

基于增设刚性纵梁的柔性系杆拱桥力学性能研究

丁明亚¹, 李 凌², 许 洪³, 王 磊³, 朱利明²

(1. 无锡市市政设施管理中心, 江苏 无锡 214123; 2. 南京工业大学 交通运输工程学院, 江苏 南京 210000;

3. 无锡市市政设施建设工程有限公司, 江苏 无锡 214111)

摘 要: 以某柔性系杆拱桥为研究对象, 通过增设刚性纵梁, 改善柔性系杆拱桥在吊杆断裂时易发生连续倒塌的问题, 提升桥梁的安全性。采用 MIDAS Civil2021 建立全桥有限元模型, 对比改造前后桥梁在正常使用状态下的受力特性和自振特性。结果表明, 改造方案对吊杆应力有显著改善, 尤其在可变作用下, 1#吊杆应力减小 72.1%; 纵梁竖向位移最大减小 8.1 mm, 纵梁应力最大减小 64.2%; 拱肋在可变作用下的竖向位移显著降低, 拱顶竖向位移最大减小 11.5%。改造对桥梁的刚度和振动特性产生了积极影响。该改造方案能显著提升柔性系杆拱桥的安全性和受力性能。

关键词: 钢管系杆拱桥; 柔性系杆; 加固改造; 后加纵梁

中图分类号: U448.22; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)11-0132-06

Research on Mechanical Properties of Flexible Bowstring Arch Bridge Based on Addition of Rigid Longitudinal Beam

DING Mingya¹, LI Ling², XU Qi³, WANG Lei³, ZHU Liming²

(1. Wuxi Municipal Facilities Management Center, Wuxi 214123, China; 2. Transportation Engineering College, Nanjing Tech

University, Nanjing 210000, China; 3. Wuxi Municipal Facilities Construction Engineering Co., Ltd., Wuxi 214111, China)

Abstract: Taking a flexible bowstring arch bridge as the research object, by adding rigid longitudinal beams, the problem that the flexible bowstring arch bridge is prone to progressive collapse when the suspender is broken is improved, and the safety of the bridge is improved. MIDAS Civil 2021 is used to establish the finite element model of the whole bridge to compare the mechanical characteristics and natural vibration characteristics of the bridge before and after the reconstruction under normal use. The results show that the stress of the suspender is significantly improved by the reconstruction scheme, and especially under the variable effect, the stress of 1# suspender is reduced by 72.1%. The maximum vertical displacement of the longitudinal beam is reduced by 8.1mm, and the maximum stress of the longitudinal beam is reduced by 64.2%. The vertical displacement of arch rib under variable action is significantly reduced, and the maximum vertical displacement of arch crown is reduced by 11.5%. The reconstruction has a positive impact on the stiffness and vibration characteristics of the bridge. The reconstruction scheme can significantly improve the safety and mechanical performance of the flexible bowstring arch bridge.

Keywords: steel pipe bowstring arch bridge; flexible tie rod; reinforcement and reconstruction; post-added longitudinal beam

0 引 言

在现代桥梁工程领域, 新型组合体系拱桥^[1]得到了广泛应用。此类组合结构体系拱桥相较于单一的拱结构或梁结构桥, 展现出更优越的受力性能和更强的跨越能力, 因此发展迅速。系杆拱桥作为其

中一种极具代表性的梁拱组合体系桥^[2-6], 受到了广泛关注。

对于钢管系杆拱桥中仅承担水平推力^[7-9]的系杆索, 可称为特殊的柔性系杆。采用柔性系杆的钢管系杆拱桥因其对地基要求较低、承载能力较大^[10], 在我国早期得到了广泛应用。然而, 由于当时理论研究的不足, 柔性系杆的应用也引发了一系列问题, 尤其是对于桥面系缺乏刚性纵梁的系杆拱桥^[11], 其桥面系在吊杆断裂时容易发生塌陷甚至垮塌现象^[12-14]。因此, 针对钢管系杆拱桥中柔性系杆存在的问题展开加固改造研究。

