

钢筋混凝土系杆拱桥吊杆更换施工监控

周苍华¹, 魏俊², 陈佩文³

(1. 杭州市交通运输发展保障中心, 浙江 杭州 310030; 2. 浙江交通职业技术学院 路桥学院, 浙江 杭州 311112;

3. 浙江海洋大学 海洋工程装备学院, 浙江 舟山 316022)

摘要: 朱家坞公路桥主桥跨径为65 m下承式钢筋混凝土系杆拱桥, 拱肋采用钢筋混凝土矩形截面, 全桥共24根吊杆, 吊杆接近设计使用寿命且出现严重病害, 需要对其进行更换。利用MIDAS Civil软件构建了桥梁的有限元分析模型, 并进行吊杆替换工程的模拟评估, 为吊杆更换提供目标索力和桥面标高参考值。在吊杆更换过程中, 对吊杆索力、主拱结构应力及变形进行监控。结果表明, 吊杆更换后主拱结构的应力分布、桥面及拱肋线形等与更换前的状态基本一致, 吊杆索力与目标索力的偏差满足桥梁设计规范要求。可以提供针对类似桥梁的监控施工过程中的吊杆更换案例参考。

关键词: 系杆拱桥; 吊杆更换; 有限元法; 吊杆索力; 施工监控

中图分类号: U448.225

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)05-0211-05

Construction Supervision of Suspender Replacement of Reinforced Concrete Bowstring Arch Bridge

ZHOU Canghua¹, WEI Jun², CHEN Peiwen³

(1. Hangzhou Transportation Development and Guarantee Center, Hangzhou 310030, China; 2. Road and Bridge College, Zhejiang

Communications Vocational College, Hangzhou 311112, China; 3. College of Marine Engineering Equipment, Zhejiang Ocean

University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: The main bridge of the Zhujiawu Bridge is a reinforced concrete through bowstring arch bridge with span of 65 m. The cross sections of the arch ribs are the reinforced concrete rectangular sections. There are totally 24 suspenders of the whole bridge. The suspenders are close to the design service life and are seriously corroded. It is necessary to replace the suspenders of the bridge. The software MIDAS Civil is used to establish the finite element model of the bridge. The replacement engineering of the suspenders is simulated and evaluated. The reference values of target cable force and deck elevation are provided for the replacement of suspenders. In the process of suspender replacement, the suspender cable force, and the structural stress and deformation of the main arch are monitored. The results show that the stress distribution of the main arch structure, the bridge deck and the arch rib alignment after the suspender replacement are basically consistent with those before the replacement. The deviation between the suspender cable force and the target cable force meets the requirements of the bridge design specifications, which can provide the reference for the construction monitoring of the suspender replacement in the similar bridge projects.

Keywords: bowstring arch bridge; suspender replacement; finite element method; suspender cable force; construction monitoring

0 引言

桥梁作为重要的交通基础设施,其安全性和耐久性直接影响交通运输的畅通与安全。系杆拱桥因其结构独特、受力合理、造型优美等优点,被广泛应

用于各类桥梁建设中,其稳定性和安全性在很大程度上依赖于吊杆的承载能力和工作状态。然而,随着使用年限的增加,桥梁的吊杆由于长期承受荷载、环境因素及材料老化等原因,可能出现损坏或性能下降的问题,严重威胁桥梁的结构安全和使用寿命。吊杆在拱桥结构中是承载力的关键构件,任何形式的损伤或退化都可能对整个桥梁结构的安全性和耐久性产生重大影响。常见的吊杆病害如疲劳裂纹、腐蚀、松弛和拉力损失、断丝或断裂、连接部位损伤、锚固端损伤以及外包保护层破损等,不仅削弱了吊

收稿日期: 2024-05-24

作者简介: 周苍华(1974—),男,本科,正高级工程师,从事公路桥梁建设及养护管理。

通信作者: 魏俊(1982—),男,博士,高级工程师,从事桥梁工程教学和科研工作。电子邮箱: weijun@zjvtit.edu.cn

杆的承载能力,还可能引发更为严重的结构性问题,甚至导致桥梁的局部或整体失效。因此,及时发现和处理吊杆病害,尤其是进行必要的吊杆更换,是确保桥梁长期安全运营的重要措施。

