

城市大跨下承式单承载面系杆拱桥吊杆更换施工监控技术

张挺钧

(宁波市市政设施中心, 浙江 宁波 315000)

摘要: 以宁波市大跨下承式单承载面系杆拱桥——琴桥为工程背景, 针对吊杆更换施工过程中存在的问题, 采用仿真分析与现场监测相结合的方法, 通过对比分析理论计算值与实测数据, 确定了吊杆更换方案、成桥目标索力以及吊杆的下料长度, 分析了吊杆更换过程中的桥梁结构响应, 明确了现场监测预警值指标。结果表明: 与单根吊杆更换相比, 同时更换一对吊杆的结构响应基本上成倍增加, 建议严格按照设计要求, 对吊杆进行逐根更换; 与吊杆更换前的桥梁结构状态相比, 吊杆更换过程中及吊杆更换施工完成后的主梁和主拱的线形、应力及吊杆索力变化均控制在合理范围内, 满足相关控制精度要求。

关键词: 下承式; 系杆拱桥; 单承载面; 吊杆更换; 施工监控; 目标索力

中图分类号: U448.22+5; U445.4

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)04-0196-06

Construction Monitoring Technology of Suspender Replacement of Urban Long-span through Single-bearing Surface Bowstring Arch Bridge

ZHANG Tingjun

(Ningbo Municipal Facilities Center, Ningbo 202405, China)

Abstract: Taking a long-span through single-bearing surface bowstring arch bridge - Qin Bridge in Ningbo as the engineering background, aiming at the problems existing in the construction process of suspender replacement, the method combining the simulation analysis and field monitoring is used to confirm the suspender replacement scheme, target cable force of finished bridge and suspender length by comparing and analyzing the theoretical calculating value and the measured data. The response of bridge structure in the process of derrick replacement is analyzed, and the index of field monitoring and warning value is defined. The results show that compared with the replacement of a single suspender, the structural response of replacing a pair of booms at the same time is basically doubled. It is recommended to replace the suspender one by one in strict accordance with the design requirements. Compared with the bridge structural state before the suspender is replaced, the linear shape, stress and cable force changes of the main girder and main arch during and after the replacement of the suspender are controlled within a reasonable range, and meet the relevant control accuracy requirements.

Keywords: through bridge; bowstring arch bridge; single-bearing surface; suspender replacement; construction monitoring; target cable force

0 引言

吊杆作为下承式系杆拱桥拱肋和桥面系之间的关键传力构件, 其承载性能影响到整个桥梁的安全与正常运营^[1-2]。对于修建较早的系杆拱桥, 由于吊杆的设计理论、防护技术、施工方法等方面存在一定的局限性, 或者运营维护不当以及受事故、环境因素等影响, 造成吊杆破损、锈蚀等问题, 降低了吊杆使

用的安全系数, 存在较大的桥梁安全隐患^[3-5], 因此近几年系杆拱桥吊杆的更换需求日益旺盛, 对吊杆更换施工中的相关技术问题研究至关重要。

吊杆更换一般采用临时替代法, 更换过程需要两次体系转换。根据工作原理与不同构造, 临时替代大致包括临时吊杆法、临时支架法、临时兜吊法以及桥面支撑法^[1, 6]。临时支架法需在桥下设置工作基础^[1], 临时吊杆法与临时兜吊法^[7, 16]的施工工序基本相似, 在实际工程中应用较多。另外, 吊杆更换还有一种无替代法^[8], 是直接对旧吊杆进行更换, 无其他结构辅助更换, 在吊杆更换过程中, 附近结构会产生

收稿日期: 2024-11-27

作者简介: 张挺钧(1986—), 男, 工程硕士, 高级工程师, 从事道路、桥梁等市政工程建设及各类市政设施维修项目管理工作。

比较大的响应,施工简便但安全性略差,对桥梁结构要求较高,吊杆更换前后的桥梁线形、位移等须满足设计荷载作用下的相关规范要求,在采用无替代法之前应做好相关结构理论计算,以保证施工安全。杨鑫兴等^[9]针对案例工程讨论了系杆拱桥吊杆更换施工的监控内容、步骤及要点,分析了吊杆更换施工监控结果,提出了优化方案建议。李东平等^[10]采用了临时兜吊法和梁底移动式挂篮对铁路系杆拱桥进行了吊杆更换。蒋国富等^[11]采用临时兜吊系统更换拱桥吊杆,并提出一种桥面位移简化计算方法。张军雷等^[12]对不可更换吊杆,提出了在旧吊杆位置增加新吊杆的加固改造方法。