收稿日期: 2025-03-05

作者简介: 丁明亚(1978—), 女, 本科, 高级工程师, 从事桥梁养护管理工作。

通信作者: 朱利明(1968—), 男, 本科, 教授, 从事桥梁检测、监测工作。电子信箱: 188383679@qq.com

早期修建的钢管系杆拱桥,其系杆常出现锈蚀损伤^[15]现象,严重时甚至会发生系杆突然断裂^[16]的事故。事故发生后,众多专家对这类结构形式的桥面系进行了深入分析研究,并提出了多种加固改造方案。

陈宝春等^[17]通过搜集我国中、下承式钢管混凝土拱桥桥梁垮塌事故案例并对产生的原因分析,指出桥梁发生垮塌事故的起因,一方面是因为吊杆耐久性不足而发生吊杆断裂,另一方面是因为桥面系采用了强健性较差的悬吊式桥面系。李晓莉等^[18]通过研究了悬吊式桥面系拱桥的受力特性及性能评价。结果表明,这类桥的拱脚负弯矩较为明显,在车辆荷载作用下边吊杆容易承受疲劳荷载。余印根^[19]对断索作用下悬吊式桥面系的动力响应进行研究,结果表明,内力大的吊杆,断索时产生动力冲击作用越大,并且通过实测桥梁分析,建议断索分析时桥梁阻尼比选择 0.020。

陈康明等^[20]以模型试验和有限元分析相结合,对中、下承式采用第五类桥面系的拱桥进行加固改造设计。结果表明,改造后桥梁极限承载能力得到提升,钢管桁架改造方案有效提升了桥面系强健性。谭岩斌等^[21]利用钢箱混凝土组合梁作为加劲纵梁对中承式拱桥的悬吊式桥面进行加固,并利用模型验证加固改造效果。结果表明,改造后桥梁在荷载作用下的振动效果明显减弱,有效提高了拱桥舒适度。

综合已有研究成果发现,对于拱桥悬吊式桥面系的加固改造研究较多,但由于设计理念的局限性,早期下承式钢管系杆拱桥因采用柔性系杆,桥面系往往缺乏刚性纵梁,导致结构整体性较差。交通部于 2020 年 12 月 25 日颁布的《公路危旧桥梁改造行动方案的通知》^[22]明确指出,此类桥梁需进行加固设计,以确保在吊杆断裂时桥面体系不发生垮塌。

基于此,以无锡华清大桥为工程背景,通过有限元模拟分析,提出在桥面系横梁间增设刚性纵梁的加固改造方案,并将其与原横梁连接,以增强柔性系杆的承载能力,为解决柔性系杆易损伤以及吊杆断裂引发的结构连续倒塌问题提供一种有效的改造思路。

1 工程概况

无锡华清大桥是一座下承式钢管系杆拱桥,华清大桥位于无锡市南部,华清路起点处,跨越京杭大运河,基本呈南北走向,2005 年通车。华清大桥全桥

长 487 m,主桥为净跨径 132 m、净矢高 33 m 的下承式钢管混凝土系杆拱桥,总体布置如图 1 所示。

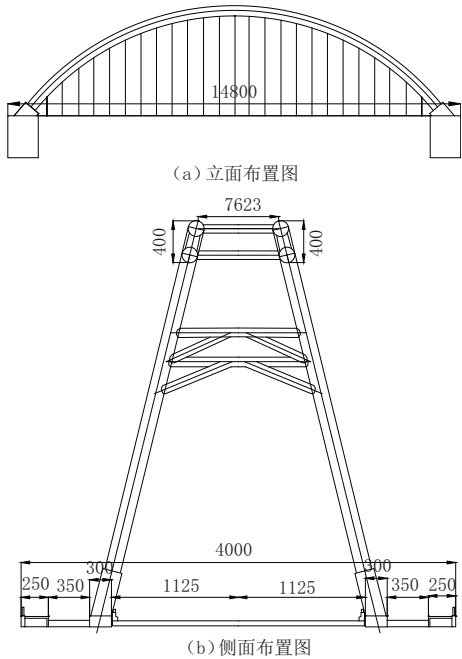


图 1 华清大桥立面及侧面布置图(单位:cm)

