

重载保通需求下拱桥吊杆更换关键技术

杨浩^{1,2}, 卢文胜^{1*}

(1. 同济大学, 上海市 200092; 2. 上海浦东新区公路建设发展有限公司, 上海市 200135)

摘要:当吊杆拱桥服役时间接近吊杆设计使用年限时常进行吊杆更换施工,但目前中国针对通行状态下更换拱桥吊杆的案例仍较为鲜见。考虑拱桥重载保通实际运行需求,探讨更换吊杆过程中主要工序优化,提出施工过程监测环境温度与车辆荷载影响等关键参数修正方法,以及短吊杆内力精确测量方法,并对重载保通需求下拱桥吊杆更换施工效果进行评估。结果表明:重载保通工况下拱桥吊杆更换施工的各项控制指标均满足设计及规范要求,所提出的技术方法可为同类型桥梁吊杆更换提供借鉴参考。

关键词:拱桥吊杆; 重载保通; 更换施工; 工序优化; 参数修正; 控制指标

中图分类号: U448.22

文献标志码: A

吊杆拱桥在中国 20 世纪 90 年代后期开始大量建设,其应用范围涵盖市政、公路、铁路等各种交通线路。

受吊杆拱桥的构造形式特点影响,吊杆成为该类型拱桥承载体系中关键的受力和内力传递构件,在运营期间的养护、维修不当,以及冲击、火烧、人为破坏等因素影响,都会造成吊杆损伤,继而导致拱桥丧失承载能力^[1]。考虑材料老化、腐蚀等现象的影响,中国规范^[2]规定,吊杆(吊索)作为可更换部件,其设计使用年限为 20 年。目前国内外常采用吊杆更换的方式来延续吊杆拱桥的使用寿命^[3]。

然而在城市道路的拱桥吊杆更换项目中,由于施工时需要中断交通封闭施工,造成城市交通拥堵状况时有发生。特别对于生产厂区集中的区域,其道路交通存在重载车辆比例高、车流行驶速度慢等特点,封交施工对道路交通的影响已超出了局部路网的范围,处理不当可能会造成阶段性、区域性交通拥堵甚至瘫痪。

因此在满足施工质量、安全、监测精准度等多方面严格要求下减小对路网交通的影响,逐步成为一个重要的发展方向。该文通过典型吊杆拱桥工程案例的计

算分析、实施总结,对重载保通需求下的吊杆更换施工重要工序、关键参数和核心技术进行研究。

1 重载保通需求分析

1.1 拱桥概况

某大桥总长 439.5 m,由北引桥、主桥及南引桥三部分组成,跨径组合为 8×22.0 m(北引桥)+87.5 m(主桥)+8×22.0 m(南引桥),其中主桥为下承式钢管混凝土系杆拱桥,引桥均为简支预应力空心板梁桥,桥型结构布置图见图 1。其中,主桥跨径为 87.5 m,由 2 榀钢管混凝土拱肋、2×15 根吊杆、4 道 K 形圆钢管风撑、2 根纵向系梁、17 道横梁(2 道端横梁、15 道中横梁)、桥面板及下部桥墩组成。其中吊杆间距为 5 m,每根吊杆与 1 道中横梁对应,东拱吊杆编号 D1~D15,西拱吊杆编号 X1~X15。

系梁采用预应力混凝土箱形截面,平均高度为 2.4 m,系梁靠端横梁处 2.75 m 为混凝土实体与拱脚一体。端横梁、中横梁与系梁三者共同构成梁格,并在

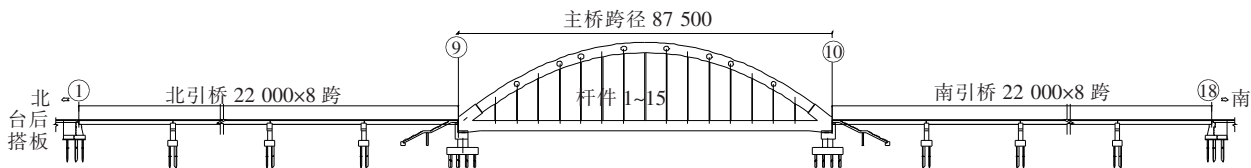


图 1 桥型结构布置图(单位:mm)

