

独塔人行悬索桥升级改造设计

张红喜¹, 乔耀星¹, 刘世明^{2,3*}

(1. 河南省城乡建筑设计院有限公司, 河南 郑州 450000; 2. 华北水利水电大学 土木与交通学院;
3. 华北水利水电大学 河南省生态建材工程国际联合实验室)

摘要:陕西省汉中市独塔人行悬索旧桥锚碇端部间距为 69.394 m, 总宽 2.15 m, 钢桁架主梁和吊杆锈蚀严重。为提升汉中市独塔人行悬索桥的景观效果, 在充分论证和有限元分析基础上, 提出该桥的升级改造方案。利用原有的主塔、主缆、锚碇, 拆除锈蚀严重的钢桁架主梁、吊杆和木质桥面板, 采用纵横梁格体系主梁和玻璃桥面板, 增设了抗风主索和抗风拉索。采用桥梁专用有限元分析软件 Midas/Civil 2019, 构建旧梁拆除和新桥计算分析模型。计算结果表明: 桥梁旧桥拆除施工顺序可行, 新桥各构件应力和变形满足规范要求。

关键词: 人行悬索桥; 独塔; 升级改造; 有限元分析; 景观桥梁; 玻璃桥面

1 工程概况

汉中市独塔人行悬索桥位于陕西省汉中市南郑县黎坪景区, 桥位处距县城约 60 km。南接四川旺苍县鼓城乡、北邻勉县漆树坝镇、西与宁强二郎坝镇接壤, 东与黄官镇、两河镇相邻, 所在区域地势变化不大, 桥梁锚碇尾端间距 69.394 m, 总宽 2.15 m, 净宽 1.8 m。原悬索桥采用 3 根直径 46 mm 柔性钢丝绳作为受力构件, 重力式锚碇。主塔采用单排双柱式结构, 从上到下, 圆形立柱直径分别为 1.1、1.2 和 1.4 m, 在立柱变截面处和索鞍处均设置横系梁, 立柱下布置承台与桩基础。主梁采用型钢钢桁架结构形式, 桥面为木板结构。由于修建年代久远且养护不及时, 该桥桁架梁锈蚀明显, 严重影响桥梁景观效果, 如图 1 所示。为整体提升桥梁景观效果, 满足景区对景观的高水平需要, 对现有独塔人行悬索桥进行升级改造。

2 桥梁总体设计

在汉中市独塔人行悬索桥升级改造设计过程中, 通过对大桥进行多次现场勘察和调研, 总结该桥设计

主要存在如下技术重点与难点: ① 大幅度提升旧桥景观效果。桥梁升级改造设计与新建桥梁不同, 需要结合现有桥型和周围的环境, 合理确定景观设计方案, 达到桥梁景观与周围环境融合的效果; ② 原有结构构件的利用问题。在现场勘察与工程质量检测的基础上, 开展充分分析与论证, 力求最大限度地利用原有结构构件, 以达到减少工程总投资的目的; ③ 旧桥构件拆除问题。在确定可利用的构件后, 对原有不利用构件拆除过程中, 应进行必要的计算分析, 以确保对能利用构件的不利影响降到最低。



图 1 汉中市独塔人行悬索旧桥图

在不降低现有桥梁承载力和净宽的前提下, 综合考虑景观效果提升、拆除施工可行性和工程经济性等,

收稿日期: 2021-09-26(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51508189); 长安大学实验室开放基金项目(编号: 2014G1502007); 河南省科技攻关项目(编号: 162102210234); 河南省高等学校重点科研项目(编号: 19A560013); 国家留学基金委资助项目(编号: 201808410438)