上部结构由拱肋、吊杆、系杆、横梁、桥面板等部分组成。拱轴线为悬链线,拱轴系数 1.543,净矢跨比为 1/4,每条拱肋为等截面哑铃形钢管混凝土结构,高 4.0 m,宽 1.5 m,由两根直径 1.5 m 的钢管组成,上下两钢管间用缀板连接,上下弦管及缀板内灌注 C50 无收缩混凝土,拱肋间设三道横撑,其中一道 X 形撑,两道 K 形撑。吊杆为平行钢丝束,共 26 对,间距为 5 m,系杆共 24 束,布置在拱肋下方,穿过拱脚,锚固于主墩上,横梁为钢箱结构,桥面板为钢筋混凝土“π”型板。

该桥于 2022 年进行常规检测,对本桥按照《城市桥梁养护技术标准》(CJJ 99—2017)桥梁技术状况评定标准进行评定,该桥当前的技术状况总体评定为合格级。通过对病害分析,造成评级较低的主要原因是,吊杆以及系杆病害处扣分较多,病害最严重。

通过对吊杆及系杆处病害分析发现,部分系杆锚头已经存在渗水现象,此时锚头内部油脂覆盖差,油脂劣化,锚杯表面明显锈蚀,外露钢绞线锈蚀。吊杆个别锚头存在水渍,虽然不存在明显积水的情况,但是根据之前的对吊杆的检测结果显示,全桥 52 根吊杆有 34 根吊杆可能存在轻微腐蚀或局部结构异常的吊杆,吊索内部可能存在冷凝水、结晶水现象。同时因为本桥为采用柔性系杆而缺乏刚性纵梁的悬吊式桥面系,结构整体性较差,因此有必要对柔性系杆进行改造设计,从而增强结构安全性。

2 改造方案

原吊杆横梁间的钢纵梁设置较弱,根据《公路危旧桥梁排查和改造技术要求》(交通运输部2021年2月),下承式拱桥吊杆更换时,对于未设加劲纵梁的结构宜增设劲性纵梁,防止因单根吊索失效后引起桥面板坍塌。

针对本桥的特殊性,在桥梁两侧各增设一道钢纵梁,与原桥钢横梁通过节点板焊接的方式连接,将后加纵梁作为柔性系杆的补强设计,从而能实现在吊杆断裂时桥面系不会出现整体坍塌的问题。后加纵梁平面位置图及立面位置图如图2、图3所示。

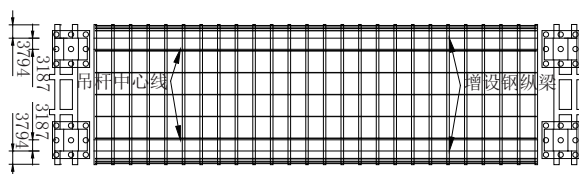


图2 后加纵梁平面示意图(单位:mm)

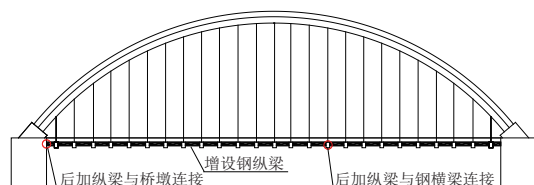


图3 后加纵梁立面示意图

考虑到钢横梁与后加纵梁连接问题以及现有改造案例,将后加纵梁截面形式定为工字钢截面,并将工字钢上下翼缘板厚度设置成与钢横梁顶底板相同。最终确定钢纵梁的高度为1.557 m,纵梁翼板宽度取值为0.5 m,腹板厚度为16 mm,上翼板厚度为30 mm、下翼板厚度为20 mm。工字钢材料采用Q355D。工字钢具体尺寸如图4所示。