收稿日期:2020-06-17

作者简介:杨浩,男,硕士研究生,工程师, E-mail:393481856@qq.com

* 通信作者:卢文胜,男,博士,教授, E-mail:wally@tongji.edu.cn

中横梁跨中顺桥向设置小纵梁。主桥桥面总宽度为40.0 m,双向六车道布置,两侧各一条非机动车道。

该桥所在道路为城市主干道,交通流量大(表1)且重载交通比例高,迫于交通压力,无法断交施工。

表1 桥上交通流量统计

方向	交通量/pcu		饱和度
	12 h	高峰小时	
南→北	22 300	2 200	0.92
北→南	15 800	1 770	0.74
小计	38 100	3 970	—

1.2 重载保通需求及应对措施

1.2.1 重载保通需求

(1) 保通需求。该桥所在主干线为连接中、外环主要通道,且过桥重载车辆多为厂区运输车,无法封闭交通施工。

(2) 重载需求。重载车辆占比超过42%,且存在较多超载车辆,车辆荷载对吊杆内力、桥面线形的影响较大。

1.2.2 应对措施

保通施工肯定对桥上交通造成影响,而重载车辆的长度大、行驶速度慢又对桥上交通运行状况和荷载变化产生影响;桥上交通状况、重载分布、温度等因素都对监控测量数据造成干扰;监测的主要控制方法、短吊杆内力测量精度等问题也均需解决。受多种因素影响,导致吊杆更换后的最终内力调整与测定难度大。

对施工过程中的各个因素影响关系进行梳理分析,并对重难点环节制定针对性措施和方案(图2)。

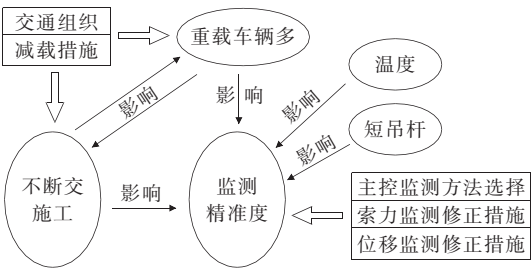


图2 重载保通需求相关影响因素与应对措施

2 吊杆更换施工工序与关键技术

2.1 主要工序工艺

重载保通工况下的拱桥吊杆更换仍遵循现有吊杆更换施工工序安排^[4],如图3所示。

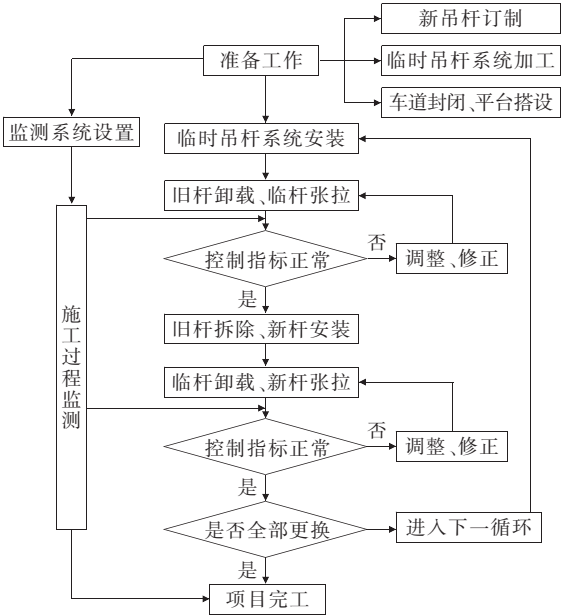


图3 吊杆更换主要工序流程图

所采取的多项措施贯穿整个施工控制和测量的关键环节,旨在减少和降低多次施工循环过程中的误差和误差积累,避免出现二次调索,保障工程施工质量和安全。

2.2 保通与减载措施

案例桥梁为双向六车道,对紧邻拱肋的第3车道进行封闭,达到保持原有交通通行并降低车辆荷载的目的。在封闭区域内根据施工措施要求搭设脚手架施工平台和安全通道,为施工提供空间的同时,保障行人和车辆的安全(图4)。在周边区域路网主干线及次干线路口设置施工绕道导向牌,提醒过境车辆绕路通行,以疏导施工路段交通、避免拥堵。