21世纪初,中国为建设庞大的道路网络,修建了大量的系杆拱桥。经过十几年的运行,这些桥梁中的系杆大多已经达到使用寿命极限,需要进行更换以延长桥梁的使用寿命。然而,目前关于系杆更换的研究还不够全面和系统。因此,深入研究系杆拱桥中的吊杆更换方法与施工监控技术显得尤为必要。这些研究不仅可以为系杆拱桥的吊杆更换提供科学的数据支撑,还能确保更换过程的安全性和有效性,从而延续桥梁的使用寿命,保障交通网络的持续畅通。

1 工程概况

朱家坞公路桥位于绍兴市柯桥区内的杭甬运河上,跨径布置为7 m×20 m(预应力混凝土空心板)+65 m(系杆拱桥)+7 m×20 m(预应力混凝土空心板),主桥结构采用下承式钢筋混凝土系杆拱桥,柔性吊杆、刚性系杆、刚性拱结构。该桥为单幅桥,全宽10 m。拱轴线为抛物线,计算跨径65 m,矢跨比为1/5,矢高13 m。拱肋采用钢筋混凝土矩形截面,高1.2 m,宽0.8 m,横桥向布置2片拱肋,中心距10.9 m。系梁采用矩形截面预应力混凝土结构,截面高1.6 m、宽0.8 m。吊杆间距为5 m,采用PES5-109低应力防腐拉索,钢束标准强度1670 MPa,两端设冷铸镦头锚具。中横梁与端横梁采用矩形截面预应力混凝土梁。主桥立面图如图1所示。

朱家坞公路桥已运营近20 a,主桥共24根吊杆,均已接近设计使用寿命,而且出现了严重病害如图2所示,包括吊杆防护套损坏、锚端钢板锈蚀、锚头损坏等,上、下游侧吊杆上锚垫板均锈蚀严重,上游侧1#、2#吊杆下锚端渗水,存在较大安全隐患,因此需要对主桥吊杆进行更换^[1]。

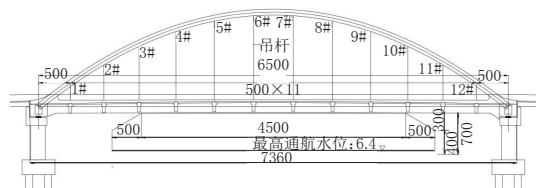


图1 朱家坞公路桥主桥立面图(单位:cm)

2 吊杆更换施工工艺

为确保在更换吊杆的过程中整体结构的安全



(a)



(b)

图2 朱家坞公路桥吊杆病害状况

性,决定采取使用临时支撑系统来承载原本由吊杆承担的力^[2]。为了确保在更换吊杆时各拱肋和系梁的受力平衡,遵循由桥跨中心向两侧对称进行吊杆更换。临时兜吊系统采用临时吊杆将上部拱肋和下部系梁连接,临时吊杆为4根直径32 mm的精轧螺纹钢,临时兜吊系统如图3所示。

吊杆更换前施工准备,包括拆除防水罩、减震器等,杆更换施工流程如下^[3]。

- (1)安装临时兜吊系统,对临时吊杆进行预紧。
- (2)逐级张拉临时吊杆和切割旧吊杆,临时吊杆每张拉一级,同时对旧吊杆切割一级,并且实时监测桥面标高变化,控制在监控误差允许范围内。
- (3)完成旧吊杆切割后,拆除旧吊杆并安装新吊杆,分别将新吊杆两端临时锚固到拱肋和系梁上。
- (4)对新吊杆逐级张拉,同时对临时吊杆逐级卸载,实时监测桥面标高变化,控制在监控误差允许范围内。
- (5)拆除临时兜吊系统及张拉锚固设备。
- (6)重复以上步骤,更换下一对吊杆。
- (7)全部吊杆更换完成后,为保持桥面标高基本不变,若索力偏差超出监控误差允许范围,需要对新吊杆进行二次张拉调整,永久锚固。

3 吊杆更换施工监控方法

系杆拱桥是一种内部具有复合超静定特性的桥

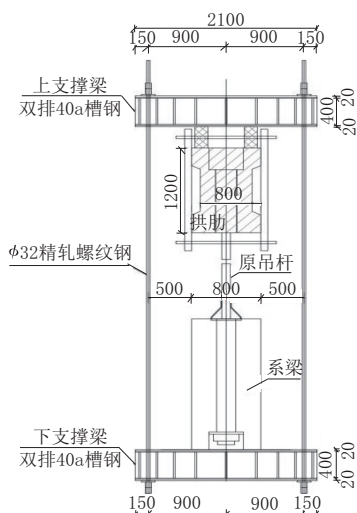


图3 临时兜吊系统构造图(单位:mm)

