区风缆 I,水平索 I
6	张拉 I 区和 IV 区扣索 D,张拉 II 区和 III 区风缆 J,水平索 J
7	张拉 I 区和 IV 区扣索 E,张拉 II 区和 III 区风缆 K,水平索 K
8	拆除拱顶横撑,打开拱顶
9	拆除 I 区左侧拱肋 11#节段, II 区左侧拱肋 11#节段
10	拆除 IV 区左侧拱肋 11#节段, III 区左侧拱肋 11#节段
11	拆除 I 区右侧拱肋 11#节段, II 区右侧拱肋 11#节段
12	拆除 IV 区右侧拱肋 11#节段, III 区右侧拱肋 11#节段
13	采用相同方法依次拆除 I 区 - IV 区 10#节段
14	拆除左侧 I 区 - IV 区扣索 E、风缆 K 和水平索 K
15	拆除左侧 I 区 - IV 区拱肋 9#节段
16	拆除右侧 I 区 - IV 区扣索 E、风缆 K 和水平索 K
17	拆除右侧 I 区 - IV 区拱肋 9#节段
18	采用相同方法对称完成剩余节段的拆除直至结束

2 钢管混凝土连拱桥拱肋拆除风险点

钢管混凝土连拱桥拱肋拆除是全桥拆除的核心,主要涉及拱顶打开、拱肋节段拆除两大步骤,施工过程受力体系由“连拱”转变为“悬臂梁”,结构体系变化大,受力复杂,技术含量高,施工风险大。总体来讲,大跨径钢管混凝土连拱桥拱肋拆除风险点有以下几个方面:

(1)连拱内力状态难以准确模拟。大跨径危旧钢管混凝土拱桥拆除时一般已运营多年,钢管内混凝土收缩徐变发生完成,且可能存在钢管与混凝土脱空、拱肋偏移、基础不均匀沉降等多种病害,部分病害对结构的内力状态产生重大影响,但影响程度难以准确计算,无法获得裸拱状态结构的真实内力。但是,采用斜拉扣挂法拆除拱肋,只有较为准确的掌握拱肋内力状态和刚度特性,才能有效指导拆除施工。

(2)体系变化复杂,施工工序多。钢管混凝土拱肋拆除时结构体系由拱受力状态转变为多点弹性支撑的悬臂梁受力状态,拆除过程体系不断变化,内力和位移变化十分剧烈。因钢管混凝土拱肋整体断面单位长度重量大,缆索吊吊装能力受限,单个拱肋节段长度相对新建划分长度较短,节段个数多,施工步骤多,临时索索力和拱肋受力在整个过程变化十分复杂。

(3)连拱拆除受力复杂,临时索索力影响因素多。连拱拆除涉及斜拉扣索、水平索、缆风索等,各临时索索力除影响拱肋应力、桥墩及基础应力、拱肋整

体稳定性、局部稳定性外,本身自身索力也受到扣塔刚度、背索索力、温度荷载、风荷载等的影响,且双连拱拆除过程还伴随着结构和荷载的横桥向和纵桥向的不对称性。施工控制综合考虑因素多,难度很大。

(4)施工监测工作量庞大,技术要求高。钢管混凝土连拱桥斜拉扣挂拆除施工监测不仅涉及桥梁结构本身,还包括扣塔变形、扣索及风缆索力、缆索吊索塔、锚碇位移等,现场作业量大,采用常规方法及时性和准确性很难得以保证。同时,主拱打开、拱肋节段拆除、扣索卸载等关键步骤伴随内力的急剧释放,安全风险高,必须制定相应的控制措施,保证结构平稳过渡,施工控制要求高。

鉴于大跨径钢管混凝土连拱桥拱肋拆除在结构计算、施工工序、大临设施、现场监测等多方面相比常规桥梁复杂,且存在多种不确定性因素,施工过程风险高,因此,为能顺利实现拱肋的安全拆除,需对该类桥梁施工控制技术展开专门研究。