本文以一座下承式单承载面刚性系杆柔性拱桥更换吊杆实桥工程为背景,建立了有限元仿真分析的全桥模型,通过理论计算与现场的实际监测^[17],确定了吊杆更换方式、目标索力以及吊杆下料长度^[13],分析了吊杆更换过程中的桥梁结构响应,具体包括主梁、拱肋的内力、位移线形^[14-16]变化及吊杆索力变化,并据此确定现场监测的预警值指标。通过实施过程中的跟踪监测,确保吊杆更换过程中主梁和主拱的线形、应力及吊杆索力变化均控制在合理范围内,保证结构安全。

1 工程概况

宁波市琴桥建于2001年,位于灵桥与兴宁桥之间,东西走向。主桥为下承式单承载面系杆拱桥,计算跨径120 m,矢高2 m,矢跨比为1:5,桥宽为33 m。拱肋采用单榀钢管混凝土结构,拱座为钢筋混凝土结构,拱肋高2 m,宽3.3 m。主梁采用C50单箱五室预应力混凝土箱梁结构,梁高2.5 m,支座处梁高3.35 m,底板宽21.4 m,顶板宽32.85 m。采用双索面吊杆,全桥共设17对吊杆,纵桥向间距为6 m,横桥向间距为2.1 m。西侧最短吊杆定位为1#,由西向东吊杆编号依次递增至17#。横桥向同一对吊杆北侧编号前缀为N,南侧编号前缀为S。吊杆位置示意图1。



图1 吊杆编号图

2 施工工艺

2.1 吊杆施工工艺

该桥上跨甬江,结合该桥刚性系杆柔性拱的结

构特点,该桥可采用无替代法工艺。通过千斤顶先拆除旧索,再安装待更换新索。吊杆更换所用仪器设备应在校验标定后使用,在吊杆更换过程中,应密切关注相邻吊杆的索力变化、主梁与拱肋的变形情况,以保证桥梁结构安全。在旧索拆除时,需关注实际的松锚油压和实际吊杆力,为最终更换吊杆力的确定提供参考。吊杆以主拱圈为锚固端,箱梁端为张拉端,张拉过程中采用张拉力与伸长值双控。具体的吊杆更换施工工艺流程见图2。

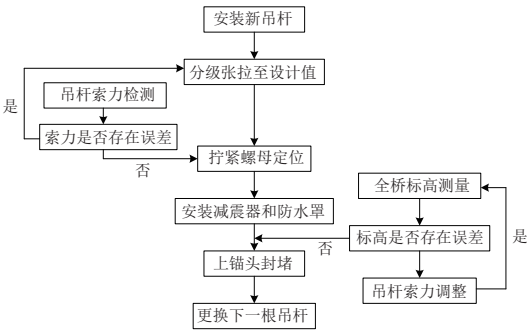


图2 新吊杆安装施工工艺流程图

2.2 吊杆更换施工原则

针对琴桥结构吊杆更换施工的监控原则如下。

(1)为避免更换中出现不利受力,应先进行结构外观排查,若有病害问题,先进行结构加固,再更换吊杆^[18-21]。

(2)吊杆更换的控制原则一般分为两种,一种是按照现状吊杆力控制,一种是按照成桥目标索力控制。如果两者差异不大,可按现状吊杆力控制,并做到对称的吊杆力一致^[22-23]。

