

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.241039

钢管混凝土系杆拱桥改造技术

陈丽军, 胡 宁

(武汉市市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 以武汉市长丰桥提升改造工程为背景, 介绍了桥梁的病害, 同时对病害产生的原因进行针对性分析, 并在此基础上详细阐述了钢管混凝土系杆拱桥改造提升的总体思路及实施方案。在利用原有主拱圈的基础上, 通过建立整体性钢桥面板解决了原有桥面主梁为悬挂漂浮体系的安全隐患, 并对达到设计使用年限的吊杆、系杆等病害构件进行更换及修缮, 同时通过减轻桥面恒载进一步提高了桥梁通行荷载能力。项目的实施消除了桥梁结构安全隐患, 提高了结构的安全储备及耐久性。有限元计算分析表明, 桥梁结构在施工阶段及成桥后的受力均满足规范要求, 分析成果已用于指导工程的实施。该工程的改造提升方案可为同类结构的维修改造提供参考。

关键词: 钢管混凝土拱桥; 悬挂漂浮式体系; 损伤; 加固; 结构设计; 有限元法; 设计规范

中图分类号: U448.27

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)07-0088-05

Reconstruction Techniques of Concrete Filled Steel Tube Bowstring Arch Bridge

CHEN Lijun, HU Ning

(Wuhan Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: Based on the upgrading and reconstruction project of Changfeng Bridge in Wuhan, the disease phenomenon of the bridge is introduced, and the causes of the disease are specially analyzed. And on this basis, the overall idea and the implementation scheme of the upgrading and reconstruction of concrete filled steel tube bowstring arch bridge are expounded in detail. In the reconstruction scheme on the basis of using the original main arch ring, the integral steel bridge deck is built to solve the safety hazard of the original bridge deck girder as the suspended floating system, and the disease components of boom and tie bar over the design service life are replaced and repaired. At the same time by reducing the bridge deck constant load, the bridge traffic load capacity is further improved. The implementation of the project eliminates the hidden safety danger of bridge structure and improves the safety reserve and durability of the structure. The finite element calculation and analysis of the reconstruction scheme show that the force of the bridge structure in the construction stage and after the bridge construction meets the specification requirements, and the analysis results have been used to guide the implementation of the project. At the same time, the reconstruction and upgrading scheme of this project can provide a reference for the maintenance and reconstruction of similar structures.

Keywords: concrete filled steel tube arch bridge; suspended floating system; damage; strengthening; structure design; finite element method; design code

1 工程概况

武汉市长丰桥(江汉五桥)是武汉城区三环线西段跨越汉江的一座特大桥, 其中主桥采用中承式钢管混凝土系杆拱桥, 跨径布置为 $(60.5+251+60.5)=372$ m, 主桥宽度31.9 m(含吊杆区)。主桥桥面设柔性吊杆、刚横梁、桥面板及平衡主拱推力

的预应力系杆^[1-2]。

长丰桥主跨拱肋采用钢管混凝土桁架结构, 拱肋高4.5 m, 上、下弦杆各为两根直径1 000 mm×14 mm的钢管, 上、下弦两根并列钢管间用12 mm厚钢缀板连接, 主拱圈内采用混凝土灌注。腹杆为直径500 mm×10 mm的空钢管。

原有长丰桥的桥面系为钢筋混凝土简支T梁放置于钢横梁上, 通过桥面铺装形成结构简支、桥面连续的悬挂漂浮体系; 现状系杆由24束OVM15-31低松弛钢绞线($\phi 15.24$, 1 860 MPa)组成。现状吊杆共

收稿日期: 2024-10-24

基金项目: 武汉市城建局科技计划项目(202214)

作者简介: 陈丽军(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁抗震及加固设计研究工作。

32 对 64 根,采用 LM5-151 平行钢丝成品拉索,钢丝为 $\phi 5$ 镀锌钢丝,其标准强度为 1 570 MPa。

主桥主拱墩及承台为分离式实体钢筋混凝土结构,其间用横墙联结。采用钻孔桩基础。每个主拱墩基础采用 30 根 $\phi 1\,500\text{ mm}$ 钻孔灌注桩。桥梁立面布置和典型横断面图分别见图 1、图 2。