作者简介: 张红喜, 男, 大学本科, 工程师. E-mail: 18530899095@163.com

* 通信作者: 刘世明, 男, 博士, 副教授. E-mail: sokd_0@163.com

汉中市人行桥升级改造时利用现有的主缆、索夹及连接夹、锚碇、主塔和基础,拆除锈蚀严重的钢桁架主缆、栏杆、木桥面板、吊杆及下连接件。

为提升桥梁整体景观效果,主要采用了如下措施和方法:① 采用玻璃桥面代替原木质桥面板,提高桥梁的透空性,增强行人的视觉冲击力及心理刺激体验;② 采用轻型横、纵梁格结构体系代替锈蚀严重的钢桁架结构体系,提高主梁轻盈效果;③ 新增抗风主索及拉索构件,增强行人安全感;④ 采用透空性强、景观效果好的钢管栏杆代替现有栏杆;⑤ 通过对主缆、横梁、纵梁、吊杆、抗风主索及拉索等构件涂装不同的颜色,

提升桥梁色彩的层次感和美学享受。

汉中市独塔人行悬索桥升级改造后,桥梁全长 54.594 m。因悬索桥的矢跨比对结构受力影响较大,通过计算分析及设计优化,确定矢高为 8.09 m,矢跨比为 1/7.366。桥梁结构总宽度为 2.4 m,净宽为 1.8 m,其桥型布置如图 2 所示。主体结构设计基准期为 100 年,安全等级为二级。人群荷载为 4 kN/m^2 ,基本风压为 0.35 kN/m^2 ,基本雪压为 0.25 kN/m^2 ,温度变化范围为 $-5 \sim 33 \text{ }^{\circ}\text{C}$,安装温度为 $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。工程区地震基本烈度为Ⅶ度,动峰值加速度为 $0.1g$,按Ⅷ度抗震设防。

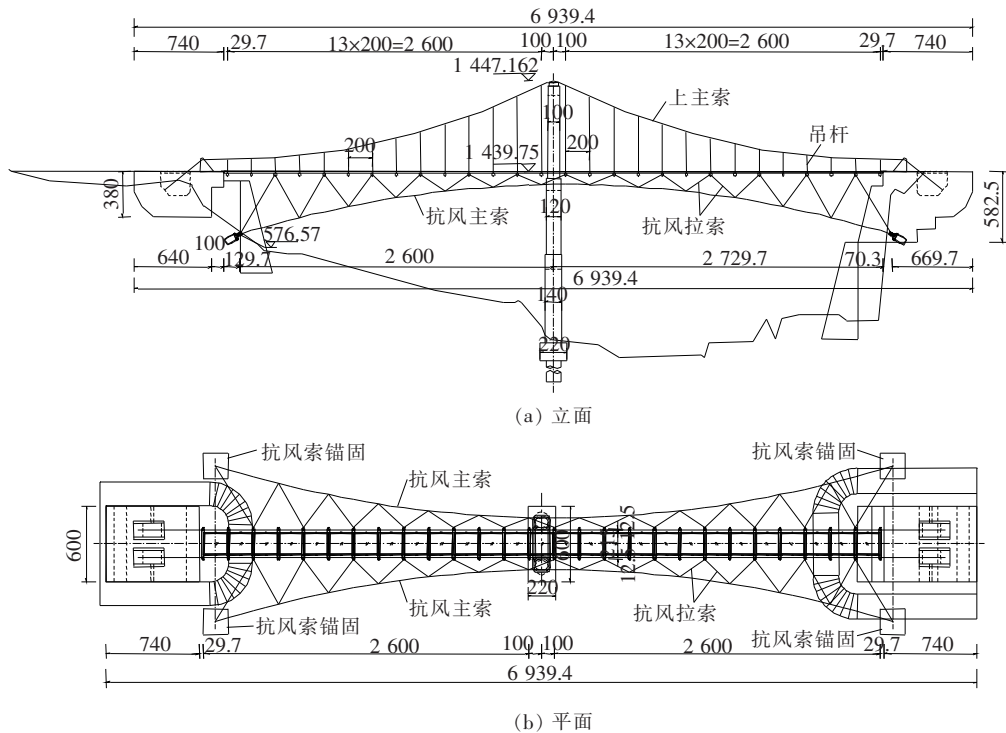


图 2 汉中市独塔人行悬索桥桥型布置图(单位:cm)