2.3 临时吊杆体系设置

目前常见的临时承载转换体系主要有:①临时支架体系;②临时吊杆体系;③扁担梁式兜吊体系^[5]。

其中,临时支架体系适用于桥下无水,且有足够的承载力基础的拱桥;临时吊杆体系基本适用于各种条件的拱桥;扁担梁式兜吊体系适用于吊杆病害较轻、吊杆内力小的拱桥,且在无纵梁构造拱桥上应用具有一定风险。

重载保通工况下首选临时吊杆体系作为承载转换体系,可将原吊杆内力通过临时吊杆传递至原受力点周边,对原桥内力和周边吊杆内力无较大影响,有利于施工精确控制和施工安全。

临时吊杆体系的设计,必须满足安全系数为2.0要求,并在此基础上优化构造形式、减小结构尺寸和自

重,以便于快速安装与施工。案例中临时吊杆体系采用三阶两段式构造,见图 5。为保障两侧临时吊杆及

上下钢梁受力均衡,上下钢梁悬臂长度、支撑点位置、提拉点距离等均左右对称设置。

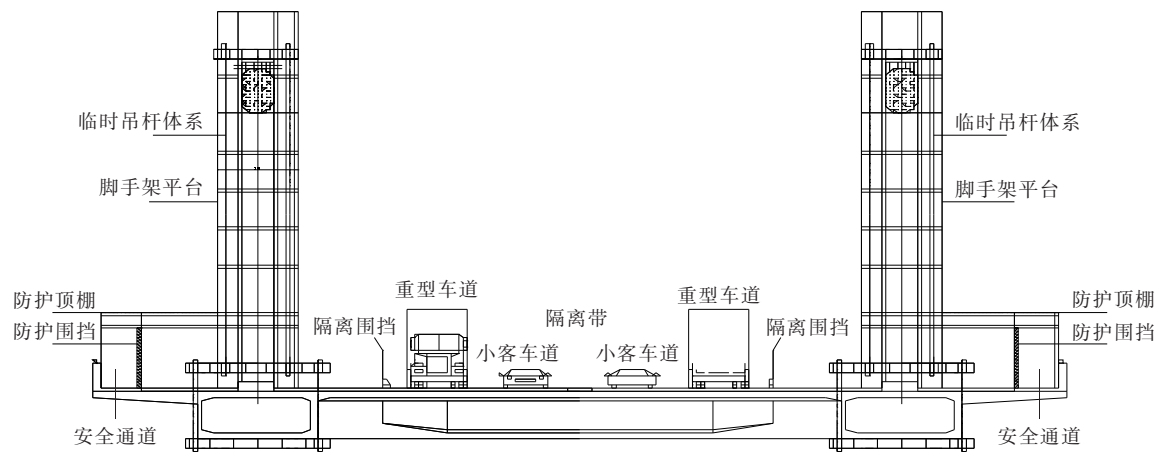


图 4 桥面交通组织断面图

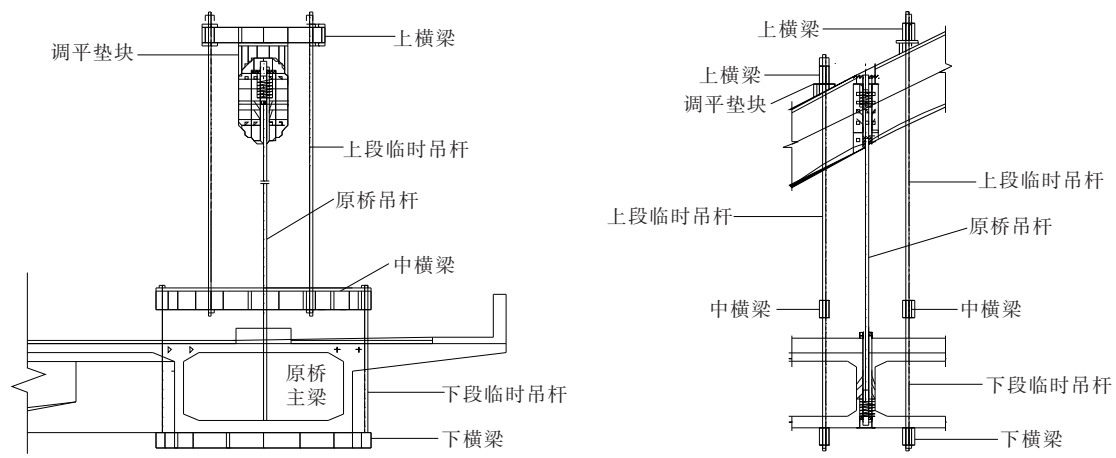


图 5 临时吊杆体系构造立面及断面示意图

2.4 实时监测技术

2.4.1 监测方法

吊杆更换施工监测可分为内力监测和位移监测两大方向。以两种极端为例,当主桥(系梁)刚度极大时桥面高程、位移变化不明显,但内力变化较大,施工监测以内力监测为主;无纵梁结构拱桥,每个吊杆内力基本恒定(恒载+活载),则需以位移监测为主。

根据原桥结构设计图纸,建立有限元模型计算出该桥的位移影响矩阵,该位移影响矩阵可作为吊杆更换施工监测指标的方法判断和数据确定依据。通过对多个案例的分析、计算和总结,提出可将每毫米高程变化对应的吊杆内力变化值 k 作为施工监测方法的判断和选择依据,如表 2 所示。其中 k 值可由理论模拟计算确定,也可通过荷载试验或试验吊杆张拉确定。