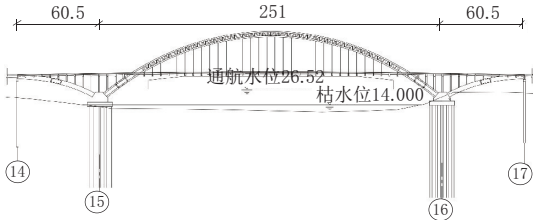


图 1 长丰桥主桥立面布置图(单位:m)

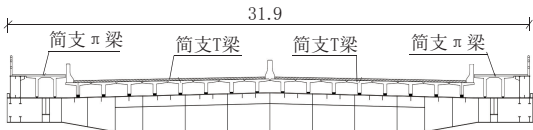


图 2 原主梁典型横断面图(单位:m)

2 桥梁病害

根据现场踏勘,结合 2020—2022 年的长丰桥检测报告,主桥的主要桥梁病害为:简支小 T 梁桥面连续区域均存在横向裂缝,比较严重的位置,沥青出现拥包、网裂、坑槽等现象(见图 3)。特别是主桥两个边跨结构,桥面病害相比主跨范围更为严重,除了横向裂缝外,每道桥面连续处基本都伴随有沥青拥包、网裂等现象。主桥的钢横梁存在锈蚀现象,混凝土边拱纵向裂缝以及边拱端横梁开裂、伸缩缝存在齿板积尘、局部变形等问题。长丰桥的吊杆、系杆均已达到 20 a 的设计使用年限,同时吊杆锚头存在积水及锈蚀现象(见图 4),柔性系杆的预应力钢绞线存在断丝现象^[3]。桥梁综合技术状况较差,结构存在严重的安全隐患,因此及时对本项目的病害桥梁进行维修加固改造是极为重要且紧迫的任务,这不仅能确保桥梁的安全使用,还能延长其使用寿命,对保障交通安全具有重要意义。

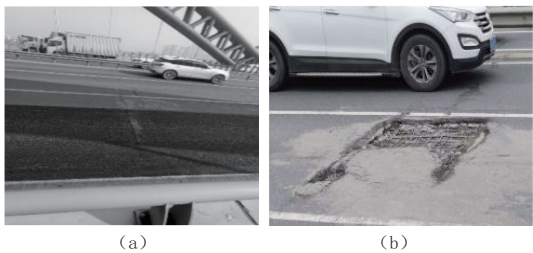


图 3 桥面铺装病害图



图 4 吊杆病害图

3 病害原因分析

长丰桥建成于 2001 年,至今已运营 20 余年。主桥为大跨径的中承式钢管混凝土拱桥,主梁体系为悬挂漂浮式结构,即主梁结构简支、桥面连续体系,该体系具有构造简单、受力明确、施工便捷等特点,在 20 世纪 90 年代,此结构类型在全国多处跨江跨河的桥梁采用,建造实例达百座以上,但该体系将桥面纵梁结构简支于钢横梁上,通过混凝土现浇层形成桥面连续,在长期重载、超限车辆作用下,极易造成此处桥面铺装受力超限,混凝土发生开裂损坏,现今很多此类型桥梁都已发现类似病害。如仅仅进行沥青混凝土面层的铣刨重铺,不改变结构体系,则在早期就容易形成开裂等病害。虽然桥梁管养单位经常进行维修,但病害仍不断反复。因此,解决桥面铺装病害的根本方法是改变纵梁的体系结构,即将结构简支、桥面连续结构更换为结构连续梁。同时,增强钢横梁之间的纵向联系,减小吊杆不均匀受力,进而减小吊杆之间的弹性变形差值,从而达到减少桥面连续病害的目的^[4-6]。

长丰桥的吊杆下端锚固在钢横梁内,与钢横梁上缘顶板相交处通过将军帽、减振橡胶等措施进行密封。但此种将吊杆锚头置于钢横梁内的构造措施,造成吊杆检修极其不便;同时在不断的交通动荷载作用下,其密封性不能得到有效保障,锚箱内易积水,进而引起吊杆锚头锈蚀,影响结构安全。因此,本次改造需采用合理的构造措施以解决吊杆锚头积水问题。