(3)吊杆更换前后,应保证桥面与主拱圈线形基本不产生位移,保证桥梁结构承载能力不降低^[28],新吊杆设计使用年限不少于20 a^[26,29]。

2.3 施工关键问题分析

(1)主桥实际情况与理论计算误差控制

琴桥服役使用多年,结构部分构件可能存在局部损伤、几何形心偏位以及结构体系约束性质的变化等问题,这些都极有可能造成实际检测结果与理论模型计算结果存在较大偏差^[24-25]。因此,采用检测数据与设计数据对比和复核的方式消除模型误差^[27],具体为:分析原因→修正模型→张力和索力测试→修正模型→指导施工。

(2)确定索长与吊杆索力

根据竣工图中主梁混凝土方量和二期恒载,按照梁上锚点位移为零的原则,吊杆力平衡梁段重量,使主梁弯矩较小,计算成桥及徐变23 a后的恒载吊

杆力。将计算结果与设计成桥索力、最近一期检测报告中的实测索力进行综合分析,最终确定琴桥吊杆更换施工后的成桥目标索力。

(3) 拱肋线形和桥面高程控制

主桥拱肋的线形变化可能导致结构体系变异,同时拱肋的变化也将直接影响主梁线形。在吊杆更换前后,对大桥拱肋跨中、主梁跨中、四分点等关键位置进行测量,对比分析各根吊杆更换前后数据,一旦变化量超出控制值需立即排查分析原因,甚至调整方案。

(4) 梁、拱的应力控制

在吊杆更换过程中,各工况下结构受力状态不同,需要考虑施工临时荷载对结构响应的影响,通过理论计算,准确把握施工过程中主梁、主拱的受力变化规律,并选取典型位置进行跟踪监测,及时发现关键结构的异常受力情况,以保证施工过程的结构安全。

(5) 主梁梁端纵向的位移控制

对于下承式无推力拱桥,水平推力由主梁承担,梁端纵向位移可以直观地评判结构的宏观响应。吊杆更换施工监控中可以通过对其跟踪监测,从而把控结构的整体受力状态和安全性。当然,对于刚性系杆柔性拱桥结构而言,更换过程中纵向位移量值总体较小。

3 吊杆更换过程分析及关键参数确定

采用有限元分析方法对施工过程每一阶段结构的内力、位移状态以及施工监控参数进行仿真计算分析,计算模型如图3所示。

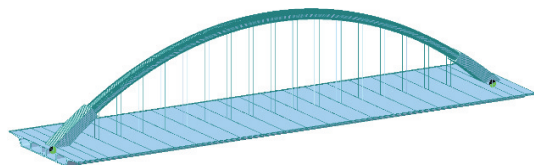


图3 琴桥MIDAS计算模型

3.1 吊杆更换受力分析

本桥已运营约23 a,首先对当前结构状态进行分析,在此基础上,选取典型吊杆,对单根更换和单队更换的不同结构响应值进行对比分析,为更换工艺的确定提供依据。

3.1.1 成桥运营23 a的结构状态

混凝土主梁上缘最大压应力7.0 MPa,下缘最大压应力6.2 MPa,混凝土拱脚段最大压应力为13.3 MPa;拱肋钢结构跨中上缘最大压应力154.8 MPa,下缘最

大压应力20.8 MPa。拱肋跨中最大累计向下变形为-0.135 m,主梁累计变形较小,最大向上变形为0.008 m。1#吊杆力最大为3 082 kN,9#吊杆力为2 410.6 kN,其余跨中各吊杆索力约为2 410~2 500 kN(见图4)。

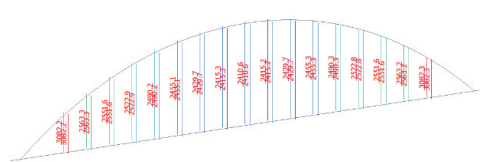


图4 成桥运营23 a后吊杆力(单位:kN)

3.1.2 拆除单根N9#吊杆

与成桥运营23 a后受力相比,拆除N9#吊杆后,混凝土主梁跨中上缘压应力7.5 MPa,压应力增加0.5 MPa;主梁跨中下缘压应力5.9 MPa,压应力减小0.3 MPa,混凝土拱脚段的最大压应力为13.2 MPa,变化较小;拱肋钢结构跨中上缘压应力137.0 MPa,压应力减小20.0 MPa,下缘最小压应力29.3 MPa,压应力增加8.5 MPa。拱肋跨中最大向上变形为0.007 m,主梁最大下挠变形为0.005 m。S9#吊杆力为2673.5 kN,增加263 kN,相邻吊杆N8#和N10#增加285 kN(见图5)。