表 2 监测方法判定

k 值范围/($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	监测方法
$k \leq 200$	位移监测为主,内力监测为辅
$k > 200$	内力监测为主,位移监测为辅

同时,监测的主控方法也必须因桥而异,例如在铁路吊杆拱桥上,保障铁轨平整度是最重要控制指标,所以必须以桥梁线形、高程控制为主。

吊杆更换过程中内力监测和位移监测必须配合使用,所述案例以内力监测为主,位移监测数据用于数据校核和预警。同时在原桥关键截面、关键点处设置应力监测点,作为结构安全监测体系的组成部分。

2.4.2 温度影响修正方法

温度梯度变化对拱桥内力、线形产生的影响,与施

工产生的内力变化属于同等量级,因此在施工监测期间需要对温度的影响进行消除或削弱。

通过施工前连续多日对桥面线形在温度变化下的连续变化进行测量,绘制各测控点温度影响下的高程变化图表。

在新、旧吊杆张拉施工期间,施工一般持续2~4 h,将施工起始时的温度和高程作为基准,在最后一次张拉与内力测定时,根据当时温度查询各测控点温度影响下的高程校准参数表,按照插值法选取修正参数。以该桥东侧D9吊杆为例,最后一次张拉时较施工基准温度升温5℃,根据温度影响变化表查询,高程控制时基准高程增加+0.36 mm修正后使用,结果如图6所示。

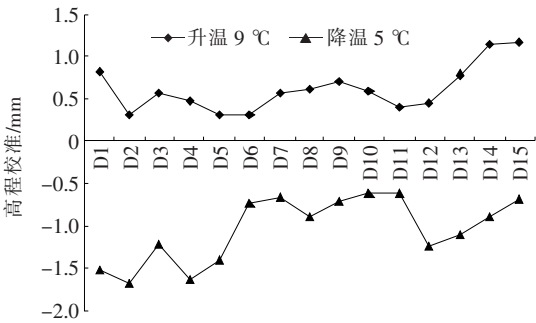


图6 温度影响下高程校准参数图

2.4.3 车辆荷载影响修正方法

保通工况下桥上交通无法保持稳定状态,在减载的前提下依然存在荷载变化,施工时的内力测定选在无车辆通过时测量或临时中断车辆通行进行测量,但该方法仍会造成交通临时性拥堵。当有车辆在桥上缓慢行驶或停滞时,内力的监测数值需要修正。

