

城市景观斜跨双曲空间钢拱桥总体设计

严 健

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘 要: 随着社会的发展,城市桥梁的景观作用在桥梁设计中越发受到重视,桥梁景观愈加主导结构设计,进而提高了桥梁结构设计的要求。位于环坝路的葵坝路景观跨线桥作为深圳国际生物谷坝光核心启动区的标志性建筑之一,桥梁景观设计上须在保证优美的前提下着重体现桥梁的原创性、独特性。为配合桥梁景观设计效果,桥梁结构采用斜跨双曲空间钢拱桥,结构上具有独创性。对桥梁方案、桥梁拱轴线、变截面拱肋、弯斜钢梁等关键节点设计内容进行了论述,为复杂结构的城市景观桥梁设计提供参考。

关键词: 桥梁景观;斜跨拱;钢桥;无铰拱

中图分类号: U448.22

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)07-0136-04

Overall Design of Urban Landscape Oblique-span Double-curve Spatial Steel Arch Bridge

Yan Jian

[Tongji University Architectural Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: With the development of society, the landscape role of urban bridges has become increasingly important in bridge design, and the bridge landscapes have increasingly dominated the structural design, thereby raising the requirements for bridge structural design. The Kuiba Road Landscape Overpass located on Huanba Road is one of the landmark buildings in the core startup area of the Shenzhen International Biovalley. The bridge landscape design needs to emphasize the originality and uniqueness of the bridge while ensuring its beauty. To match the bridge landscape design effect, the oblique-span double-curve spatial steel arch bridge is used as the bridge structure, which is structurally original. The design contents of the key elements such as bridge schemes, bridge arch axes, variable cross-section arch ribs and curved inclined steel beams are discussed, which provides the reference for the design of urban landscape bridges with complex structures.

Keywords: bridge landscape; oblique-span; steel bridge; hingeless arch

1 工程概况

环坝路景观跨线桥位于深圳坝光片区环坝路沿线。桥梁跨越葵坝路,是深圳国际生物谷坝光核心启动区环坝路市政工程的重要节点。桥梁设计方案以景观效果为主导要素,景观设计上从当地文化背景、城市规划提取设计元素。从当地的渔村历史背景、古银叶树等要素中抽象出共通的曲线外形。将其作为桥梁设计的造型要素能很好地体现当地特色,且具有原创性^[1](见图1)。

确定桥梁景观外形后,在保留景观设计特点的前提下,结合项目场地条件对结构设计方案进行了



图1 方案景观效果概念图

迭代优化,最终确定了斜跨双曲空间钢拱桥的设计方案。

2 桥梁总体设计

环坝路景观跨线桥位于环坝路,所处地形为丘陵山地,地质构造简单,根据调绘及勘探资料,桥位区未发现断裂构造形迹存在,属稳定地块。地质条

收稿日期: 2024-12-03

作者简介: 严健(1998—),男,学士,助理工程师,从事桥梁设计工作。

件较好,选择有推力无铰拱体系作为桥梁总体结构体系。

桥梁整体为斜跨双曲空间拱桥^[2](见图2),拱跨126.6 m,拱肋矢高42 m,矢跨比约为1/3.01,拱肋在拱顶范围为双臂,在拱脚范围逐渐合并为单肢。拱轴线采用抛物线(10次)+直线。双臂拱肋均采用闭口箱型截面。拱肋对称布置,通过横向桁架连接成整体,在维持景观造型的同时保证拱肋的受力安全和稳定。

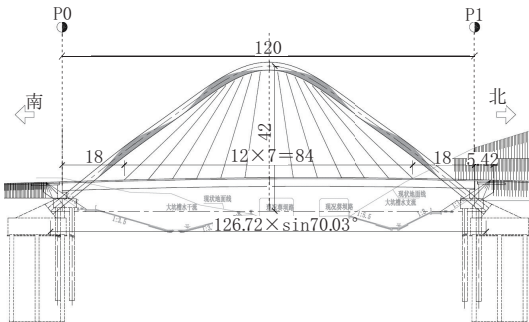


图2 桥梁总体立面图(单位:m)

主梁采用单箱五室扁平钢箱梁,箱梁外侧设置风嘴。主梁与拱肋通过吊杆连接。吊杆锚点在主梁与拱肋上分别等间距布置,吊杆呈空间索面。吊杆选用PES(C)-7-109平行钢丝束。主梁与拱肋之间设置抗风支座,约束主梁横向位移,同时改善拱脚横向水平力。