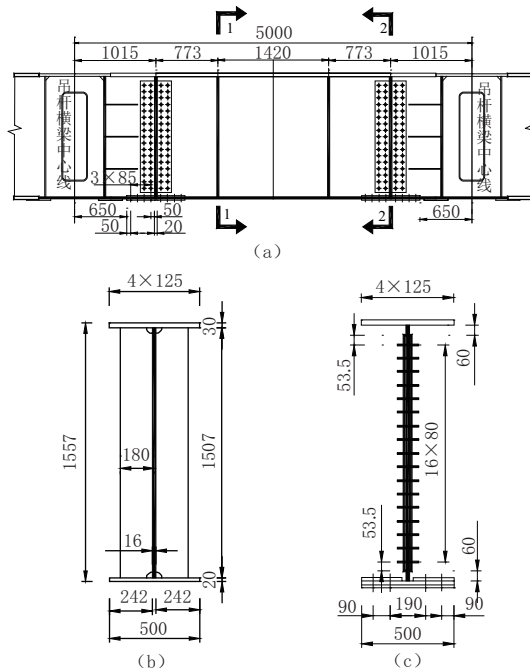


图4 后加工字钢具体尺寸

改造后,新增108个后加钢纵梁单元(Q355D材质),模型节点数增至4 578个,单元数增至5261个,后加纵梁与钢横梁共节点连接,与原纵梁刚性连接。主要构件编号:拱肋A、B,吊杆1#~26#(B侧)、1' #~26' # (A侧),钢横梁1#~26#,原纵梁Z1~Z5,后加纵梁HZ1~HZ2。具体名称及位置如图6所示

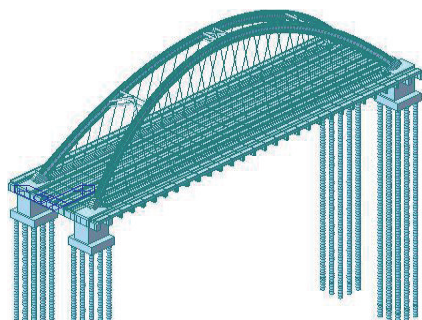


图5 改造前有限元模型

3 正常使用状态下结构受力分析

3.1 有限元模型建立

本文利用MIDAS Civil2021建立全桥有限元模型,包含拱肋、桥面系、加劲纵梁、端横梁、钢横梁、桩基等主要构件,采用梁单元模拟、系杆和吊杆采用桁架单元模拟。模型共有4 466个节点、5153个单元。

拱肋采用施工联合截面模拟^[23-25],横撑与拱肋刚性连接,吊杆和系杆通过刚性连接模拟实际连接并施加初张力。桥面系纵梁与钢横梁共节点连接,释放约束以模拟实际受力。桩基采用梁单元结合m值法土弹簧模拟^[26-27],桩底固结并与承台刚性连接。最终整桥模型如图5所示。

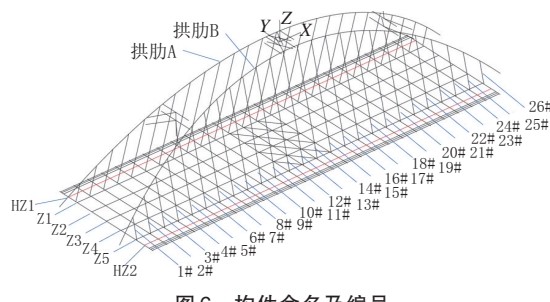
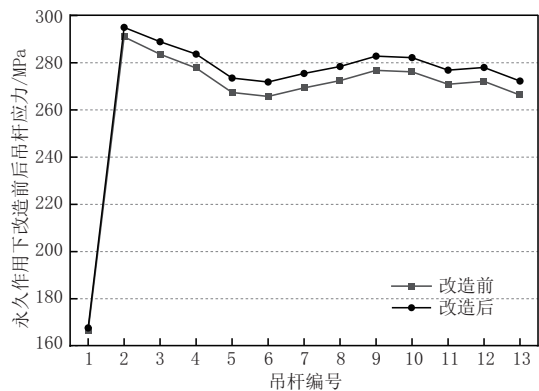


