

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.01.021

空间多肢弯斜钢拱桥设计

李甲丁, 李升玉, 张海平, 于智光
(东南大学建筑设计研究院有限公司, 江苏 南京 210096)

摘要:为满足人民群众更高品质的生活需求,作为城市中最重要公共建筑形式之一,城市桥梁需要更好的呈现建筑美和技术美,从而对桥梁结构设计也提出了更高的要求。青海西宁北川河片区滨河西路桥为更好表现建筑结构形态,并适应道路平面线形和与河道斜交的桥位条件,桥梁结构呈现“空间、多肢、弯斜”的显著特点,属于复杂景观钢拱桥,因此在设计方法上明显有别于常规拱桥。结合桥梁全过程的BIM正向设计,对结构体系、空间拱轴线、多边形变截面多肢拱肋、吊杆及连杆、弯斜钢箱梁等关键设计内容进行了论述和探讨,以期类似城市景观桥梁设计提供参考。

关键词: 钢拱桥;有推力拱;斜弯桥;多肢拱肋;BIM正向设计

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)01-0083-05

1 概述

本项目工程位于西宁市城北区北川河河谷地带,是青海西宁环境综合治理利用世行贷款项目城市排水收集管网工程配套桥梁工程之一。滨河西路属北川河综合治理核心区规划城市道路,道路等级为城市支路,双向两车道,道路红线宽度18 m,设计速度20 km/h,汽车荷载为城-B级。

北川河为黄河上游重要支流湟水河的一级支流,古称苏木莲河。河道在桥位处分为内外河,内河为在原有老河道基础上改造而成的北川河湿地公园生态景观河道;外河为新建60 m宽人工河道,主要承担防洪任务,内外河被人工堤坝相隔。

通过多轮的比选和优化,经过主管部门及相关专家综合评价后,确定依次跨越内河、外河的两跨空间钢拱桥方案为实施方案(见图1)。桥梁方案设计采用“群山、飞鸟”为意向,以雄伟壮丽的昆仑山脉为背景,通过鲜活的造型之美,营造具有活力、时尚、大气文化气息的结构形态。方案高低起伏、跃跃欲飞的艺术动感造型,彰显出西宁大气、活泼的城市气质^[1]。

2 总体设计

桥梁采用两跨空间钢拱桥,分别斜跨北川河内河和外河,跨径布置为95 m+110 m=205 m,桥梁范围平面位于R=220 m的圆曲线、A=104.881 m的缓和曲线及直线段上,含两侧桥台侧墙全长236.5 m,

收稿日期: 2022-05-31

作者简介: 李甲丁(1985—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。



图1 滨河西路桥效果图

含两侧各1.5 m吊杆区桥面总宽21 m,按整幅桥设计^[2](见图2)。

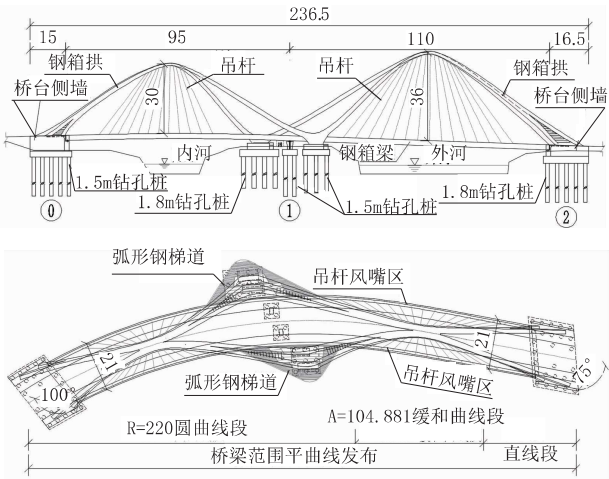


图2 桥梁平面布置图(单位:m)

拱结构为两跨有推力无铰连拱体系,拱肋为平行四边形钢箱截面,拱肋在混凝土桥台侧墙、中墩拱座处固结,中墩处相邻拱跨部分水平力相互抵消,其余水平力由墩台群桩基础承受,桩基持力层为中风化泥岩。