3 施工控制关键技术

3.1 施工控制基本原则

钢管混凝土连拱桥拱肋拆除有限元计算是安全拆除的前提,在拱肋拆除过程中,结构受力复杂,影响因素多,涉及结构构造、受力、经济等方面,在遵循总体对称、均衡的基础上,针对背景项目这一实际工程,通过对拆除过程的控制条件进行梳理,以控制拆除过程结构安全性和人员安全为主要目标,制定了详细控制基本原则,见表 2。

表 2 控制基本原则

项目	控制指标
拱肋节段变形	围绕平衡位置(裸拱位置)上下波动
主拱、拱座及基础应力	最大压应力、最大拉应力小于规范允许值
临时索索力	单根钢绞线最小索力不小于 30 kN(保证不脱落),且最大索力不大于 104 kN(安全系数为 2.5)
各临时索张拉、卸载次数	施工全过程张拉、卸载各 1 次
拱顶打开阶段位移	合龙口位移控制在 0 mm ~ -15 mm 以内,且合龙口变形同向

3.2 施工控制计算方法

综合考虑斜拉扣挂施工特点、钢管混凝土连拱拱肋拆除施工难点和本桥拆除的总体步骤,制定了施工控制计算方法和流程。如图 3 所示,首先按照原桥竣工设计图和实际施工流程,建立全桥模型,得到成桥理论状态。然后结合桥面系拆除过程实测结构响应,修正原桥理论模型,使有限元计算能够更加

真实反应实桥状态。拱肋拆除过程的仿真模拟采用迭代法进行计算,即假定一组初始临时索索力,按照拆除步骤进行逐一模拟,若计算结果不满足既定控制原则时调整临时索力,重新进行拆除过程有限元计算,不断反复迭代,直到计算结果满足基本原则,仿真计算结束,并提取相应数据,指导现场控制。

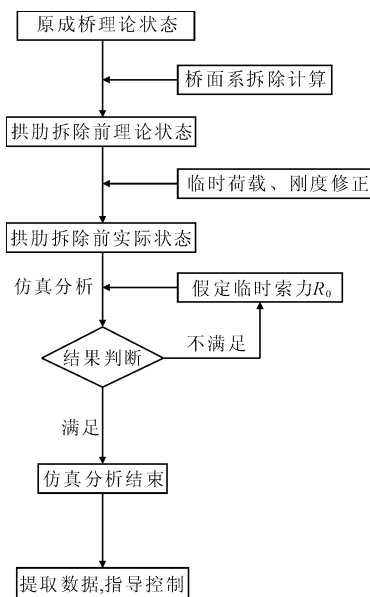


图3 施工控制计算流程图示意图

3.3 施工控制关键参数研究

因影响拱肋内力状态的混凝土收缩徐变、基础沉降等因素为既定事实,难以准确量化,不属于主动控制目标,而温度对整个结构系统影响敏感,为实现主动控制,实施前对索力相关影响因素进行分析,并根据敏感性程度制定不同的施工措施,以控制安全风险。

(1) 温差效应分析。拱肋打开时环境温度与原桥合龙温度存在偏差,结构的内力状态相应存在差异,为控制拱肋打开时安全风险,施工控制通过有限元对不同温度偏差进行了模拟。结果表明,温度对拱肋合龙口和钢管的应力影响基本呈线性关系,二者温度每相差 10°C ,合龙口相对变形相差 34 mm ,拱肋应力最大相差约 5 MPa 。

悬臂节段拆除过程中,受昼夜温度影响,临时索索力和拱肋应力存在较大变化,施工控制应充分考虑极端温差对结构安全的风险。有限元分析结果表明,悬臂阶段每升温 10°C ,边拱悬臂端最大竖向变形 -24 mm ,拱脚上缘应力 $+12\text{ MPa}$,中拱悬臂端最大竖向变形 $+10\text{ mm}$,拱脚上缘应力 $+9\text{ MPa}$ 。因此,拆除过程结构安全系数应留有一定的富余量,避