4 桥梁改造方案

4.1 桥面系改造方案

本次提升改造工程,主桥桥面系采用将现状的桥面混凝土 T 梁由结构简支、桥面连续体系调整为整体固结连续钢结构桥面体系,以增强桥面整体性,同时减轻桥面结构恒载,保证桥梁安全。主桥桥面系结构采用整体固结连续的钢结构桥面系方案,利

用原有钢横梁向上加高横梁,新旧横梁之间采用焊接方式,以形成整体钢结构桥面体系。原钢横梁6 m的跨间增设2道小横梁。主桥桥面系的标准宽31.9 m,桥面布置维持现状,对两侧2019年军运会整治期间增设的人行道钢纵梁继续利用,同时将系杆箱上的 π 形混凝土梁检修道采用钢结构连续梁替换^[7],见图5、图6。

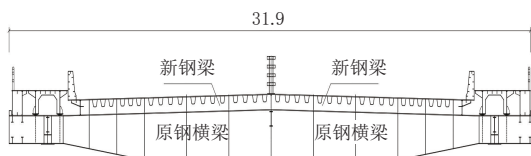


图5 改造后主梁典型断面图(单位:m)

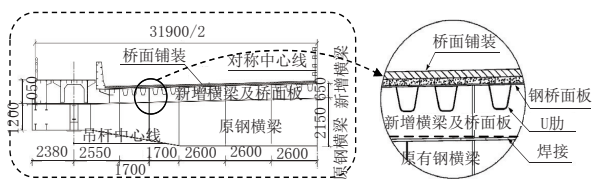


图6 改造后主梁断面大样图(单位:mm)

4.2 吊杆改造方案

原桥吊杆采用标准强度为1 570 MPa的LM5-151平行钢丝成品拉索,本次改造采用22(27)束的1 960 MPa级钢绞线整束挤压吊杆索,增加了吊杆直径,提高了吊杆安全系数储备。同时为了解决原桥吊杆下锚箱内的积水锈蚀问题,除了设置常规的吊杆防水保护罩外,在本次提升改造工程中,结合既有结构的边界条件,对吊杆下端的锚固构造进行优化,采取将吊杆下端锚固于钢横梁下缘的方案,并在锚垫板下缘设置排水孔,同时对吊杆出钢横梁桥面位置处设置了挡水构造^[7]。

4.3 系杆改造方案

长丰桥设计于1998年,系杆作为拱桥的生命线,维持着主桥结构的整体平衡。现状系杆由24束OVM15-31低松弛钢绞线(1 860 MPa级)组成,总张拉力为10 375 t。由于原设计时的规范及理念因素,原设计时将系杆按体外预应力束考虑,安全系数仅为1.3。桥梁自建成通车至今已运营20余年,系杆已超过设计使用年限,且根据现场检测,原有系杆的预应力束钢绞线存在断丝现象,桥梁结构存在着较大的安全隐患。因此本次新换系杆采用24束XG15-37钢绞线成品索(1 960 MPa级),增加了系杆面积,同时由于改造后桥面系恒载的减轻,主拱圈推力亦发生变化,新系杆的总张拉力为9 072 t。

4.4 其他改造方案

(1)主拱圈密实度修复,对于拱肋内混凝土不密

实区域,采用负压辅助注浆对混凝土不密实部位进行填充加固处理。

(2)主桥的现状钢横梁存在锈蚀现象,对钢横梁除锈并重新进行防腐涂装。

(3)对于混凝土的裂缝、破碎等病害,针对性的采用结构胶或环氧砂浆修复。

5 改造效果有限元分析

5.1 有限元模型

采用MIDAS Civil建立杆系有限元模型,其中系杆、吊杆采用只受拉的桁架单元,其余构件均采用空间梁单元,主拱圈采用钢混组合截面模拟,桥面系采用纵横梁体系建模,桩基边界采用“m”法模拟桩-土效应。建立全桥的空间有限元模型见图7。