主梁结构为两跨连续梁体系,采用单箱三室带风嘴扁平钢箱梁截面,墩台处设置球钢支座。主梁与拱

肋仅通过吊杆连接。吊杆为放射状空间索面,在拱肋处集中锚固于拱顶区域,在主梁跨中 0.45 ~ 0.65 倍跨径范围等间距锚固。钢拱梁均采用 Q345qE 材质,吊杆为 1 860 MPa 整束挤压钢绞线拉索。

中墩拱脚处设置下沉式阶梯状弧形观景梯道(见图 3),使市政道路人行系统与河堤堤顶既有游步道相连,丰富了行人的观景体验和层次。弧形平台采用纵横梁+整体钢桥面板的空间钢结构,通过 T 形变高钢托板形成 1:3 坡率台阶,顶面为 50 mm 厚塑木铺装。

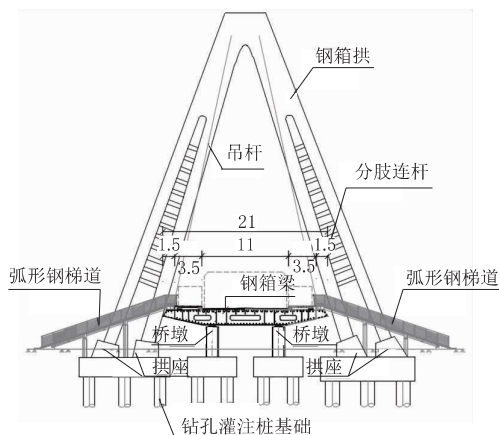


图 3 桥梁横断面图(单位:m)

梯道在主梁处通过多个板式橡胶支座支承于钢箱梁风嘴区隔板,纵横梁交点处通过多个矩形混凝土立柱支承于拱座承台顶面,梯道落地处支承于扩大基础顶面。

桥梁施工采用先梁后拱的施工顺序,内河搭设钢管桩少支架,分节段吊装主梁纵横向节段,外河根据防汛要求采用钢箱梁整体节段顶推施工。完成主梁拼接后在主梁上搭设拱肋支架,进一步完成拱肋节段拼装。

为适应当地高海拔、强日照、高紫外线的气候条件,加强钢结构耐久性,钢拱外表面涂装方案为喷砂除锈 Sa3.0 级 +120 μm 电弧热喷锌铝合金 +30 μm 环氧封闭漆 +150 μm 环氧云铁中间漆 +100 μm 聚硅氧烷面漆。

本桥为复杂空间异形景观桥梁,设计过程中存在诸多传统设计手段无法表达的问题,因此本项目采用 Rhino 概念设计→CATIA—BIM 正向设计→Midas Civil 总体分析→Ansys 局部分析→辅以 AutoCAD 二维出图的设计流程来实现。二维图纸中所需的参数通过 Grasshopper 参数化编程从三维模型中批量导出,设计成果除常规纸质二维图纸外,同步提交三维 BIM 模型(见图 4)。

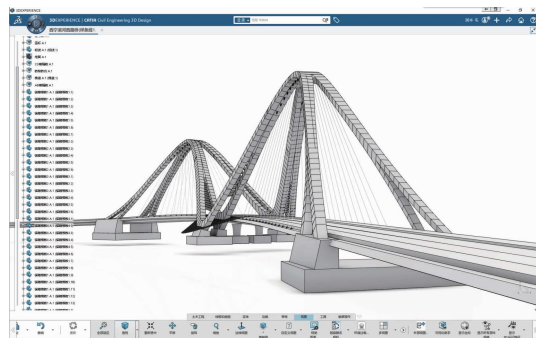


图 4 全桥 BIM 模型(达索 CATIA)