免局部应力超限失稳。

(2) 临时索索力控制分析。拱肋悬臂过程节段拆除过程为多点支撑的曲线梁桥,为便于后续施工控制,对单位最外侧索力对悬臂端位移影响程度进行分析,见表3。有限元分析表明,相对中跨水平索索力影响程度,边拱扣索索力对悬臂端位移十分敏感,最外侧扣索索力偏差 10 kN (约 1.3%)将导致悬臂端部 11 mm 位移偏差。因此,为提高施工控制精度,施工过程应加强边拱扣索索力的精确控制。

表3 索力变化 10 kN 对悬臂端位移影响 单位:mm

工况	边拱	中拱	中拱	边拱
E/K索	11	2	2	8
D/J索	4	1	1	3

3.4 施工监测与控制措施研究

为确保钢管混凝土拱肋的安全拆除,作者根据拆除过程的风险点展开监测措施研究,创新性的提出了拱肋刚度检测技术、裸拱打开拱肋应力监测与控制技术、索力快速检测技术和关键部位自动监测技术四大措施。

(1) 拱肋刚度检测技术。根据《钢管混凝土拱桥技术规范》^[15](GB 50923—2013)4.3.3条,钢管混凝土结构的刚度设计计算时,压缩刚度不考虑混凝土刚度的折减,弯曲刚度按照混凝土刚度折减系数为 0.6 考虑,这一规范取值综合了相关国内外规范取值和构件的试验结果。但对于危旧钢管混凝土拱桥,钢管混凝土结构的自身病害程度参差不齐,采用规范刚度取值难以反映结构的真实情况,为能较为准确的识别拱肋刚度,作者提出基于静力和动力实测参数的刚度识别方法。静力方面主要通过对对比桥面系拆除过程的应力、变形的实测值和理论值,得到钢管混凝土拱肋静力刚度的修正系数。该阶段需要采集的数据包括环境温度、桥面系重力、拆除前后钢管混凝土拱肋应力、拱肋几何线形等。动力方面主要实测钢管混凝土裸拱状态的自振频率,并与结构的理论频率进行对比,得到拱肋的动力刚度修正系数。综合考虑拱肋的静力刚度修正系数和动力刚度修正系数,对理论计算模型的拱肋刚度进行修正,可有效提高拱肋拆除的施工控制精度。

(2) 裸拱打开拱肋应力监测与控制技术。为避免拱顶打开过程内力瞬间释放引起安全风险,裸拱打开前,本桥在拱顶处设置了临时钢支撑(钢管混凝土拱肋上下缘焊接双拼工字钢),如图4所示,并布置应力传感器,切割过程中钢管混凝土拱顶截面

内力将转化到上下缘双拼工字钢承担,根据传感器实测应力和拱肋变形推测当前合龙段内力状态,若合龙段内力与目标值偏差较大,则微调扣索索力使之达到控制范围。采用上述方法依次逐个打开左幅、右幅四个拱肋拱顶,且将智能钢支撑内力调整至目标范围后,再对称拆除各钢支撑,降低了裸拱内力不确定引起的风险。