3 结构构件设计

3.1 桥面系构造设计

汉中市独塔人行悬索桥改造前桥面系为型钢钢桁架结构体系,如图 3(a)所示。升级改造后,拆除原吊杆及以下部分构件,采用轻型横梁受力为主的纵横梁格体系,如图 3(b)所示。横梁长 2.4 m,截面采用边长为 200 mm、壁厚为 6 mm 的方钢管,纵桥向间距为 2 m,两侧外挂耳板与抗风拉索连接。纵梁固定于横梁上方,长度有 1.8 m 和 2 m 两种类型,截面采用边长为 150 mm×100 mm、壁厚为 5 mm 的矩形钢管。

人行桥面采用 3 层夹胶钢化玻璃桥面板,为提高耐久性,在钢化玻璃间隙间采用玻璃胶密实,钢化玻璃厚度为 $(12+1.14+12+1.14+12) \text{ mm}$,钢化玻璃下方垫厚 15 mm、宽 40 mm 胶条,并嵌入纵梁梁体。钢管栏杆立柱布置于横梁上,立柱采用直径 42 mm、厚 3 mm 的钢管制作。

3.2 吊杆构造设计

根据吊杆受力特点,并综合考虑材料性能、制造加工、安装维护、后期更换等因素,升级改造后桥梁吊杆采用直径 25 mm 组合吊杆,每一吊点设 1 根吊杆,与横梁采用夹板式连接。可通过上吊杆长度调节桥面高度。

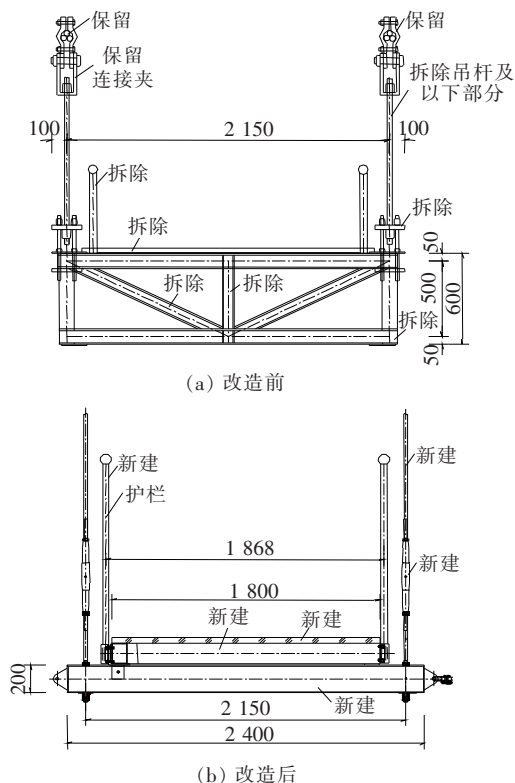


图3 桥面系布置图(单位:cm)

3.3 抗风索构造设计

为增加轻型梁格主梁体系稳定性,在主梁下方两侧设置抗风主索。抗风主索由2根镀锌钢丝绳组成,通过抗风主索索夹锁紧在一起,在两端锚固于抗风索锚桩。抗风主索公称直径为22 mm。抗风索上下端锚头均采用鸡心扣打结,绳卡禁锢形成环形扣与U形吊扣连接。

抗风拉索将抗风主索和横梁联系在一起,以提高桥面系抗风能力和结构整体刚度。抗风拉索公称直径为12 mm。抗风拉索上下端锚头均采用鸡心扣打结,绳卡禁锢形成环形扣与U形吊扣连接。其余采用动滑轮与横梁及抗风主索间连接。