拱脚处设置钢-混结合段,钢混接头采用开孔钢板插入拱脚混凝土,同PBL剪力键的方法解决钢拱肋向混凝土拱座传递巨大轴向力,利用预应力钢绞线锚入拱座保证拱脚位置在横向弯矩作用下混凝土处于受压状态^[3]。

全桥采用先梁后拱的架设顺序。钢箱梁和钢拱肋施工工艺采用钢结构工厂节段制作,现场少支墩架设焊接组拼的施工方法。

2 构造设计

2.1 拱轴线设计

环坝路景观跨线桥项目以景观效果为主要设计要素。由于吊杆呈空间索面,传统的平面图像难以直观地表述吊杆和车行道限界的相对关系。为了更直观地确定不同拱轴线下吊杆与车行道限界之间的距离,利用Rhino+grasshopper建立了包括吊杆、主梁、吊杆区拱肋的参数化三维模型(见图3)。

在三维视角下更直观地表达了吊杆与车行道限界的相对关系,辅助拱轴线的初步确定。参数化模

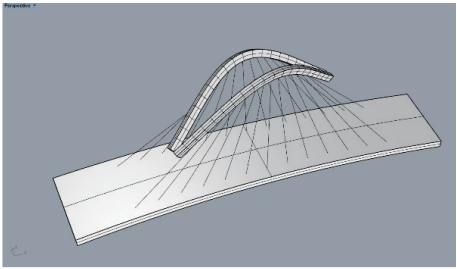


图3 Rhino 参数化三维模型

型也便于调整。在初步确定拱轴线后,用MIDAS软件建立有限元模型(见图4)。

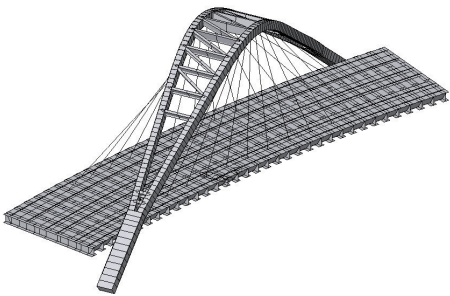


图4 MIDAS有限元计算模型

在限元模型中在恒载条件下进一步迭代拱轴线参数,得到符合设计边界要求且受力合理的拱轴线。

2.2 拱肋设计

本桥景观设计拱肋呈不规则变截面,为保证拱肋有效截面的可加工性以及简化。拱肋采用矩形钢箱,拱轴线采用抛物线(10次)+直线。双臂拱肋对称布置,拱顶双臂中心间距13.5 m,双臂采用横撑连接。

主拱采用等截面钢箱,内高2.2 m,宽1.5 m,采用Q420qD钢板,钢板有Z向受力要求。主拱钢箱顶、底、腹板根据受力需求设计,顶、底板厚度分40、50 mm两种,腹板厚度分35、40 mm两种;拱肋内部设置25 mm×260 mm纵向加劲肋,顶、底板布置1道,腹板布置3道;箱室内间距约1.5 m设置一道横向加劲肋,吊杆处设置横隔板;横向加劲肋与纵向加劲肋共同作用,保证拱肋局部稳定(见图5)。

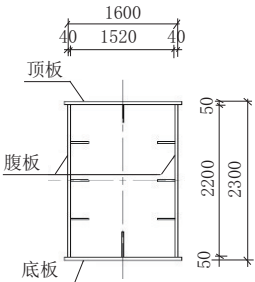


图5 拱肋横断面图(一般断面)(单位:mm)