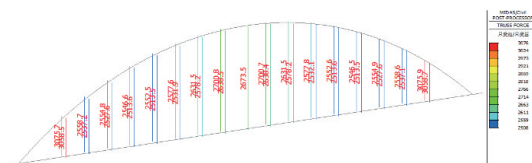


图5 拆除单根9#吊杆后的吊杆力(单位:kN)

3.1.3 拆除一对N9#吊杆

与成桥运营23 a后受力相比,拆除一对9#吊杆后,混凝土主梁跨中上缘压应力8.3 MPa,压应力增加1.3 MPa;主梁跨中下缘压应力5.6 MPa,压应力减小0.6 MPa,混凝土拱脚段最大压应力为13.3 MPa,变化较小;拱肋钢结构跨中上缘压应力为110 MPa,减小44 MPa;跨中下缘最小压应力为56.9 MPa,增加36.1 MPa。拱肋跨中最大向上变形为0.013 m,主梁最大下挠变形为0.011 m。相邻吊杆8#、10#增加612 kN,7#、11#增加424 kN(见图6)。

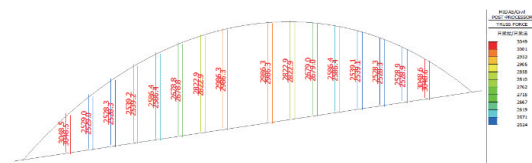


图6 拆除1对9#吊杆后的吊杆力(单位:kN)

经计算,按照设计要求的一次拆除并更换一根吊杆的更换顺序及方案,吊杆更换过程结构受力安全,主梁、拱肋应力皆满足规范要求。吊杆拆除过

程,结构变形基本上在 0.010 m 以内,变形较小。单根吊杆拆除过程中,相邻吊杆的索力增量基本上在 300 kN 以内,最不利吊杆力对应的安全系数均大于 2.0。

相对于更换单根吊杆,同时更换一对吊杆,结构响应基本上成倍增加,主梁应力变化最大为 1.3 MPa,拱肋钢管应力变化达到 44 MPa,吊杆力增量达到 612 kN,因此建议严格按照设计要求,对吊杆进行逐根更换。

3.2 确定监测预警指标

根据对吊杆更换过程结构计算结果,吊杆拆除过程拱肋和主梁变形控制限值以 1 cm 作为预警值,1.5 cm 作为极限控制值;混凝土主梁应力变化以 1.2 MPa 作为预警值,2.0 MPa 作为极限控制值,拱肋钢结构的应力变化以 20 MPa 作为预警值,30 MPa 作为极限控制值。现确定,采用单根更换吊杆的形式,具体更换顺序为 N17→S14→S10→N14→N10→S16→S8→N16→N8→S12→N7→N12→S7→S11→S6→N11→N6→N13→S2→S15→N2→N15→N3→N4→S3→S4→N1→N5→N9→S5→S9→S1→S13→S17。

3.3 确定吊杆下料长度

吊杆长度 L_1 为锚固点之间的距离,包含梁端和拱端锚垫板厚度。建议无应力下料长度 $L=L_1-\Delta Le$,未计入张拉端的工作长度,其中 ΔLe 为弹性伸长量。根据竣工图纸及施工反馈,拱上和梁端锚垫板厚度均为 4 cm。实际下料时,根据吊杆索锚固构造、下料温度与设计基准温度(25 ℃)的温差进行修正。下料长度计算所采用索的弹模为 2.0×10^5 MPa,若实际弹模与计算弹模有所偏差,则应根据吊杆索的实际弹模进行修正。吊杆的下料长度见表 1。

4 实施效果分析

为掌握吊杆更换过程中的结构响应,在主梁、拱肋等位置设置变形测点、应力测点,分别进行线形位移、应力监测。同时,采用振动频率法对吊杆更换过程的各吊杆换索前、后吊杆力进行跟踪测试与控制,并对吊杆力计算索长进行修正,指导后续吊杆力通测分析。