3 空间拱轴线设计

常规大跨径拱桥平面一般位于直线段,即使位于圆曲线上时也往往采用弯桥直做的设计手段,通过加大桥面宽度及拱肋间距来适应平曲线矢高,以保证桥面车道连续。

拱肋一般也位于竖直平面或斜平面上,根据跨径、吊杆布置形式等结构受力因素常采用圆弧线、抛物线、悬链线或直线+圆弧组合的折线型拱轴线。

由于本桥平面位于小半径圆曲线($R=220\text{ m}$)、缓和曲线及直线段上,采用常规设计思路将拱肋均布置于一平面内时,需拉开拱肋间距,拱脚在墩台处与主梁间距远,主梁与拱肋结构景观整体性不好,且桥梁占地红线较大。本桥结合道路线形及墩台布置,通过沿路线方向扭转拱轴线(见图 5)以满足结构整体性及视觉上的美观要求。

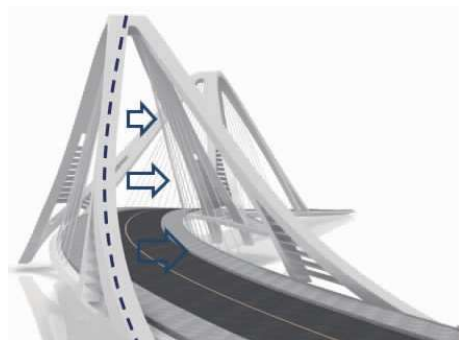


图 5 拱轴线空间扭转

由于拱轴线布置在空间扭面,采用圆弧线等常规拱轴线线形时均存在线形表述困难、过渡不顺等问题,因此本桥拱肋拱轴线采用空间样条曲线拟合,通过从 BIM 模型中导出拱轴线及控制截面(见图 6),导入总体计算模型后经计算反馈调整(见图 7),使拱轴线能兼顾结构受力与外观线形。

为便于施工单位加工制造及纸质图纸表述,间隔一定距离给出拱轴线、外轮廓、横隔板定位点坐标。厂家结合 BIM 模型进行深化设计,并逐段定制匹配胎架,使定位点之间的板件通过平顺的弧线过渡,

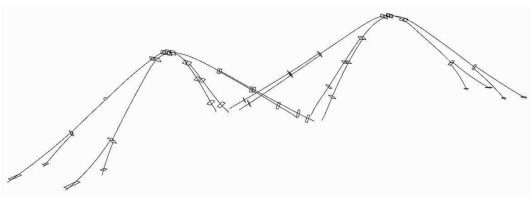


图 6 BIM 模型中空间拱轴线导出(cad 格式)

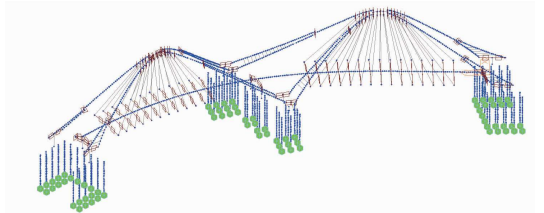


图 7 三维杆系计算模型(Midas Civil)

以保证设计拱轴线及拱肋外形效果得以完整的展现。

4 多边形变截面多肢拱肋设计

4.1 多肢拱肋设计

本桥为有推力无铰拱体系,95 m 跨及 110 m 跨钢拱肋中心线最高点距桥面分别为 30 m、36 m,矢跨比分别约为 1/3.17 和 1/3.06,拱肋与钢梁之间仅通过吊杆连接。钢箱拱肋单肢为斜平行四边形断面,倾角 $65^{\circ} \sim 75^{\circ}$,截面尺寸及形式沿拱轴线全长变化,断面变化形式如下:主拱分别在拱顶处相交,呈整体梯形断面,拱顶向两侧逐渐变宽,分叉后断面变为平行四边形。之后拱肋向桥台方向沿轴线逐渐变窄变高;拱肋再次分开为两肢,断面均为平行四边形;拱肋向桥梁中墩方向分叉后沿轴线变窄变高,再次分开为横向双肢(见图 8)。