鉴于重载车辆对内力测定影响较大,在理论计算的基础上,利用统计学方法对桥上由车辆荷载移动位置变化引起的内力实际变化测量值进行数理统计,编制重载车辆不同位置工况下内力修正表格,用于快速查询和内力修正推算。

根据实际测量、统计,间隔4根吊杆距离时荷载影响小于其自重的1%,因此取被更换的吊杆前后各15 m距离为作为重载车辆影响范围,测量统计的重载车辆荷载对吊杆内力影响如表3所示。

实测数据表明:重载车辆对内力影响较大,当两个车道均有重载车辆通过时,其内力增加值与吊杆内力分级后内力变化值为同等量级,不可忽略。当有多个车道、多个重载车辆时,修正值按照车辆中心到吊杆距离对应数值进行叠加使用。例如,当最后一级张拉内力测定时,第一车道重载车辆距离10 m,第二车道重载车辆距离-5 m,则实测吊杆内力较无荷载工况下

表3 车辆荷载对应吊杆内力修正值

荷载	距离/ m	吊杆内力修正/kN				
		另半幅 三车道	另半幅 两车道	另半幅 一车道	一车道	两车道
55 t 重载 车辆	-15		—	—	—	10
	-10		—	—	20	40
	-5	封闭、	—	20	80	100
	0	无车辆	30	70	130	150
	5	通行	—	20	80	100
	10		—	—	20	40
	15		—	—	—	10

吊杆内力大约120 kN,应将实测吊杆内力核减120 kN后作为实际内力值。该修正方法适用于车辆基本停止或车速≤5 km/h的工况。

2.4.4 短吊杆内力精确测量方法

吊杆内力监测^[6]是更换吊杆施工监测的一个重要组成部分。内力测量主要采用频率法,通过测得索的自振频率来推算内力。由于吊杆两端约束情况不同、刚性段(铸铁段)长度占比不同,长吊杆内力按照频率法计算,误差一般可控制在5%以内,但短吊杆长度较

短,需要增加折算系数(经验值)进行调整。折算系数通过现场张拉校核的方式确定。

千斤顶张拉力校核方法:首先在张拉端设置高精度位移传感器,然后采用千斤顶张拉旧吊杆,当张拉力等于内力后锚头被拉动,传感器读数出现单向大波动变化时(图7)的千斤顶张拉力可视为吊杆真实内力。

由于拱桥结构对称,同长度、规格短吊杆均有4根,仅对其中1根进行千斤顶张拉力校核即可,其余3根直接采用修正系数计算内力,结果如表4所示。

2.5 施工工序优化

2.5.1 精准分级控制

吊杆更换施工的关键工序在于临时承载转换体系在施工过程中的两次内力转换。临时吊杆系统为两次内力转换的中间承载体系,通过旧吊杆→临时兜吊体系以及临时兜吊体系→新吊杆两次内力转换的过程,达到安全更换吊杆的目的^[5]。

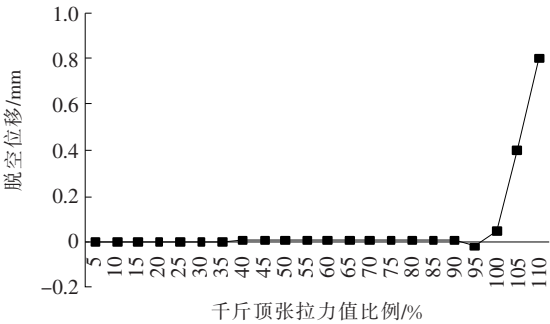


图 7 吊杆内力张拉测定方法示意图

表 4 内力修正系数计算结果

吊杆编号	频率法测定 内力/kN	张拉法测定 内力/kN	修正系数
D1(X1、D15、X15)	1 352	1 160	0.858
D2(X2、D14、X14)	1 878	1 762	0.938