图6 构件命名及编号

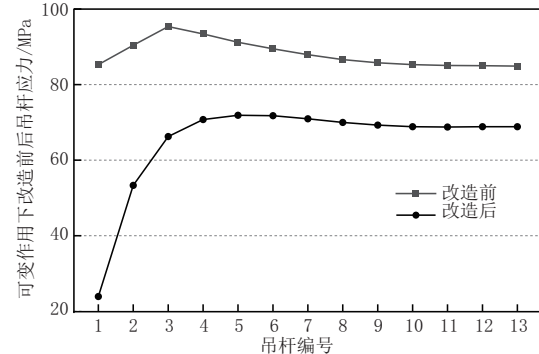
3.2 吊杆受力分析

本桥横向和纵向都为对称结构,选取左半幅1#~13#吊杆,对改造前后的吊杆在不同工况下的应力进行分析,如图7所示。

由图7(a)可知,吊杆在永久作用下有应力增大



(a)永久作用下改造前后吊杆应力



(b)可变作用下改造前后吊杆应力

图 7 改造后吊杆应力变化

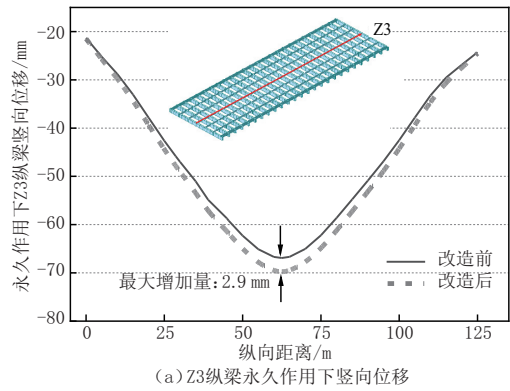
效应。吊杆应力变化最大出现在6#吊杆处,应力增长了2.3%,从边吊杆到长吊杆的应力变化整体呈现逐渐增长的趋势。后加纵梁增大了桥梁恒载,引起吊杆轴力增大,但最大增长率不超过3%,改造方案不会对原桥造成很大影响。由图7(b)可知,吊杆在可变作用下应力产生较大的影响,在1#吊杆位置处,吊杆应力最大减小了72.1%,由原先的85.3 MPa减小为23.9 MPa,应力减小明显。

3.3 原加劲纵梁受力分析

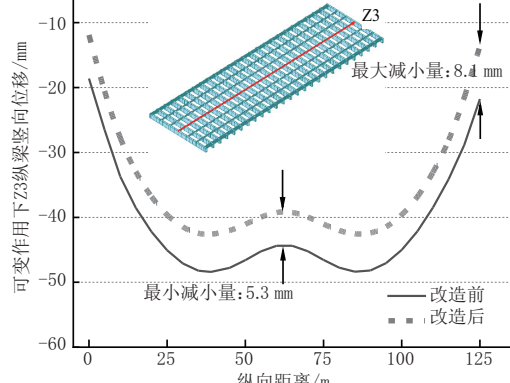
对变化最大的Z3纵梁进行分析,分析其在改造前后应力和位移的变化情况。

(1)原加劲纵梁位移变化分析

对改造前后的Z3纵梁在不同工况下的竖向位移结果分析,具体如图8所示。



(a) Z3纵梁永久作用下竖向位移



(b) Z3纵梁可变作用下竖向位移

图 8 Z3纵梁改造后竖向位移变化

由图8(a)分析可知,在永久作用下,纵梁竖向位移出现小幅度增大,最大出现在钢纵梁的中点处,为2.9 mm,最大变化率不超过5%,整体来看后加纵梁对原结构影响并不大;由图8(b)分析可知,后加纵梁改造方案对纵梁在可变作用下的影响较大,整体降低了纵梁的竖向位移,纵梁在端点处位移下降最大,此时最大位移减少了8.1 mm,下降了约37%,在跨中位置处下降较小,为5.3 mm,下降了11.5%。改造方案明显改善了纵梁在可变作用下的竖向位移情况。