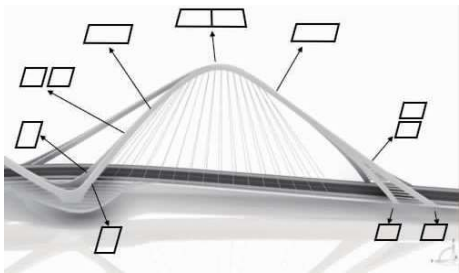
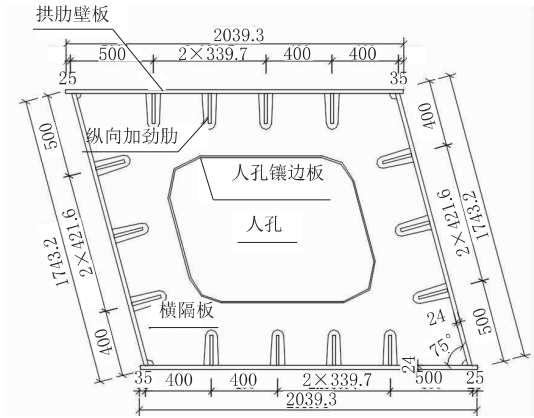


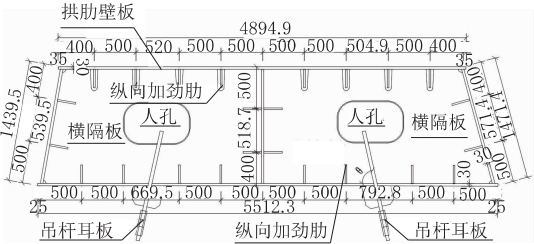
图 8 平行四边形拱肋过渡变化示意

钢箱拱肋壁板厚为 20 ~ 30 mm,局部根据受力有调整,纵向加劲肋为板式肋,间距为 400 ~ 500 mm。普通横隔板与拱轴线垂直,标准间距 2 m,板厚 14 mm,吊杆处设铅锤横隔板,板厚 20 mm。典型钢拱肋断面见图 9。

由于拱肋截面尺寸及角度不断变化,横隔板的尺寸各不相同,通过参数化批量建立全桥横隔板模型并提取横隔板轮廓线及尺寸数据信息用以辅助绘制二维纸质图纸。



(a)单肢平行四边形截面



(b)拱顶交汇梯形截面

图 9 典型钢拱肋断面(单位:mm)

由于拱肋存在多处竖向、横向分肢结构,因此板件在分肢处的结构构造是设计需要考虑的重点。已建成的景观钢拱桥分肢结构一般为明显的主次受力结构[3],以主肢受力为主,分肢受力较小(见图 10)。本桥拱肋横竖向分肢均为主要受力结构,因此对于分肢处的构造需采用与之不同的构造形式。

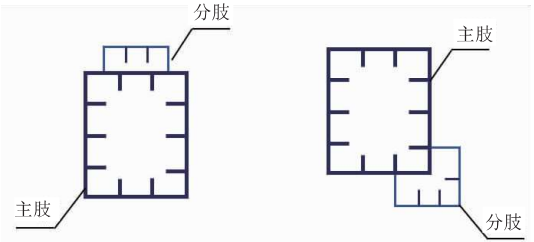


图 10 部分已建成景观拱桥钢拱分肢构造

本桥拱肋分肢处参考三塔悬索桥中钢塔的底部分叉点设计构造[4],采用坡口熔透传力的局部构造形式以保证板件的均匀传力。拱肋分肢板在交汇前由斜腹板逐渐扭转为直腹板,并在距离交汇点 150 mm 附近设置加厚横隔板来加强局部稳定性(见图 11)。