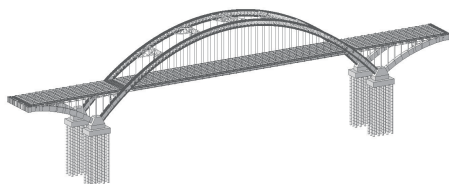


图7 桥梁有限元模型

5.2 计算结果分析

5.2.1 施工阶段结果

(1)在施工阶段短暂状态下,主拱肋钢管最大应力为165 MPa;风撑及腹杆最大应力为77 MPa;原钢横梁最大应力为75 MPa;主拱圈内混凝土最大压应力为18.9 MPa;边拱混凝土最大压应力为13.5 MPa;系杆最大应力为834 MPa;吊杆最大应力为358 MPa。根据计算结果施工阶段主桥结构受力均满足规范要求。

(2)施工阶段主桥结构稳定系数为7.64,满足规范相关要求。

(3)主桥下部结构在改造施工过程及成桥后,其下部结构内力均小于现状内力,下部结构受力改善,其改造施工过程中最大桩顶位移3.7 mm,均满足规范要求。

5.2.2 承载能力极限状态结果(主拱圈)

根据现行的设计规范中规定^[8-10],主桥拱肋主管应采用基本组合分别按单管偏心受压及组合偏心受压构件受压承载能力验算(见表1、表2)。

由表1计算结果可知,基本组合下主拱圈单管受压承载能力最小抗力系数为1.33,位于L/8下主管,满足要求。

由表2计算结果可知,基本组合下主拱圈组合截

表 1 基本组合下主拱圈承载力验算(单管截面)

位置	L/8		L/4		3L/8		拱顶	
	上管	下管	上管	下管	上管	下管	上管	下管
计算长度 / m	3.30	3.30	3.10	3.10	3.05	3.05	3.00	3.00
$N_E / 10^3 \text{ kN}$	1 950	1 950	1 950	1 950	1 950	1 950	1 950	1 950
轴力设计值 γ_N / kN	27 158	38 811	36 189	36 554	28 706	26 788	32 130	8 004
最大弯矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	3 574	3 643	1 049	1 195	460	558	575	584
最大弯矩对应轴力 / kN	24 689	35 283	32 899	33 231	26 096	24 353	29 209	7 276
抗力/ 10^3 kN	46.51	51.67	63.95	63.1	67.15	65.93	66.66	55.15
抗力值/设计值	1.71	1.33	1.77	1.73	2.34	2.46	2.07	6.89

表 2 基本组合下主拱圈承载力验算(组合截面)

位置	拱脚	L/8	L/4	3L/8	拱顶
L_{0x} / m	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5
L_{0y} / m	96.48	96.48	96.48	96.48	96.48
轴力设计值 γ_N / kN	72 390	66 185	70 787	66 031	61 343
最大轴力对应弯矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	62 128	25 280	13 278	37 122	47 985
最大轴力 / kN	65 809	60 168	64 352	60 028	55 766
抗力(混凝土+钢材) / 10^3 kN	77.9	102.26	95.08	74.17	65.69
抗力值设计值	1.08	1.55	1.34	1.12	1.07

面受压承载能力最小抗力系数为 1.07,位于拱顶,满足要求。

5.2.3 承载能力极限状态结果(主桥其他构件)

系杆最大应力为 890 MPa,安全系数 2.2>2.0,满足规范要求;吊杆最大应力为 471 MPa,安全系数 4.1>3.0,满足规范要求;风撑及腹杆等节点构件最大应力为 118 MPa<270 MPa,相应强度满足要求;混凝土边拱肋强度满足相应规范要求。

5.2.4 正常使用极限状态结果

(1)在正常使用状态下,拱肋钢管最大应力为 206 MPa;风撑及腹杆最大应力为 81 MPa;主拱圈内混凝土最大压应力为 22 MPa,均满足规范要求。

(2)正常使用阶段荷载组合下,边拱肋混凝土最大应力为 15 MPa;边拱肋为偏心受压构件,其混凝土截面的 $e/h<0.55$,根据现行设计规范可不进行裂缝宽度验算。