抗风主索与抗风拉索均采用B级镀锌钢芯钢丝绳,截面形式均为 $6 \times 19s + IWR$,抗拉设计强度均为1670 MPa。

3.4 桥梁施工顺序

桥梁主要施工顺序包括:对称均匀拆除旧桥钢桁架主梁→拆除旧桥吊杆→转换猫道→调整主缆→吊装主梁→安装玻璃桥面板及栏杆→安装抗风主索→安装抗风主索索夹→安装抗风拉索→索夹螺杆二次紧固→主缆及抗风缆防护→进行缆索系统的防护涂装→安装景观照明及避雷设施等→拆除猫道。

4 主桥结构安全验算

4.1 旧桥拆除分析

根据前期桥梁检测 results 和运营情况,采用桥梁专用分析软件 Midas/Civil 2019,构建该桥倒拆分析计算模型。计算结果表明:主缆最大竖向变形为92 mm,主缆应力极值较小,旧桥拆除施工顺序可行,桥梁拆除施工对结构整体影响小。

4.2 升级改造后桥梁静力分析

基于以上倒拆分析计算模型,计算升级改造后梁格体系的主缆、吊杆、风缆单元的初应力和无应力长度,并对计算模型进行恒载下受力验证,完成完整的桥梁计算分析模型,如图4所示。全桥共586个节点,854个单元,模型中桥塔、桥墩及系梁、横梁、纵梁采用梁单元模拟,主缆和风缆按只受拉桁架单元模拟,玻璃桥面板采用板单元模拟。混凝土部分考虑配筋因素,钢材考虑焊接及附属构件的影响,计算模型材料自重考虑5%的附加重量,材料热膨胀系数和温度梯度均按照桥梁通用规范选用。桥梁约束体系对结构安全至关重要,该桥边界条件共66个,将锚碇、风缆基础和桥塔基础视为刚体,主缆在散索鞍处为固结,纵梁与横梁采用主从约束模拟,桥面板与主缆采用固结模拟,桥面端部主梁按只受压弹簧模拟。采用规范规定的荷载组合,开展了承载能力极限状态验算和活荷载下的变形验算。

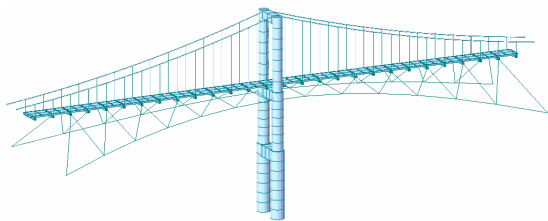


图4 桥梁静力计算分析模型

计算结果表明:在承载能力极限状态下桥面主缆最大应力值为434.2 MPa,对应安全系数为3.8大于3;风缆主索及拉索的最大应力值为372.6 MPa,对应安全系数为4.5大于3,主缆、风缆主索及拉索应力均满足规范要求。吊杆最大拉应力为55.98 MPa,小于Q345钢材强度设计值270 MPa,对应安全系数为4.8大于4,吊杆应力满足规范要求。纵梁、横梁最大组合应力和剪应力极值分别为137、15.4 MPa,均小于Q235钢材组合应力和剪应力设计值190、110 MPa。玻璃桥面板有效应力最大值为13.4 MPa,小于钢化玻

璃设计值 90 MPa。主塔最大拉应力为 0.39 MPa,混凝土整体应力水平较低,不控制设计。

JTG D64—2015《公路钢结构桥梁设计规范》和 JTG/T D65—2015《公路悬索桥设计规范》规定:在人群荷载和风荷载作用下,桥梁结构容许位移不超过计算跨径的 1/150。计算结果表明:在人群荷载作用下,主梁竖向位移极值为 98 mm(计算跨径的 1/483);风荷载下主梁水平向位移极值为 32 mm(计算跨径的 1/908),桥梁结构整体刚度满足规范要求。

4.3 升级改造后桥梁动力分析

在静力分析基础上,将结构自重转为质量,采用兰索斯(Lanczos)方法,开展升级改造后人行桥动力特性分析,得到前 10 阶动力特性参数如表 1 所示,对应的前 3 阶振型如图 5 所示。