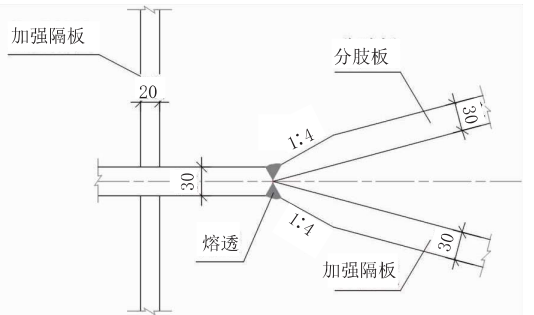


图 11 分肢点熔透传力构造示意(单位:mm)

经结构计算承载能力极限状态下除拱肋处拱脚局部最大应力值约为 210 MPa 外,其余应力基本在 100 ~ 150 MPa,拱脚处经 ANSYS 局部模型分析后实际板件应力除局部应力集中点外均小于 150 MPa (见图 12)。

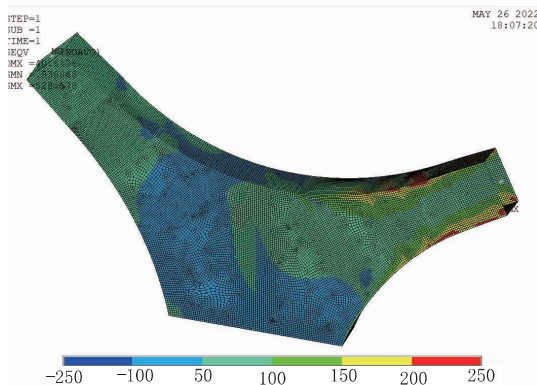


图 12 Y 形拱脚节点局部分析(ANSYS)

采用弹性稳定理论对拱肋结构进行屈曲分析,拱肋结构在恒载 + 活载 + 风载工况下屈曲系数为 $27.1 > 4$,失稳模态为拱肋横弯(见图 13),表明结构具有足够的稳定安全性。

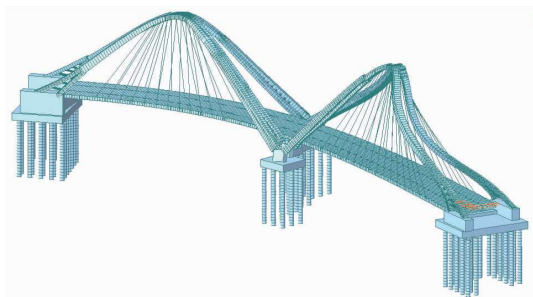


图 13 一阶失稳模态(拱肋横弯)

4.2 拱脚节点设计

除拱肋分肢构造外,本桥拱脚节点构造是拱肋设计的另一个重点。根据建筑外形、结构受力需要的不同,在桥台桥墩处分别采用了不同的拱脚节点构造。

桥台处拱脚支承于桥台侧墙,为使拱脚处外形简洁,采用了承压传剪埋入式拱脚(见图 14),桥台拱脚节点截面壁板厚度 24 mm,端板厚度 60 mm,沿拱肋四周间隔 150 mm 均布 $\phi 22 \times 150$ mm 剪力钉,并在插入段设置普通钢筋加强筋,在对侧墙顶面 1.5 m 高度范围内的拱肋内灌注混凝土。相比于常规桥台结构,本桥根据拱肋及桩基布置的需要采用了较长的侧墙长度。

中墩处拱脚节点受力较大,因此采用完全承压式节点构造(见图 15)。由于弧形人行梯道置于节点上方,拱脚处局部加强的靴梁及预应力粗钢筋等构造

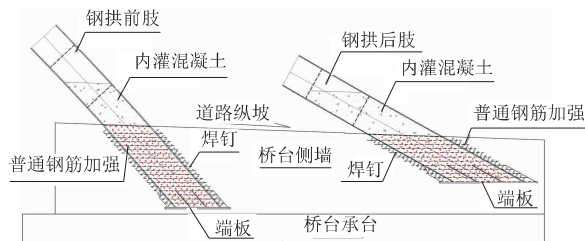


图 14 桥台承压传剪插入式节点

对建筑外形影响较小,建筑外形和结构受力均能得到兼顾。拱脚处采用 80 mm 厚承压板,并采用 1 000 mm 高度靴梁以加强承压板刚度。承压板与混凝土拱座之间设置 50 mm 微膨胀高强环氧砂浆后压注层。沿拱脚四周间距 500 mm 布置直径 50 mm 高强螺纹钢筋,钢筋伸入承台,并在固定端设置锚板,预应力钢筋张拉力为 750 kN,以保证承压板截面全截面受压。