主拱双臂合并后的截面高度与拱顶高度一致,均为2.2m,宽4.0 m,顶、底板厚度50 mm,腹板厚度45 mm;拱肋内部设置25 mm×300 mm纵向加劲肋,

顶、底板布置5道,腹板布置3道;箱室内间距1.5 m设置一道横向加劲肋。

拱肋双肢与单肢过渡段为保证纵向刚度过渡连续,顶、底板及外腹板对应布置,内腹板到单肢顶板加劲肋相的过渡设置U型过渡段避免板件过度不连续出现的应力突变(见图6)。

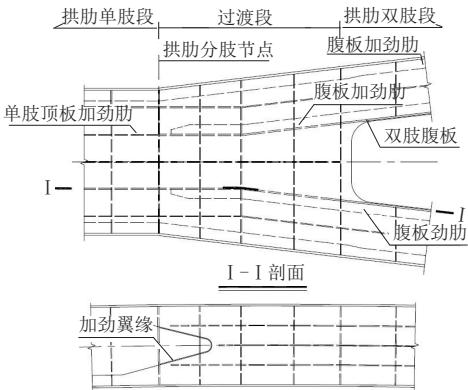


图6 拱肋过渡段

2.3 拱脚设计

拱桥通过拱肋将恒、活载传递至拱脚处并通过拱脚传递至桥梁基础。桥梁的结构体系决定了拱肋构在拱脚处内力最大。因本项目为无铰拱体系,拱脚处除了沿拱轴线方向的轴向压力,还有垂直于拱肋平面方向的弯矩。呈空间索面的吊杆使拱肋受到拱肋平面外的面外分力,在拱脚处主要表现为竖向弯矩。

为传递拱肋的轴向力,钢拱肋和拱脚的连接构造采用工程上常用的承压穿剪式钢混结构:拱脚处设置钢-混结合段,钢混接头采用开孔钢板插入拱脚混凝土,和PBL剪力键的方法解决钢拱肋向混凝土拱座传递巨大轴向力(见图7)。

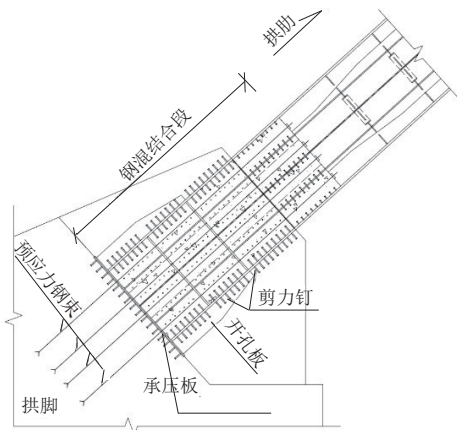


图7 拱脚构造

由于拱脚位置的拱肋除了轴向力还有竖向和横向两个方向的弯矩,拱座与拱脚结合段的混凝土在轴向力和弯矩的作用下可能出现受拉的工况。为了

避免拱座混凝土因受拉出现开裂,利用预应力钢绞线锚入拱座保证拱脚位置在横向弯矩作用下混凝土处于受压状态。

2.4 主梁设计

本桥为斜跨拱,主梁两侧吊杆空间不对称,且主梁总宽较宽,成桥状态下主梁受较大扭矩。为保证梁体有较好的抗扭性能和整体性,主梁采用单箱5室的整体箱梁,箱梁内高2.2 m。箱梁设置4道竖直腹板,钢箱外侧设置风嘴。吊杆主梁端锚固位置与边腹板对应及横隔板对应设置,横隔板间距3.5 m,吊杆间距7 m。主梁钢结构采用Q345qC钢材。主梁顶板厚16 mm,底板厚16 mm,腹板厚14 mm,吊杆对应边腹板厚度25 mm(见图8)。主梁与拱肋之间设置抗风支座,约束主梁横向位移,同时改善拱脚横向水平力。

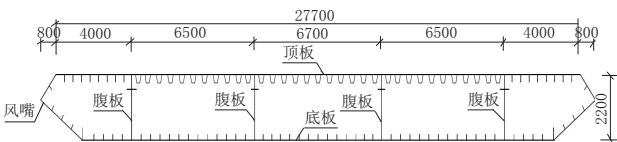


图8 主梁横断面图(一般断面)(单位:mm)

3 数值模拟计算

3.1 整体稳定分析

用弹性稳定理论对拱肋进行整体稳定分析,结果见表1。拱肋在成桥恒载+汽车(对应拱顶轴力最大)+横桥向风(运营风)的最不利工况下,失稳模态特征为拱肋面外失稳(见图9),稳定系数 $\lambda=11.96$ 。表明拱肋有足够的稳定性。

表1 模态特征值表

模态	特征值
1	11.96
2	13.07
3	18.08
4	19.06
5	26.40
6	27.96
7	29.34
8	30.95
9	35.69
10	40.05