(2)原加劲纵梁应力变化分析

分析Z3纵梁在两种不同作用组合下的最大拉压应力结果,研究改造方案对其影响,具体结果如表1所列。

表 1 Z3纵梁改造后应力变化

作用组合	改造前		改造后		变化率	
	最大拉应力/MPa	最大压应力/MPa	最大拉应力/MPa	最大压应力/MPa	最大拉应力变化	最大压应力变化
永久作用	16.2	-30.5	17.1	-29.7	5.5%	-2.6%
可变作用	109.7	-40.7	39.3	-21.4	-64.2%	-47.4%

分析表1发现,在永久作用下应力变化幅度较小,拉应力小幅度增长了5.5%,压应力减小了2.6%,后加纵梁方案对原桥梁结构影响较小;在可变作用下,原结构应力增长较大,这说明可变对结构的影响较大。改造后纵梁应力得到明显改善,最大拉应力

由最大109.7 MPa减小到39.3 MPa,减小了64.2%,最大压应力由最大40.7 MPa减小到21.4 MPa,减小了47.4%。后加纵梁方案改善效果明显。

3.4 钢横梁受力分析

通过上文分析,改造方案对于纵梁两端点有较

大影响。改造方案对边横梁的影响更大,因此选取1#钢横梁,研究其在改造前后应力和位移上的变化。

(1)钢横梁位移变化分析

研究改造前后1#钢横梁在两种作用组合下的竖向位移变化情况,如图9所示。

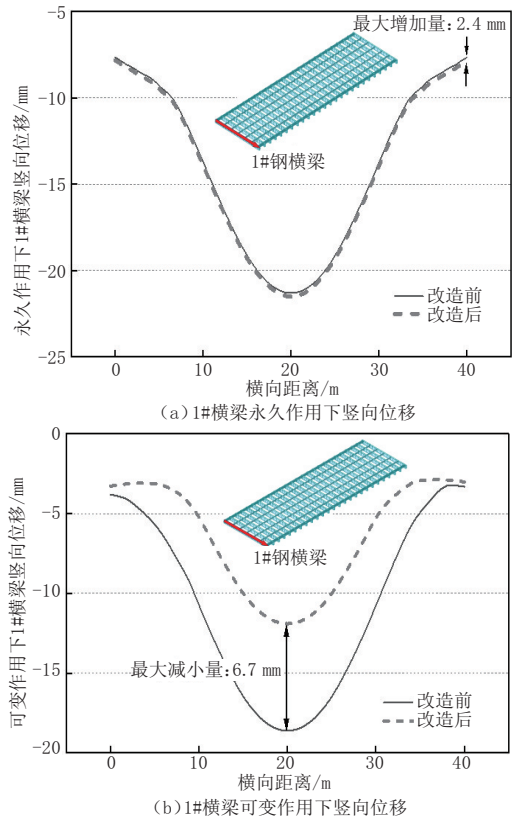


图9 1#横梁改造后竖向位移变化

对图9(a)分析发现,在永久作用下,钢横梁竖向位移有小幅度的增大。其中变化最大位置处增大了2.65%,出现在钢横梁的端点处,变化幅度不大,恒载对结构影响较小。由图9(b)可以看到,后加纵梁方案对钢横梁在可变作用下的竖向位移影响较大,由原来的下降18.6 mm降低至下降11.9 mm,改造方案大幅度降低了横梁在可变作用下的竖向位移情况,有效降低了钢横梁在可变作用下的位移变化幅度。

(2)钢横梁应力变化分析

对1#钢横梁应力进行分析,分析钢横梁在永久和可变作用下的最大拉应力及最大压应力变化,如表2所列。

通过对表2分析可知,在永久作用下,钢横梁最

大应力有一定的增大效应,其中最大压应力增大了1.7%,最大拉应力增大了0.2%,整体变化幅度较小,后加纵梁方案对原结构影响并不大;可变作用下,钢横梁应力有了明显减小现象,最大拉应力减小了10.9%,最大压应力减小了8.2%。虽然在永久作用下横梁应力由小幅度增大,但后加纵梁方案有效减小了钢横梁在可变下的受力情况,有较好的改善效果。