4.1 线形监测

吊杆更换前、后桥面整体线形监测利用桥面既有线形沉降观测点,纵桥向共 10 个测点、横向为 3 个测点,共 30 个监测点。

吊杆更换过程中,主梁、主拱各位移测试断面实

表 1 吊杆下料长度

吊杆 编号	拉索 型号	拉索面积/ mm ²	L_1 /m	ΔLe /m	L /m
N1	φ7×109	4 195	10.896	0.040	10.856
N2	φ7×91	3 502	14.374	0.053	14.321
N3	φ7×91	3 502	17.306	0.063	17.243
N4	φ7×91	3 502	19.684	0.071	19.613
N5	φ7×91	3 502	21.596	0.077	21.519
N6	φ7×91	3 502	23.103	0.081	23.022
N7	φ7×91	3 502	24.154	0.084	24.070
N8	φ7×91	3 502	24.797	0.085	24.712
N9	φ7×91	3 502	25.023	0.086	24.937
N10	φ7×91	3 502	24.830	0.085	24.745
N11	φ7×91	3 502	24.183	0.084	24.099
N12	φ7×91	3 502	23.141	0.081	23.060
N13	φ7×91	3 502	21.651	0.077	21.574
N14	φ7×91	3 502	19.722	0.071	19.651
N15	φ7×91	3 502	17.295	0.063	17.232
N16	φ7×91	3 502	14.363	0.053	14.310
N17	φ7×109	4 195	10.906	0.040	10.866
S1	φ7×109	4 195	10.908	0.040	10.868
S2	φ7×91	3 502	14.370	0.053	14.317
S3	φ7×91	3 502	17.294	0.063	17.231
S4	φ7×91	3 502	19.704	0.071	19.633
S5	φ7×91	3 502	21.613	0.077	21.536
S6	φ7×91	3 502	23.089	0.081	23.008
S7	φ7×91	3 502	24.144	0.084	24.060
S8	φ7×91	3 502	24.792	0.085	24.707
S9	φ7×91	3 502	25.013	0.086	24.927
S10	φ7×91	3 502	24.829	0.085	24.744
S11	φ7×91	3 502	24.187	0.084	24.103
S12	φ7×91	3 502	23.135	0.081	23.054
S13	φ7×91	3 502	21.649	0.077	21.572
S14	φ7×91	3 502	19.715	0.071	19.644
S15	φ7×91	3 502	17.293	0.063	17.230
S16	φ7×91	3 502	14.360	0.053	14.307
S17	φ7×109	4 195	10.901	0.040	10.861

测阶段的位移变化在±10 mm 内,未出现预警超限情况,满足吊杆更换施工过程中位移变化±10 mm 的控制指标;梁端纵向位移测试断面实测位移基本为 0,吊杆更换施工过程中梁端未发生纵向位移。全桥吊杆更换施工完成后,主梁位移与初始状态的累计变化为 0.3~1.7 mm(见图 7),主拱位移与初始状态的累计变化为-2.1~-0.1 mm(见图 8),主梁和主拱线形均与吊杆更换施工前基本一致,满足吊杆更换前后主梁±5 mm、主拱±10 mm 的施工控制指标。