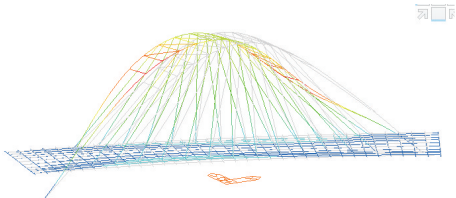


图9 第1阶失稳模态

3.1 梁、拱静力分析

主拱、主梁为压弯构件,其承载力极限状态验算包括强度和稳定性验算。作用组合效应设计值按现行规范规定计算,采用承载力极限状态基本组合。材料性能采用强度设计值。

3.1.1 抗弯承载力计算原则

(1)采用弹性方法计算截面抗弯承载力,以截面上任意一点达到材料强度设计值作为标志,不考虑截面的塑性发展。

(2)计算抗弯承载力时,考虑施工方法及顺序的影响。

(3)计算抗弯承载力时,按考虑局部稳定及剪力滞以后有效面积计算截面的抗弯承载力。

3.1.2 抗剪承载力计算原则

(1)抗剪按照弹性方法计算。

(2)剪应力计算按照有效面积矩和惯性矩计算。

(3)需要考虑正应力和剪应力共同作用。

计算结果显示拱应力水平均在材料允许范围内,且冗余度足够,符合相关要求。

主要关注该桥成桥状态下主梁的结构刚度。在汽车和人群的活载作用下主梁的最大竖向向上位移12.6 mm,活载竖向向下最大位移41.7 mm,累计活载竖向挠度54.3 mm,挠跨比1/2 210,设计计算结果满足规范要求。

3.2 拱脚局部受力分析

本桥拱肋拱脚位置设置钢混结合段,结合段受力状况较为复杂,为验证结构设计可靠性采用MIDAS Civil软件进行模拟计算,其中混凝土部分采用实体单元,钢结构部分采用板单元建模,预应力束按节点荷载施加;混凝土实体单元与钢结构板单元共节点(见图10)。

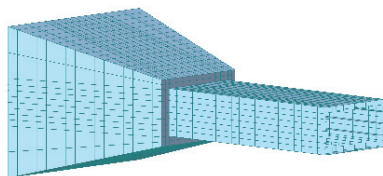


图10 拱脚有限元计算模型

计算荷载组合取用整体模型中标准组合下距拱脚14 m处内力计算结果,选取拱脚轴向最大、轴向最小、 M_y 弯矩最大、 M_z 弯矩最小4个工况进行计算。

计算结果显示混凝土段最大拉应力为0.3 MPa,满足规范要求;混凝土外围均受压,应力水平较低,满足规范要求。

3.3 抗震设计及验算

根据规范^[4],深圳市地震动基本烈度为7度,地震动峰值加速度为0.10g,工程场地类别为Ⅱ类,地震动反应谱特征周期为0.35 s。

根据规范^[5],该工程中桥梁抗震设防类别为丙类,E1地震作用采用重现期100 a的地震动参数;E2地震作用采用重现期2 500 a的地震动参数。

该桥桥台采用减隔震体系^[6]。设置拉索减震球钢支座,动力作用下固定或者单向型球钢支座的抗剪销钉剪断,支座发生滑动,结构体系变为减隔震体系,减小结构地震内力响应,并通过拉索装置限制墩梁位移^[7-9]。

采用减隔震体系后,E1地震下允许固定或者单向支座在非滑动方向发生滑动而释放地震内力,地震位移在设计允许范围内,结构地震响应总体上处于弹性状态,满足抗震性能目标。E2地震下,墩梁位移得到有效控制,桥梁基础均处于基本弹性状态,满足抗震性能目标。

采用结构计算软件MIDAS Civil,建立全桥结构的几何模型及有限元分析模型进行特征模拟计算。承台质量作为附加集中质量堆积在相应节点上,真实模拟结构特性。E2作用下,计算考虑支座的水平抗剪能力为支座吨位的15%,地震作用下按照设计允许固定型支座发生水平滑动,释放地震内力,同时以可靠的方式约束支座位移在设定范围之内。

计算结果显示在非线性工况下,E2纵向组合下,最大应力201 MPa;E2横向组合下,最大应力189 MPa;钢材应力均小于 $f_d=310$ MPa;满足规范要求。

4 结 语

随着社会经济基础的发展,城市桥梁的景观作用在桥梁设计中越发受到重视,以景观造型作为设计出发点的桥梁设计将愈发普遍。环坝路景观跨线桥从景观性需求出发,结合地区文化特色,在多种三维建模、有限元软件的协同下实现了创新性的桥梁景观外形。应用了三维参数化建模解决了空间索面与车行道的侵限问题。在保证基本景观外形不变的前提下,利用有限元分析软件将造型设计落实到了合理的结构上。为以景观外形为出发点的桥梁设计工作提供了有效可行的参考。

参考文献:

- [1] 李甲丁,李升玉,张海平,等.空间多肢弯斜钢拱桥设计[J].城市道桥与防洪,2023(1):83-87.

(下转第165页)