表 1 桥梁振动特性

阶数	频率/Hz	周期/s	振型描述
1	1.643	0.608	竖向反对称弯曲
2	1.676	0.597	主缆侧向对称弯曲
3	1.770	0.565	主缆侧向反对称弯曲
4	1.831	0.546	主缆侧向对称弯曲
5	1.833	0.545	主缆侧向对称弯曲
6	1.846	0.542	主缆侧向对称弯曲
7	1.881	0.532	主缆侧向反对称弯曲
8	2.727	0.367	风缆竖向对称弯曲
9	2.763	0.362	风缆侧向平移弯曲
10	3.070	0.326	风缆侧向对称弯曲

由表 1 和图 5 可知:升级改造后人行桥振型单一,前 10 阶振型不存在耦合。该桥竖向基频为 1.643 Hz,小于 CJJ 69—95《城市人行天桥与人行地道技术规范》规定值 3 Hz,建议设置阻尼器以避免与行人产生共振。

5 结语

在汉中市独塔人行悬索桥升级改造设计过程中,针对性地提出升级改造设计的重点和难点,利用现有主缆、桥塔和锚碇,通过纵梁、横梁梁格体系代替钢桁架主梁、钢化玻璃代替木板等具体措施大幅提升桥梁整体景观效果,工程经济性好。有限元分析表明,桥梁

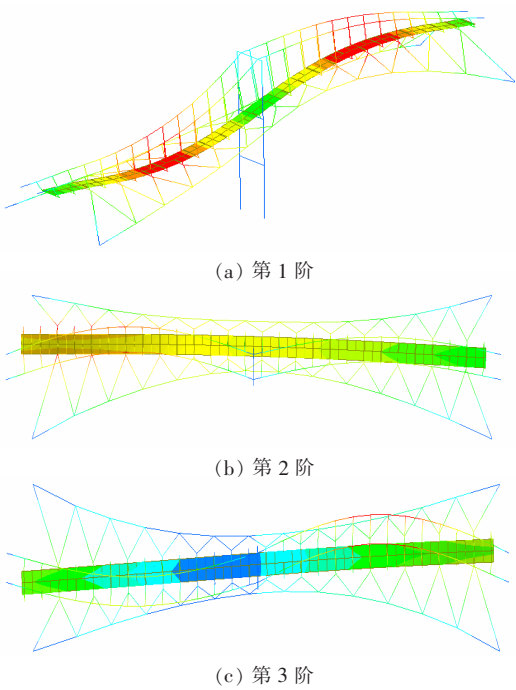


图 5 桥梁振型图

拆除方案切实可行,升级改造后桥梁整体刚度良好,结构承载能力满足规范要求。

参考文献:

[1] 林珈. 某人行景观悬索桥设计[J]. 公路,2017(8).
[2] 慕玉坤,李刚,白鹏翔. 悬索桥拆除方案设计与仿真分析[J]. 公路,2019(5).
[3] 赵少杰,肖丹,王芝兴,等. 大跨径公路悬索桥拆除施工及监控关键技术研究[J]. 中外公路,2017(1).
[4] 王芝兴,赵少杰,余江昱. 某公路钢桁梁悬索桥拆除施工关键技术[J]. 世界桥梁,2018(6).
[5] 李世伟,杨永清,谢宏伟,等. 巽他海峡大桥悬索桥结构体系矢跨比优化设计研究[J]. 中外公路,2018(6).
[6] 方绪镒,王忠彬,石建华. 张家界大峡谷玻璃桥加劲梁设计[J]. 桥梁建设,2017(2).
[7] 郭坤,宣世艳,马亮,等. 张家界大峡谷玻璃桥加劲梁架设施工技术[J]. 世界桥梁,2018(3).
[8] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S].
[9] 王志诚. 棋盘洲长江公路大桥主桥约束体系研究[J]. 中外公路,2018(1).
[10] JTG D64—2015 公路钢结构桥梁设计规范[S].
[11] JTG/T D65—05—2015 公路悬索桥设计规范[S].
[12] CJJ 69—95 城市人行天桥与人行地道技术规范[S].