3.5 拱肋受力分析

本桥为横向、纵向均为对称结构,所以只选择了拱肋B左半幅,分别选取拱脚截面、L/8截面、L/4截面、3L/8截面及跨中截面作为主要控制截面,分析其在改造前后应力和位移上的变化。

3.6 拱肋位移变化分析

研究拱肋竖向位移在改造前后的变化,如图10所示。

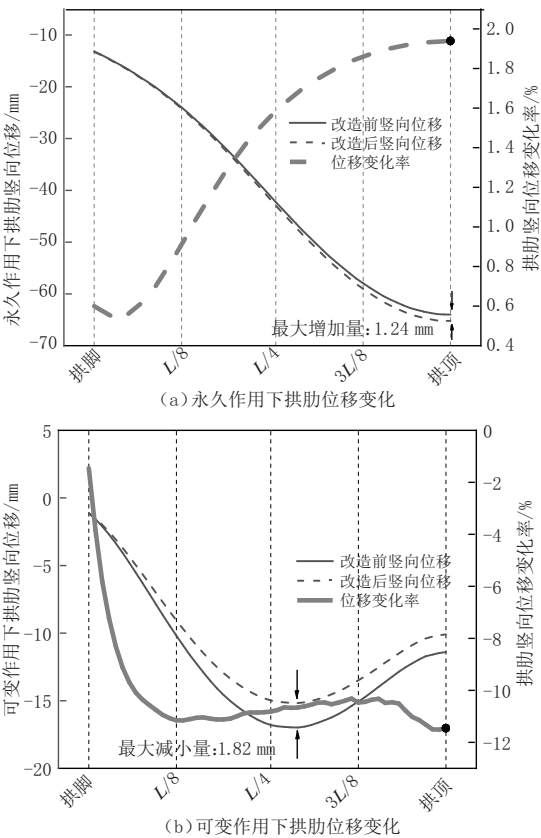


图10 拱肋改造后位移变化

通过对图10(a)分析,在永久作用下,拱肋竖向位移有所增大,整体变化幅度不超过2%,改造方案对拱肋在永久作用下的影响较小;对图10(b)分析,

表2 1#横梁改造后应力变化

作用组合	改造前		改造后		变化率	
	最大拉应力/MPa	最大压应力/MPa	最大拉应力/MPa	最大压应力/MPa	最大拉应力变化	最大压应力变化
永久作用	36.5	-44.6	36.6	-45.4	0.2%	1.7%
可变作用	50.4	-36.6	44.9	-33.6	-10.9%	-8.2%

在可变作用下,整体竖向位移减小幅度趋于定值,减小了 11.5% 左右。后加纵梁改造方案对于可变作用效果明显,能有效减小拱肋在可变作用的竖向位移变化。

3.7 拱肋应力变化分析

研究关键截面位置处的拱肋压应力变化,可变和永久作用时均只考虑最大压应力的变化,如表 3 所列。

表 3 拱肋改造后压应力变化

作用组合	改造变化	拱脚	L/8 截面	L/4 截面	3L/8 截面	拱顶
永久作用	改造前应/MPa	-106.9	-86.1	-63.1	-75.5	-82.7
	改造后应/MPa	-108.0	-87.3	-63.8	-76.4	-83.6
	变化率/%	1.0	1.4	1.1	1.2	1.1
可变作用	改造前应/MPa	-21.1	-13.4	-16.3	-17.1	-13.0
	改造后应/MPa	-16.6	-12.3	-14.1	-14.7	-11.3
	变化率/%	-21.3	-8.2	-13.5	-14.0	-13.1

从表 3 中可以看出,在永久作用下拱肋最大压应力有一定增大现象,不超过 2%,后加纵梁方案对拱肋在永久作用下的影响很小;在可变作用下此时拱脚最大压应力减小了 21.3%,改造方案对拱肋在可变作用下的应力有较大的影响,整体减小了拱肋压应力。