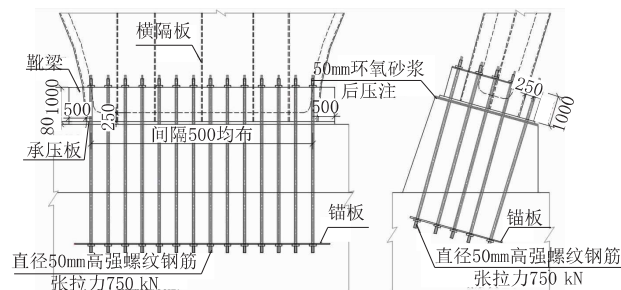


图 15 中墩拱座完全承压式节点(单位:mm)

5 吊杆及主梁设计

本桥吊杆在拱顶区沿拱肋中心线间距 1.8 m 锚固,在钢主梁上间距为沿道路设计中心线间距 5 m,110 m 跨跨中设 15 对吊杆,95 m 跨跨中设 12 对吊杆,均采用 GJ15-12 整束挤压钢绞线拉索体系,成桥索力 450 kN。

本桥通过 BIM 参数化手段定义锚箱及耳板板件尺寸、布置原则等与吊杆角度之间的设计原则(见图 16),使得锚点构造可以自动适应不同的吊杆角度,进而从 BIM 模型中批量提取板件结构尺寸及形状参数,并借助碰撞检查功能进行净空及冲突点核查。



图 16 吊杆锚点 BIM 模型示意(梁拱壁板未示)

为使主梁结构具有较大的抗扭刚度,并且自身能承受相当的荷载,主梁采用闭口扁平多箱室钢箱梁结构。主梁受力体系为在跨中吊杆区多点弹性支承的两跨连续结构,固定支座设置在中墩,两侧桥台

设置滑动支座(见图 17)。根据受力需要避免支座脱空,钢箱梁梁端内侧局部采用混凝土压重处理。

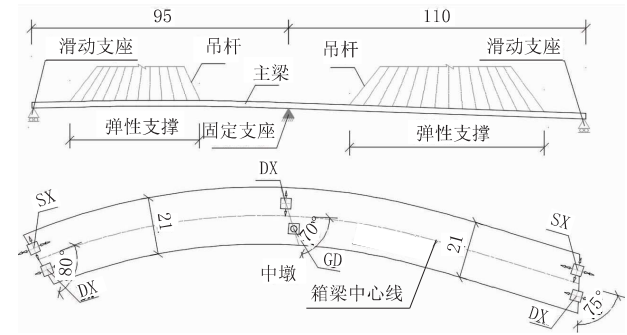


图 17 钢主梁支承体系(单位:m)

为适应道路路线于内外河及河堤之间的斜交关系,上下部均斜桥斜做。小桩号桥台斜交 80°,河堤处中墩斜交 70°,大桩号桥台侧斜交 75°。为适应钢箱梁斜交布置,中墩处采用横隔板正交并加密布置,通过支座分别支承于不同隔板上实现斜交。桥台侧通过横隔板的角度的渐变实现(见图 18)。