分级控制的选择对施工和监测均有较大影响,且尚无规范对此明确要求,设计单位多将位移偏离控制值设置为±5 mm,此处可利用上节所述 k 值与控制点高程变化控制值 l 的乘积 $\Delta k=k \cdot l$ 作为分级依据。案例中单级最大位移偏离控制值≤2 mm,最大分级内力值≤200×2 kN,分级比例 20%。

由于新吊杆在运营承载过程中存在松弛现象,最终内力锁定时需根据实际情况将最终张拉力提高 2%~5%不等。

2.5.2 协同作业时间

上述技术措施与现场实际工况关联性较强,在实际操作过程中通过同工况参数的积累与修正,可将施工控制精确度逐步提高。

因此,将临时吊杆、新旧吊杆张拉、内力调整环节设置在每日的同一时间段内实施,使温度、荷载等因素趋同,以保障施工质量和监测精度。张拉施工时间段选择在 10:00—15:00 为宜。

3 重载保通效果评估

通过一系列纠偏、修正技术的应用,在保通工

况下吊杆更换的控制指标均达到较好的效果。

以东拱肋 D1、D3、D5、D8 吊杆为例,临时吊杆向新吊杆内力转移过程中控制点位移变化最大值+1.68 mm,完工后位移最大偏离值为+1.01 mm(修正后)。

以西拱 X1~X15 共 15 根吊杆为例,其内力更换前后对比如图 8 所示,最大变化值为 106 kN,最大变化比例 6.02%,小于设计要求的±10%;其位移更换前后变化值如图 9 所示,最大值为+2.19 mm,小于设计要求的±5 mm。

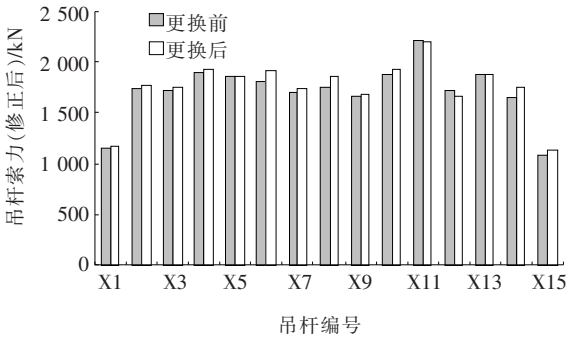


图 8 西拱吊杆内力更换前后对比图

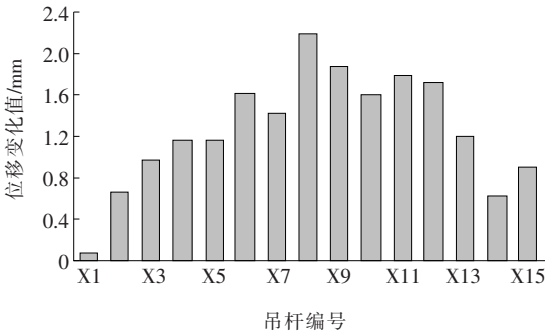


图 9 西拱吊杆更换前后位移变化

4 结论

(1) 针对重载保通工况下的拱桥吊杆更换施工,在综合应用多项技术措施后取得较好的应用效果,最终的控制指标均满足设计及规范要求。

(2) 工程实施过程中通过减少车道、临时吊杆体系设计、施工工序优化,在满足不封闭交通施工的前提下,可以确保工程施工的安全、流畅和可控性。

(3) 重载保通工况下的拱桥吊杆更换施工监测方法应根据各桥的实际情况合理选用。所述的判断指标 k 值主要反映整桥的刚度情况,是在理论计算和多个实际案例应用总结的基础上提出,可供类似案例参考使用。