梁结构,吊杆更换会对拱肋、系梁的应力及变形产生明显影响,需要实时监控拱肋、系梁控制截面的应力及位移。首先,使用MIDAS Civil软件构建有限元分析模型,模拟整个吊杆更换的施工流程,为实际吊杆更换施工提供吊杆张拉力以及桥面标高变化的理论计算值,确保施工过程中结构受力安全。其次,在更换桥梁吊杆时,须密切监控桥面高度及吊杆索力变化,确保结构在更换后的内力分布与桥面形态符合设计标准。本次施工监控的重点是监测吊杆索力的第一次转移(临时吊杆逐级张拉,旧吊杆逐级卸载)和第二次转移(新吊杆逐级张拉,临时吊杆逐级卸载)^[4]。

现场监测采用高精度水准仪测量桥面标高,采用全站仪测量拱肋线形,使用油压计直接读取吊杆张拉力,吊杆安装锚固后采用频率法测量索力^[5],施工监控测点布置如图4所示。

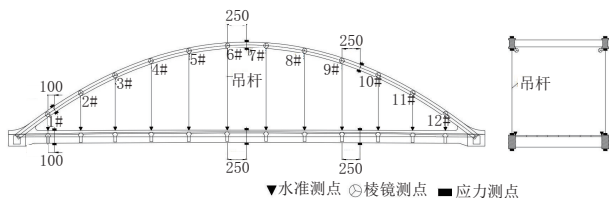


图4 施工监控测点布置图(单位:cm)

3.1 施工监控工作流程

通过设计资料、施工资料、实测吊杆索力等数据,模拟系杆拱桥施工全过程,获取成桥状态拱肋、系梁的应力状态,提供施工控制参数的参照值。

(1) 根据实际吊杆更换施工方案,对施工过程中张拉临时吊杆进行模拟,确定分级次数^[6],为临时吊杆张拉力、系梁及拱肋位移变化提供监控控制目标值。

(2)在实际吊杆更换施工过程中,对系梁、拱肋

的应力、位移以及临时吊杆、新吊杆的张拉力进行实时监控,确保桥面标高及吊杆索力均控制在施工监控目标允许范围内。

(3)全部吊杆更换完成后,在桥面及拱肋线形保持基本不变的情况下,新吊杆中索力偏差较大的吊杆需要进行二次张拉调整。

3.2 施工控制参数容许值与目标值

吊杆更换施工监控采用位移控制作为主要控制手段、内力控制作为辅助的原则,由于该桥为刚性系杆,以桥面标高作为施工过程中的主要控制参数,以吊杆索力作为辅助控制参数。以吊杆更换后索力偏差不超过 10% 目标索力作为吊杆更换基本原则,确定桥面标高变化的精确控制目标值。施工控制参数的允许值和目标值如表 1 所列。

表1 控制参数容许值和目标值

吊杆编号	桥面标高变化 容许值/mm	桥面标高变化 控制目标值/mm	索力偏差/%
1#、12#	5.0	2.0	10
2#、11#	5.0	2.0	10
3#、10#	6.0	2.0	10
4#、9#	7.0	3.0	10
5#、8#	7.0	3.0	10
6#、7#	8.0	3.0	10

4 有限元模型

吊杆更换监控计算主要是对吊杆更换过程中主拱结构受力的模拟分析,为施工监控提供理论依据^[7]。利用MIDAS Civil有限元软件,构建了主桥的全桥结构的三维有限元模型,朱家坞公路桥主桥共256个单元、435个节点,桥面板、横梁、以及系梁的各部分使用梁单元来进行模拟,而吊杆则使用桁架单元来进行模拟,主桥有限元模型如图5所示。

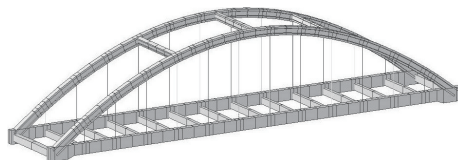


图5 主桥有限元模型

5 施工监控结果分析

在进行吊杆替换的过程中,以位移控制作为主要的策略,并辅以内力控制。不仅要确保挠度的变化不超过通过理论计算得到的值,而且还要确保索力符合桥梁的设计标准^[8]。在吊杆更换前,封闭交通,禁止车辆、行人上桥,对桥面标高、拱肋线形及应