(3)主桥在改造后的结构稳定系数为 7.51,大于 4,满足规范稳定性要求。

6 改造后桥面系计算分析

6.1 有限元模型

采用有限元软件建模分析,钢横梁,跨间横梁,钢纵梁及 U 形加劲肋等均采用板壳单元模拟,为了避免边界条件对局部分析的影响,纵桥向取三跨 18 m 进行计算。计算主要考虑车辆荷载的效应,同时计入铺装、护栏以及结构自重的影响。计算偏安

全考虑,忽略虑桥面铺装层对车轮荷载的扩散作用,即单个车轮与铺装接触面积根据规范为 600 mm(横桥向)×200 mm(顺桥向),车辆的轴重为 140 kN,局部加载考虑 1.3 冲击系数,具体的有限元计算模型见图 8。

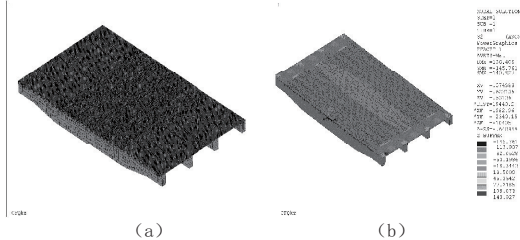


图 8 桥面系有限元模型

6.2 计算分析结果

根据桥面系局部有限元模型的计算分析结果如下:

(1)顶板顺桥向最大压应力 109.0 MPa,最大拉应力 32.4 MPa;横桥向最大压应力 178.0 MPa,最大拉应力 74.8 MPa;最大等效应力为 155.2 MPa。

(2)跨间横梁及小纵梁的顺桥向最大压应力 55.0 MPa,最大拉应力 118.4 MPa;最大等效应力为 129.9 MPa。

(3)U 形加劲肋顺桥向最大压应力 29.74 MPa,最大拉应力 98.4 MPa。

7 结 语

(1)改造后桥面系形成整体性结构,钢结构正交

异性板整体桥面可从根本上解决桥面铺装层的结构性病害,同时桥面板也参与横梁的受力,极大地提高了横梁的应力及刚度储备。

(2)改造后主桥的桥面系恒载减轻约3 800 t,结构的安全储备得到了极大提高;同时本项目通过减轻上部结构恒载,以提高活载的通行能力,改造后桥梁的通行荷载标准由原设计的汽-超20级提升至现行荷载标准城-A级。

(3)针对长丰桥改造工程分别建立了整体及局部有限元模型,通过对施工阶段及成桥后桥梁的受力分析,表明结构内力及刚度均满足现行的规范指标要求,且计算分析结果已用于指导该项目的实施,该项目是目前国内特大型钢管混凝土拱桥改造中规模最大、技术难度最复杂的旧桥改造工程,目前项目已竣工通车(见图9)。

参考文献:

- [1] 武汉市政工程设计研究院有限责任公司.武汉市中环线江汉五桥施工图[Z].武汉:武汉市政工程设计研究院有限责任公司,1998.
- [2] 唐黎明,鲁应慧,刘新痴,等.武汉市江汉五桥的设计[J].城市道桥



图9 项目已竣工通车

与防洪,2002(2):7-11.

- [3] 中铁大桥科学研究院有限公司.武汉市长丰桥检测报告[Z].武汉:中铁大桥科学研究院有限公司,2020-2022.
- [4] 张武,吴运宏.钢管混凝土拱桥动态悬吊式主梁结构改造技术[J].桥梁建设,2016,46(2):103-108.
- [5] 陈宝春,范冰辉,余印根,等.钢管混凝土拱桥强健性设计[J].桥梁建设,2016,46(6):88-93.
- [6] 陈红.丫髻沙大桥桥面系加固设计[J].桥梁建设,2013,43(2):93-98.
- [7] 武汉市政工程设计研究院有限责任公司.长丰桥提升改造工程施工图[Z].武汉:武汉市政工程设计研究院有限责任公司,2023.
- [8] GB 50923—2013,钢管混凝土拱桥技术规范[S].
- [9] JTG/T D65—06—2015,公路钢管混凝土拱桥设计规范[S].
- [10] JTG/T J22—2008,公路桥梁加固设计规范[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:roadbridgeflood@163.com