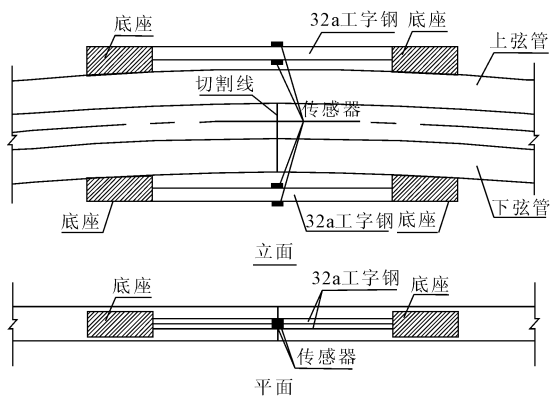


图 4 临时钢支撑示意图

(3) 多种索力检测技术相结合。钢管混凝土拱桥拱肋拆除涉及的临时索包括扣索、水平索及缆风索,各临时索均由多股钢绞线形成,施工时各工况若全部对临时索钢绞线进行逐一检测,工作量十分庞大,采用常规方法难以快速、准确实现。为解决这一问题,本桥索力检测充分利用毫米波雷达可多根拉索同时远程测试拉索频率的优势,实现了快速的目标^[16]。为达到索力的准确测量,作者提出了多种索力检测技术相结合的具体办法,即张拉时以千斤顶读数为基础,张力测试仪进行校核,然后将校核后结果对毫米波雷达技术测试数据进行标定,后续各工况中直接通过毫米波雷达技术实现多根索力同时检测,在保证检测结果精度的同时,也提高了工作效率。

(4) 关键项目实时监测技术^[17-19]。拱桥拆除的大型临时设施为扣挂吊装系统,该系统的安全是拱肋成功拆除的前提。针对锚碇位移、扣塔偏位、扣塔关键截面应力等项目,为满足监测的及时性和持续性要求,提出了自动化监测系统,如图 5。该自动化监测系统由传感器系统、数据采集子系统、数据传输子系统、数据库子系统、数据处理与控制系统、安全评价和预警子系统组成,通过各层相互协调,实现远程自动化监测、自动化采集和自动预警的功能。

4 工程应用

依托工程以本文提出的施工控制计算方法、施

工工艺和监测措施为指导,按照总体对称、均衡的拆除顺序,以位移控制为主,兼顾扣索索力的施工控制原则予以实施(钢管混凝土拱肋打开前及节段拆除过程见图 6 和图 7),并控制扣挂系统等大型临时设施在拆除过程中的位移及应力,实现了拱肋的顺利拆除。



图 5 自动监测处理系统



图 6 钢管混凝土拱肋打开前



图 7 钢管混凝土拱肋节段拆除

本桥拱肋拆除前各临时索初张索力见表 4,拆除过程 II 区右幅和 IV 区左幅主拱节点随施工步骤的实测变形见图 8 和图 9。全桥拱肋拆除过程拱肋节段变形及扣索索力与计算值接近,桥墩及拱座未出

现拉应力,未出现位移突变导致的人员安全和结构失稳事故,施工控制达到了预期效果。

表4 拱肋拆除各临时索初张索力 单位:t

编号	索力	编号	索力	编号	索力
西-A	15	L	27	东-A	17
西-B	28	H	46	东-B	32
西-C	37	I	106	东-C	44
西-D	51	J	152	东-D	60
西-E	75	K	200	东-E	102

