DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250544

上承式钢梁拱组合景观桥梁设计与分析

兰　峰
(东南大学建筑设计研究院有限公司,江苏 南京 210096)

摘　要: 景观桥梁作为城市客厅重要组成部分,不仅承载着交通运输的基本功能,还是城市形象和地域文化内涵的重要体现,所以景观桥梁的设计必须融入更多的艺术和美学元素。以济南横二路大寺河桥的方案创作和结构设计为例,通过研究济南地域文化内涵,构思景观桥梁设计理念,提炼桥梁结构力形合一,创新性地提出上承式钢拱梁组合结构方案,并引入开孔钢板墙结构嵌入梁拱合围区域,优化结构受力,增添丰富多样的景观效果,通过细化设计、计算分析和精心施工,实现了设计目标,取得了良好的社会效益。

关键词: 景观桥梁设计;梁拱组合结构;开孔钢板墙;组合桥面板
中图分类号: U448.51;TU997　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1009-7716(2026)01-0212-04

Design and Analysis of Deck Steel Beam Arch Composite Landscape Bridge

LAN Feng
(Architectural Design and Research Institute of Southeast University Co., Ltd., Nanjing 210096, China)

Abstract: As an important component of city parlor, landscape bridges not only carry the basic function of transportation, but also are an important manifestation of urban image and regional cultural connotation. Therefore, the design of landscape bridges must incorporate more artistic and aesthetic elements. Taking the scheme creation and structural design of the Dashihe Bridge on Henger Road in Jinan as an example, by studying the cultural connotation of Jinan region, conceptualizing the design concept of landscape bridges, and refining the integration of force and form in bridge structures, a deck steel arch beam composite structure scheme is proposed, and the perforated steel plate wall structure into the area enclosed by the beam arch is introduced to optimize the structural stress and add the rich and diverse landscape effects. The design goals have been achieved through refined design, calculation analysis and careful construction, and the good social benefits have been obtained.

Keywords: landscape bridge design; beam arch composite structure; perforated steel plate wall; composite deck

0　引　言

近年来,我国社会经济高速发展,人民对精神层面和文化自信的追求在不断提升,桥梁的建设不仅需要满足交通功能,对桥梁美学的追求也在不断提高。景观桥具有多元属性特征,其设计需要考虑多维因素,充分兼顾交通功能、结构体系、物理空间和形态美学需求。景观桥梁的美学应体现基于人本价值观的理性的恰当的表现主义,同时使桥梁具有地域性、时代性、文化性[1-2]。上承式钢梁拱组合结构由于采用高强材料,可以适应大跨及造型独特的桥梁形式,方便塑造城市景观,因此在城市桥梁建设工程中得到逐步推广和应用。

1　工程概况

济南横二路大寺河桥位于新旧动能转换起步区城市主干路横二路跨越大寺河地段,根据上位规划,桥址周边拟打造生态宜居休闲之城。横二路大寺河桥采用三跨上承式空间钢拱梁组合体系结构一跨跨越大寺河,跨径布置为 37 m+67.5 m+40.5 m,桥梁全长 150.16 m(见图 1),按双幅桥设计,每幅桥标准宽 17.75 m,桥面总宽 37 m(含中分带),如图 2 所示。每幅桥外侧各悬挑 2 m 宽人行梯道上下桥,沟通桥上观景空间和河道两侧慢行步道系统。

2　景观桥梁设计理念

济南正在建设“善感知、会呼吸、有温度”的智慧

收稿日期: 2025-05-27
作者简介: 兰峰(1986—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

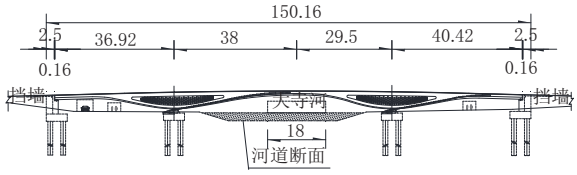

图1　桥型立面(单位:m)