3.8 桥梁改造前后自振特性分析

采用 lanczos 迭代法对本桥改造前后的自振特性进行分析。表 4 列出了结构前十阶的自振频率与振型特征。

表 4 自振频率及振型特征

模态 号	自振频率/Hz			特征
	改造前	改造后	变化 率/%	
1	0.339	0.341	0.73	拱肋横向一阶侧弯
2	0.423	0.426	0.58	桥面系纵向水平移动
3	0.485	0.491	1.32	拱肋一阶扭转+桥面系一阶扭转
4	0.571	0.579	0.55	拱肋二阶扭转+桥面系二阶扭转
5	0.719	0.725	0.71	拱肋三阶扭转+桥面系三阶扭转
6	0.801	0.814	1.63	拱肋四阶扭转+桥面系四阶扭转
7	0.853	0.888	4.03	桥面系一阶竖弯
8	1.205	1.228	1.88	拱肋五阶扭转+桥面系五阶扭转
9	1.252	1.290	2.80	桥面系二阶竖弯
10	1.285	1.312	1.84	桥面系横弯

通过表 4 分析可知,改造后,桥梁的自振频率普遍提高,变化率在 0.55% 到 4.03% 之间。其中,桥面系一阶竖弯的自振频率提升最为显著,从 0.853 Hz 增加到 0.888 Hz,变化率为 4.03%。这表明改造对桥梁的刚度和振动特性产生了积极影响。

4 结 论

通过改造前和改造后模型对比,分析了改造前后桥梁主要构件在不同工况下的受力特性变化以及改造前后自振特性的变化,得出以下结论。

(1)在永久作用下,吊杆应力增加,但变化幅度较小,改造方案对原桥吊杆影响较小。在可变作用下,吊杆应力明显减小,尤其 1#吊杆减小了 72.1%。改善效果明显。

(2)改造后钢横梁和原加劲纵梁在永久作用下各项指标都有一定的增大,增长幅度均在 5% 以内,改造方案对原结构桥面系影响较小;在可变作用工况下,竖向位移最大减小了 8.1 mm,应力最大减小了 64.2%,有效改善了原有加劲纵梁在可变作用下的受力情况。

(3)在永久作用下拱肋各项数据均有一定增大,但增幅较小,这说明改造方案对原桥拱肋影响较小。在可变作用下,拱顶位置处竖向位移最大减小了 11.5%。改善效果明显。

(4)改造后自振频率最小变化率为 0.55%,最大变化率为 4.03%,桥梁的自振频率普遍提高,改造对桥梁的刚度和振动特性产生了积极影响。

参考文献:

[1] 黄育凡,吴庆雄,陈康明. 钢管混凝土拱梁组合桥整体架设施工受力性能分析[J]. 桥梁建设, 2018, 48(1): 25-30.

[2] 邵旭东. 桥梁工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.

[3] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[4] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.

[5] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[6] 肖汝诚. 桥梁结构体系[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.

[7] 王庆贺,王超,何英,等. 下承式哑铃型钢管混凝土系杆拱桥静力性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(3): 496-503.

[8] 周列茅. 钢管混凝土系杆拱桥关键节点的受力行为[J]. 公路交通科技, 2012, 29(4): 46-54.

[9] 陈钊,王建欣,王江宇,等. 钢管混凝土系杆拱桥施工中受力性能及稳定性分析[J]. 桥梁建设, 2012, 42(6): 27-32.

[10] 韩林海,牟廷敏,王法承,等. 钢管混凝土混合结构设计原理及其在桥梁工程中的应用[J]. 土木工程学报, 2020, 53(5): 1-24.

[11] 蒋超越,李章瑜,陈浩. 吊杆拱桥新增加劲纵梁结构形式比选及优化设计[J]. 公路交通技术, 2021, 37(3): 105-109.

[12] 陈康明,吴庆雄,罗健平,等. 考虑吊杆断裂动力作用的钢管混凝土拱桥等效静力计算方法[J]. 土木工程学报, 2022, 156(6): 63-74.

[13] 吴庆雄,郑樵风,尹永胜等. 考虑吊杆断裂的拱梁组合桥动力响应分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2023(3): 409-416.

[14] 吴庆雄,罗健平,魏小康,等. 考虑吊杆断裂过程的下承式钢管混