4.2 应力监测

吊杆更换施工过程中,主梁各应力测试断面实

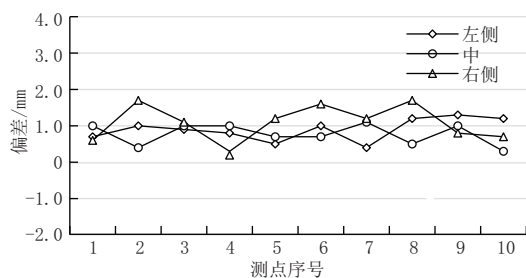


图7 主梁线形与初始状态变化偏差图

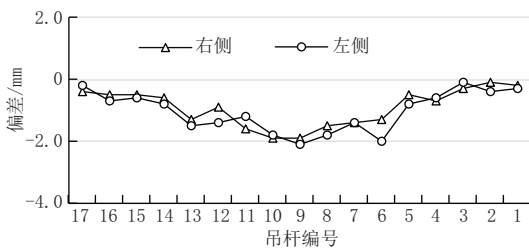


图8 主拱线形与初始状态变化偏差图

测阶段应力变化均小于 ± 1.0 MPa,主拱钢结构各应力测试断面实测阶段应力变化均小于 ± 10.0 MPa,未出现预警超限情况,满足吊杆更换施工过程中主梁应力变化 ± 1.2 MPa、拱肋钢结构应力 ± 20.0 MPa的施工控制指标。全桥吊杆更换施工完成后,主梁应力与初始状态的累计变化为 $-0.5 \sim 0$ MPa、主拱应力与初始状态的累计变化在 ± 3 MPa内,主梁和主拱各测试断面实测应力均与吊杆更换施工前状态基本一致,累计变化较小,结构内力整体稳定。

4.3 索力监测

全桥吊杆更换完成后,得到吊杆力实测值与理论值数据(见图9、图10),单根吊杆力偏差范围为 $-7.2\% \sim 6.4\%$ (见图11),全桥吊杆总索力偏差为 -1.5% ,满足规范^[30]允许的偏差 $\pm 10\%$ 的要求。

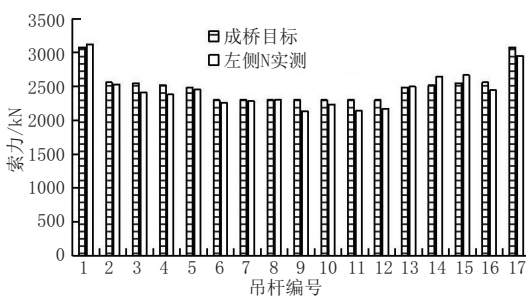


图9 左侧吊杆力实测值与理论值对比图

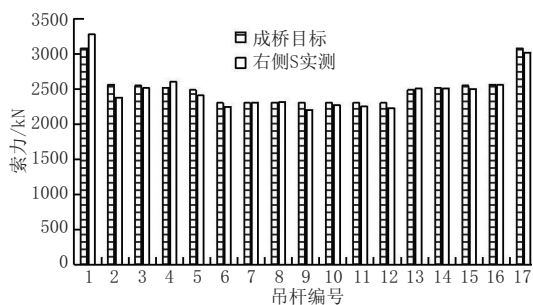


图10 右侧吊杆力实测值与理论值对比图

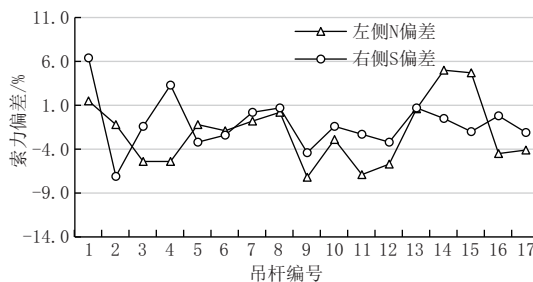


图11 吊杆更换完成后吊杆力偏差图

换过程中的结构受力性能,得到主要结论如下。

(1)相对于单根吊杆更换,同时更换一对吊杆,结构响应基本上成倍增加,主梁应力变化最大为 1.3 MPa,拱肋钢管应力变化达到 44 MPa,吊杆力增量达到 612 kN,因此,建议严格按照设计要求,对吊杆进行逐根更换。

(2)采用单根更换的形式,具体更换顺序为N17→S14→S10→N14→N10→S16→S8→N16→N8→S12→N7→N12→S7→S11→S6→N11→N6→N13→S2→S15→N2→N15→N3→N4→S3→S4→N1→N5→N9→S5→S9→S1→S13→S17。

(3)与吊杆更换前桥梁结构状态相比,吊杆更换施工完成后的主梁和主拱的线形、应力及吊杆索力变化均控制在合理范围内,满足相关控制精度要求。

参考文献:

- [1] 张运清,吴军鹏,刘康,等.下承式系杆拱桥吊杆更换技术研究[J].山东交通科技,2019(3):77-81.
- [2] 许华东.封闭箱肋拱桥吊杆更换技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2009.
- [3] 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):48-63.
- [4] 黄飞新,晏班夫.钢管混凝土拱桥吊杆更换施工监控研究[J].公路交通科技:应用技术版,2019(11):156-159.
- [5] 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.
- [6] 秦志,莫世英,李锦弥.中承式钢管混凝土拱桥吊杆更换施工控制分析[J].西部交通科技,2018(8):115-119.
- [7] 朱军,曹文斌,朱利明,等.采用外套钢管保护的系杆拱桥吊杆更换技术研究[J].城市道桥与防洪,2023(1):162-165.
- [8] 孙昊.系杆拱吊杆更换过程的结构性能研究[D].南京:东南大学,2020.

5 结 语

本文针对下承式单承载面刚性系杆柔性拱桥吊杆更换的施工问题进行分析,介绍了换索施工工艺,阐述了吊杆更换施工原则及施工关键问题,采用有限元软件建立了下承式系杆拱桥仿真模型,确定了吊杆更换方案及吊杆下料长度,模拟了新旧吊杆更

[9] 杨鑫兴,邵欣.混凝土系杆拱桥吊杆更换施工监控技术[J].施工技术,2024(5):75-77.

[10] 李东平,吴尧,窦勇芝,等.上跨电气化铁路系杆拱桥吊杆更换技术[J].世界桥梁,2023,51(3):119-124.

[11] 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.

[12] 张军雷,崔海,王海雷.拱桥吊杆安全性加固改造方案设计研究[J].世界桥梁,2021,49(2):101-107.

[13] 马志华,温天宇,杨辉.系杆拱桥吊杆更换方案与施工控制[J].中外公路,2015,35(2):161-164.

[14] 李正嘉,孙广俊等.系杆拱桥吊杆更换数值模拟与方案优化[J].公路工程,2017(12):48-53.

[15] 丁毅,王东阳.三拱肋无风撑系杆拱桥吊杆更换技术研究[J].公路,2014(1):22-26.

[16] 杨旺,王福敏等.拱桥吊杆更换工艺及其力学特性分析[J].公路交通技术,2015(1):88-93.

[17] 杨亚林,武俊彦,庞志华,等.拱桥吊杆更换系统研究[J].公路交通科技(应用技术版),2012(6):68-71.

[18] 张斌,谢瑜轩,周青松,等.中下承式拱桥吊杆病害分析与更换施工监控方法研究[J].市政技术,2024,42(1):80-85.

[19] 位庆江.缺陷和局部失效对钢管混凝土系杆拱桥的影响研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2022.

[20] 程晓东.异形拱桥病害分析及吊杆更换方法研究[J].公路与汽运,2021(5):128-132.

[21] 王华,张子墨,杨涛.锈蚀对吊杆应力集中系数的影响研究[J].西部交通科技,2022(6):106-108.

[22] 高文波.中承式钢拱桥维修加固技术[J].公路,2020,65(11):240-243.

[23] 张开银,赵一凡,许灿.基于振动频率法的吊杆内力识别研究[J].武汉理工大学学报,2021,43(9):26-32.

[24] 吴生海.钢管混凝土拱桥病害分析及防治措施研究[J].工程与建设,2023,37(6):1820-1823.

[25] 许红胜,蒋磊,颜东煌.中承式拱桥吊杆内部钢丝腐蚀病害实例研究[J].2023,43(3):83-87.

[26] 周潇.钢管混凝土拱桥吊杆疲劳寿命研究[J].四川建筑,2017,37(6):146-147.

[27] 苏小妹,许红胜,颜东煌.不中断交通情况下拱桥更换吊杆施工工序优化研究[J].中外公路,2019,39(3):115-118.

[28] JTG/T D65-06—2015,公路钢管混凝土拱桥设计规范[S].

[29] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].

[30] JTG F80/1—2017,公路工程质量检验评定标准第一册土建工程[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadfloodbridge@163.com