力、旧吊杆索力进行初始测量。在吊杆更换的整个施工过程中,对桥面及拱肋线形进行实时测量,根据桥面及拱肋线形的变化情况,及时调整临时吊杆和新吊杆张拉设备油压表的每一级读数。吊杆更换施工工作完成后,对桥面及拱肋线形、吊杆索力进行精确测量,在保证桥面及拱肋线形保持基本不变的情况下,对索力偏差超过10%目标索力的吊杆进行二次张拉调整。

5.1 拱肋和系梁位移分析

根据施工方案,吊杆更换前后,桥面标高应保证基本不变。从表2和图6的实测数据结果可以看出,所有的吊杆在更换前后,桥面和拱肋位移变化都相对较小,并且两侧桥面位移及拱肋位移基本对称,均未超过其位移允许值与预定目标值。

表2 桥面和拱肋位移变化值

吊杆 编号	上游侧桥面 位移变化值/ mm	下游侧桥面 位移变化值/ mm	上游侧拱肋 位移变化值/ mm	下游侧拱肋 位移变化值/ mm
1#	0.0	0.3	0.2	0.3
2#	0.4	0.2	0.1	0.1
3#	0.3	0.3	-0.1	-0.1
4#	0.3	0.3	-0.2	-0.3
5#	0.3	-0.2	-0.3	-0.1
6#	0.2	0.2	-0.2	-0.2
7#	0.3	0.3	-0.2	0.3
8#	0.3	0.1	-0.3	0.1
9#	0.4	0.2	-0.2	-0.1
10#	0.2	0.2	-0.4	-0.1
11#	0.0	0.2	-0.1	-0.2
12#	0.1	0.2	-0.1	0.0

注:与初始状态相比,表中正值表示位移增大,负值表示位移减小。

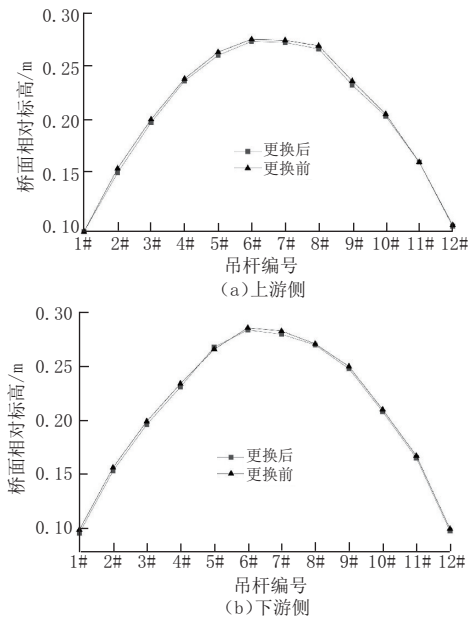


图6 吊杆更换后的桥面相对标高

5.2 拱肋和系梁应力分析

应力监测采用间接测试法,针对各控制截面的应变测量,使用振弦式应变计以确保高精度,再根据应力应变关系换算为结构应力。拱肋和系梁应力测量点布置在 $L/4$ 、 $L/2$ 、 $3L/4$ 截面,应力测试结果如表3和表4所示,单根吊杆更换前后,拱肋和系梁的应力变化量一般不超过1 MPa,最大为2.54 MPa,结果表明,拱肋和系梁在吊杆更换过程中受力安全,新、旧吊杆及临时吊杆之间力的传递过程平稳。个别测点应力偏大,可能由于温度等因素影响所致,在整个吊杆更换施工过程中主拱结构应力处于可控状态。

表3 系梁应力变化值 单位:MPa

截面	上游侧 实测值	理论 计算值	下游侧 实测值	理论 计算值
	上缘	上缘	上缘	上缘
$L/4$	0.32	0.46	0.51	0.45
$L/2$	1.36	1.49	1.14	1.49
$3L/4$	-0.26	-0.33	-0.30	-0.34

注:与初始状态相比,表中正值表示应力增大,负值表示应力减小。

表4 拱肋应力变化值 单位:MPa

截面	上游侧实测值		下游侧实测值		理论计算值	
	上缘	下缘	上缘	下缘	上缘	下缘
$L/4$	-0.45	0.62	-0.52	0.66	-0.58	0.65
$L/2$	-2.54	2.19	-2.52	2.49	-2.73	2.71
$3L/4$	0.72	-0.85	0.75	-0.82	0.96	-0.95