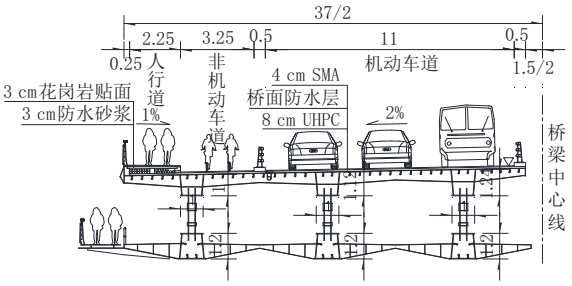

图2　标准横断面(半幅,单位:m)

城市,大寺河上的桥梁要求形式灵动、通透,具有流动感、协调性,充满生命力和活力。作为济南新旧动能转换起步区初始项目之一的大寺河上的桥梁,无极生太极,太极生两仪,太极理念预示着新区从无到有,有序生长,永续发展。大寺河上桥梁景观概念设计采用曲线造型,线条流畅、简洁,飘带形的结构造型,体现了连接的理念,将两岸、自然与人工建筑、现在与未来联系在一起,这种力与美相结合的外形,是泉城与太极的互表阐释。

景观设计强调柔和的曲线,避免竖向高大的构件,而水平向伸展则表现出低调、谦逊、和谐,与儒学之乡所崇尚的文化精神、齐地民风和儒雅的总体气质相协调。采用浅色质感,外观新颖、现代,桥梁像雕塑作品一样,以深刻的含义、优美的体态和精致的细节,成为跨越大寺河上的公共艺术品,经得起远眺、中观和临近的细细品味。桥梁外挑慢行坡道,与主体结构相依相生、彼此交融,必将吸引众多市民和游人行走于绿地、河水、桥梁之间,在此流连忘返。桥梁方案效果图如图3所示。

图3　桥梁设计理念与效果图

横二路大寺河桥的结构体系总体上为上承式梁拱组合结构,每幅桥横桥向分割成三榀钢梁拱组合结构并通过横梁连接成整体,底部箱梁的外轮廓高低起伏,与河水的波澜相呼应。梁拱合围区域采用开孔钢板墙填充。开孔形成的网状结构具有动感和生命力,其表皮曲面变化,形成虚与实、光与影、抑与扬的种种对比和共生,赋予结构体鲜活的生命力和永久的呼吸感,带给行人不同的行进体验。

3　梁拱组合结构方案优化

横二路大寺河桥方案在概念设计确定的总体造型前提下,分别对以下三个结构体系方案进行计算分析比选。各方案优缺点如下。

方案一:梁拱分离,合围区域空白,桥面以下空间通透,但由于采用横向分榀式设计,梁拱分离段受压弯钢拱稳定性问题突出,桥面系钢梁竖向刚度小导致车桥共振明显,行车舒适性差。

方案二:梁拱合围区域采用实心钢板墙填充,极大提高梁竖向刚度和拱的稳定性,但桥下视角通透性差,景观效果不佳。

方案三:梁拱合围区域采用开孔钢板墙填充。开孔钢板墙既能为梁提供竖向弹性刚度,又能将梁拱连成整体提高钢拱的稳定性。开孔钢板墙通过在钢板上进行规则或不规则的开孔,形成独特的纹理和图案,实现特定的景观和结构效果。其结构主要由钢板和孔洞组成,竖向钢板作为主要承重构件,而水平孔洞则用于调节结构的整体刚度和延性,以及构建景观艺术造型。

Purba 等[3]研究了开圆孔钢板墙,谭平等[4-5]研究了开菱形孔的钢板墙,薛志杰等[6]研究了开孔率对钢板墙的性能影响,袁朝庆等[7]研究了蜂窝钢板墙等。各种研究结果表明,开孔钢板墙具有优异的力学性能,主要体现在以下几个方面。