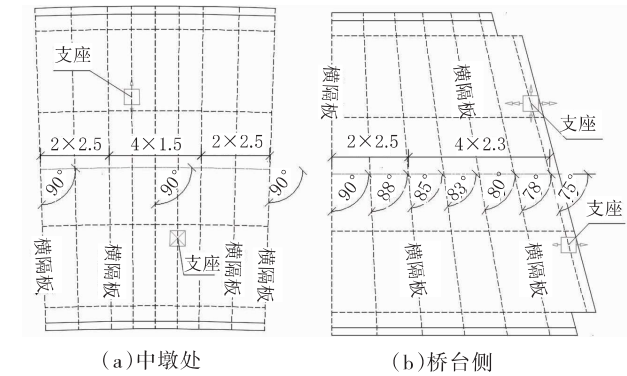


图 18 墩台斜交处横隔板设置示意

钢主梁桥面铺装采用 4 cm SMA13 和 9 cm 厚 C50 补偿收缩钢纤维防水混凝土,通过 $\phi 13$ mm 焊钉保证与钢桥面板的连接(见图 19),结构计算时不考虑钢纤维混凝土层参与受力。钢纤维抗拉强度不小于 600 MPa,钢纤维掺量为 60 kg/m³。为提高钢主梁安全储备,避免中墩顶面铺装局部开裂,钢纤维混凝土

铺装次序为先跨中后中支点,并在中墩顶范围设置 20 mm 直径 HRB400 纵向加强钢筋。

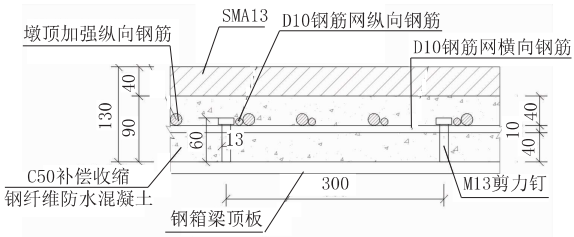


图 19 钢主梁桥面铺装(单位:mm)

6 结 语

西宁北川河滨河西路桥通过全过程的 BIM 正向设计,应用了样条曲线拟合空间拱轴线设计、多边形变截面分肢拱肋参数化设计及空间索面布置及锚固定位等技术手段,解决了异形空间钢拱桥设计中得诸多难题。施工过程中钢结构加工单位依靠三维 BIM 模型提供的数据支撑,成功解决了桥梁拱肋成型及三维放样等难题,确保施工对结构形态的还原度,有效提高了桥梁的施工效率。

本桥于 2019 年 12 月开工建设,2021 年 6 月建成后的桥梁成为西宁北川片区的焦点景观,产生了良好的社会效益。2021 年 9 月作为组成项目之一通过世行项目完工检查评估,获得“高度满意”的最高评级。

参考文献:

[1] 丁建明.跨越的风景景观桥梁“四维”创新理念与实践[M].南京:东南大学出版社,2021.
[2] 东南大学建筑设计研究院有限公司.青海西宁环境综合治理利用世行贷款项目城市排水收集管网工程配套滨河西路桥工程施工图设计[Z].2019.
[3] 张春雷.九堡大桥主航道桥副拱设计与制造特点[J].城市道桥与防洪,2010(10):78-82.
[4] 韩大章,吉林,陈艾荣,等.泰州大桥中塔设计关键技术研究综述[J].公路,2013,58(11):72-77.

(上接第 78 页)

墩系梁设计,轻型化盖梁先期破坏作为耗能构件,能增强桥墩的耗能能力;

(5)当墩高较小时,桥梁结构自振频率高,采用减隔震方案可有效减小下部结构地震响应。但对于 30 m 以上的高墩,采用减隔震设计减小的结构地震响应有限,效果不明显,甚至可能出现结构响应大于延性设计的情况,减隔震设计不能满足自振周期大于延性设计 2 倍的规范要求,此时宜采用延

性设计。

参考文献:

[1] 王克海,韦韩,李茜,等.中小跨径公路桥梁抗震设计理念[J].土木工程学报,2012(9):115-121.
[2] 姜秀娟.高烈度区钢筋混凝土桥墩延性设计与抗震能力评估[D].西安:长安大学,2008.
[3] 李丰.高烈度区桥墩系梁抗震性能研究[J].公路交通科技应用技术版,2016(7):122-124.