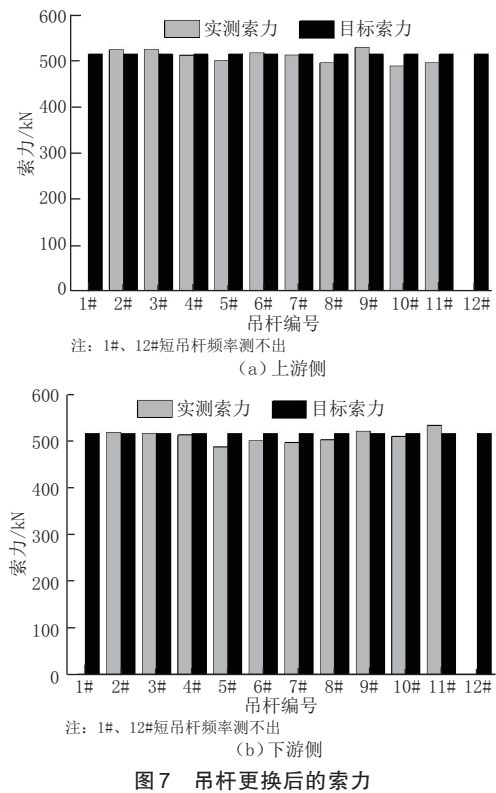
注:与初始状态相比,表中正值表示应力增大,负值表示应力减小。

5.3 吊杆索力分析

保证桥面和拱肋线形基本不变的情况下,对索力偏差较大的吊杆进行二次张拉调整,最终的吊杆索力如图7所示,更换后的吊杆拉力与目标索力偏差不大于5%,左右侧对称吊杆索力偏差不大于5%,均小于设计所要求的10%,说明吊杆索力分布均匀,上下游吊杆索力相差较小,基本对称,桥梁整体受力合理,吊杆索力控制较好。

6 结 语

朱家坞公路桥主桥为下承式钢筋混凝土系杆拱桥,采用临时兜吊系统更换24根吊杆,并以标高控制为主、内力控制为辅的原则进行整个吊杆更换施工过程监控。通过测试拱肋和系梁控制截面的应力及位移,控制吊杆张拉力,确保施工过程中结构受力安全。全桥吊杆更换完成后,吊杆索力与目标索力误差不大于5%,上下游对称吊杆索力偏差不大于5%,吊杆索力控制较好;上下游吊杆更换过程中拱肋和系梁截面应力变化平稳,应力水平在安全范围



内;吊杆更换前后拱肋和系梁位移变化量基本在 $\pm 5\text{ mm}$ 内;主拱结构线形与初始线形基本一致。结果表明,所有监控指标都在预定控制范围内,并且符合相关桥梁设计规范要求,临时兜吊系统在系杆拱桥的吊杆更换中发挥作用明显,可以为其他同类型系杆拱桥更换吊杆作业提供参考。

参考文献:

[1] JTG/T J22—2008,公路桥梁加固设计规范[S].
[2] 钟婧如.下承式钢管混凝土拱桥吊杆更换设计与施工方法[J].交通世界,2022(18):13-15.
[3] JTG/T J23—2008,公路桥梁加固施工技术规范[S].
[4] 罗金山.提篮拱桥吊杆更换及调索计算分析研究[J].公路,2021,66(12):166-170.
[5] 张西强,赵云强,陈慧.刚性系杆拱桥更换吊杆的施工监控[J].桥梁建设,2014,44(5):118-122.
[6] 李正嘉,孙广俊,李鸿晶,等.系杆拱桥吊杆更换数值模拟与方案优化[J].公路工程,2017,42(6):48-53;63.
[7] 郭俊,胡宁,崔鑫.拱桥吊杆更换施工控制关键技术研究[J].城市道桥与防洪,2021(11):142-145;19.
[8] 蒋国富,王华,郝天之.拱桥吊杆更换桥面位移控制方法[J].世界桥梁,2020,48(5):74-79.

(上接第 205 页)

学分析[J].地下空间与工程学报,2005,1(2):205-208.
[6] Loganathan N,Poulos H G,XU K J.Ground and pile-group response due to tunnelling[J].Soils and Foundation,2001,41(1):57-67.
[7] Poulos H G,Chen L T.Pile response due to excavation-induced lateral soil movement[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,ASCE,1997,123(2):94-99.
[8] XU K J,Poulos H G.3-D elastic analysis of vertical piles subjected to

Passive loadings[J].Computers and Geotechnics,2001(28):349-375.
[9] API (American Petroleum Institute). Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design[S].Washington: API Publishing Service,2000.
[10] JGJ 94—2008,建筑桩基技术规范[S].
[11] 吴昌胜,朱志铎.不同隧道施工方法引起地层损失率的统计分析[J].浙江大学学报,2019,53(1):19-30.