注:缆风绳初张索力均为14 t。

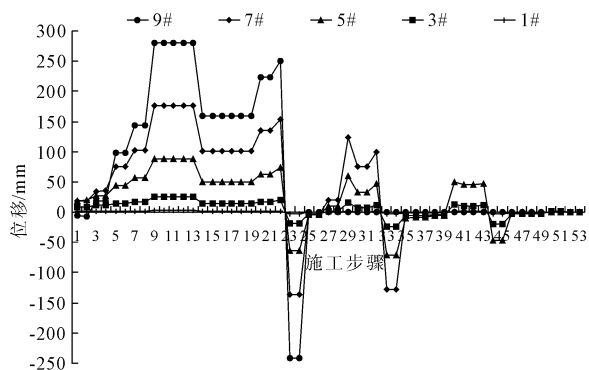


图8 拆除过程Ⅱ区右幅主拱节点实测位移时程图

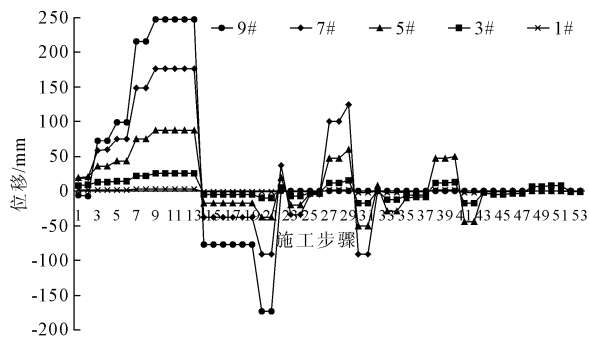


图9 拆除过程Ⅳ区左幅主拱节点实测位移时程图

5 结论

(1) 以安全性为施工控制目标,拟定了拱肋拆除施工控制的基本原则,并依照该原则提出了拱肋拆除施工控制计算方法,为拱肋的安全拆除提供了理论基础。

(2) 敏感性参数分析表明,温度对拱肋打开和悬臂拆除阶段的钢管拱肋位移、应力影响均较为敏感,施工过程可通过临时索索力的精确调整进行控制。

(3) 基于拱肋拆除的工艺特点和可能的风险因素,创新性的提出了基于实测动力和静力参数的拱肋刚度修正技术和裸拱打开拱肋应力监测与控制方法,并将索力张力仪检测技术、毫米波雷达索力检测

技术和自动实时监测技术应用用于本项目,进一步保证了拆除过程的安全性。

参考文献:

- [1] 陈宝春,韦建刚,周俊,等.我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J].土木工程学报,2017,50(6):50-61.
- [2] 赵人达,张正阳.我国钢管混凝土劲性骨架拱桥发展综述[J].桥梁建设,2016,46(6):45-50.
- [3] 湛润水,胡剑芳.公路旧桥加固技术与实例[M].北京:人民交通出版社,2002:180-192.
- [4] 陈敏,任红伟.桥梁加固施工与质量控制[M].北京:人民交通出版社,2020:1-6.
- [5] 金宏忠,高巍,来猛刚.桥梁拆除工程分析探讨[J].中外公路,2011,31(3):213-216.
- [6] 董志远,陈磊,全学军.爆破与机械拆除技术在下承式预应力混凝土系杆拱桥拆除中的应用[J].天津建设科技,2020,30(6):14-16.
- [7] 李琦,杜斌.基于数值模拟的桁式组合拱桥拆除方案对比分析[J].中国水运(下半月),2022,22(3):101-103.
- [8] 熊鹰.猛洞河大桥缆索吊装方案设计和施工[J].公路工程,2013,38(5):204-206,220.
- [9] 吴海军,何立,王邵锐,等.基于无应力状态法的大跨钢管混凝土拱桥拱肋线形控制方法[J].桥梁建设,2020,50(6):20-26.
- [10] 王生泽,李明,李利,等.拱桥斜拉扣挂施工扣塔结构力学分析[J].安徽建筑大学学报,2020,28(6):17-23.
- [11] 王海峰.郑万铁路奉节梅溪河双线特大桥主桥结构设计及施工[J].施工技术,2021,50(5):68-71,104.
- [12] 逢锦程.500 m级钢管混凝土拱桥吊扣施工关键技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2020.
- [13] 胡永.5跨连拱桥保护性拆除方案设计[J].铁道工程学报,2008,25(9):39-43,57.
- [14] 金和伟,廖碧海.多跨连拱桥设计与施工关键技术[J].施工技术.2014(S1):273-276.
- [15] 钢管混凝土拱桥技术规范:GB 50923—2013[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [16] 韩伟,王余鹏,王亮.基于两种无损检测方法在桥梁结构损伤检测上的应用与分析[J].贵阳学院学报(自然科学版),2021,16(1):93-99.
- [17] 单德山,罗凌峰,李乔.桥梁健康监测2019年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(5):115-125.
- [18] 方杨.基于物联网与云计算的自动化变形监测技术研究[J].铁道勘察,2022,48(2):44-47.
- [19] 张家松,黄洲,冷志明.自动化监测预警技术在公路隧道工程中的应用[J].公路,2021,66(6):416-418.