(1)良好的延性和耗能能力[8]。孔洞的设计使钢板在受力时能够发生塑性变形,从而吸收地震等外部荷载产生的能量,减小结构的损伤。

(2)稳定的结构性能[9]。钢板作为主要承载构件,能够有效地提高结构的整体稳定性,减小变形和振动。

(3)灵活的设计方式。孔洞的大小、形状和位置等参数可以根据桥梁的具体情况进行合理设计,以满足不同的承载能力和抗震要求。

(4)施工便捷[10]。开孔钢板墙具有施工周期短、质量轻、易于安装等优点,能够降低工程成本和缩短工期。

通过对开孔形状和尺寸进行比选,选择开孔韵

律感强、光影效果好、景观造型独特的方案。初步拟定采用带圆倒角的多组相似菱形孔。开孔钢板墙造型如图4所示。

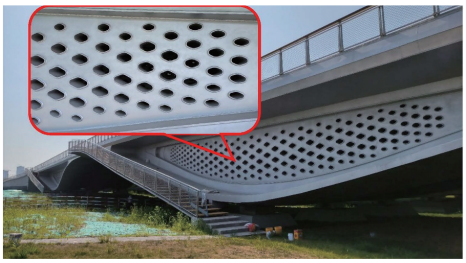

图4　开孔钢板墙

4　桥梁结构设计要点

4.1　总体设计

位于主干路上的横二路道路总宽37 m，跨大寺河段桥梁采用双幅设计，单幅桥宽17.75 m，中间设1.5 m宽空隙。桥梁采用三跨空间钢梁拱组合体系结构一跨跨越大寺河，跨径布置为37 m+67.5 m+40.5 m，全长150.16 m。单幅钢桥采用3榀梁拱组合构件+组合桥面板组成开口式截面，各榀构件之间采用变高度横梁联系成整体，标准间距3 m。每榀梁拱组合结构合围区域采用2片墙式钢板填充，在钢板上按一定韵律开孔并沿孔周布设加劲板。在桥墩和桥台分别设置球形钢支座，从整体上形成连续梁体系，以简化下部结构受力。

4.2　钢梁、钢拱

每榀梁拱组合构件均由纵向钢梁和钢拱组成。钢梁截面采用梯形断面，顶板宽1.2 m、厚20 mm，底板宽1 m、厚25~30 mm，两侧腹板厚25 mm，箱室内设置16×160 mm / 20×200 mm板肋，加劲肋间距400 mm。钢梁高在墩顶梁拱未结合区段、桥台侧等高段及中跨跨中梁高均为1.0 m，其余段梁高根据景观外形按二次方变化，最大梁高位于梁拱结合处高3.1 m。钢梁横隔板标准间距为3 m，横隔板板厚14 mm，桥台支承处横隔板板厚25 mm。钢拱与钢梁一一对应设置，钢拱截面采用梯形断面，顶板宽1 m，底板宽1.2 m，顶底板及腹板板厚均采用30 mm，箱室内设置20×200 mm板肋。钢拱横隔板标准间距2 m，横隔板板厚16 mm，在桥墩支承处横隔板板厚30 mm。钢拱截面高度随造型需要适当变化，变化范围为1~1.41 m。钢拱中心线及轮廓线均为空间样条曲线，在桥墩处为最低点，两侧分别向上延伸至与钢梁相交形成一个整箱断面。钢梁、钢拱均在工厂制造并进行预拼装，运输至现场后在施工平台上拼装成整体。

4.3　组合桥面板

组合桥面板由8 cmUHPC+正交异性钢板组成。正交异性钢板下设板肋，标准间距450 mm。在钢梁腹板两侧70 cm范围内桥面钢板采用20 mm，其余板厚均采用1 4mm厚钢板[11-12]，下设加劲肋均采用16×160 mm板肋。组合桥面板与钢梁拱组合构件共同组成开口式截面，横桥向设置变高度横梁以联结3榀梁拱组合构件共同受力，标准间距3.5 m。

正交异性钢板顶面布置剪力钉和钢筋网，剪力钉采用ϕ13×50 mm规格，纵横向间距15 cm×15 cm，钢筋网采用φ10钢筋，纵横向间距75 mm。待上部钢结构主体全部安装完并拆除支架后再现场浇筑8 cm厚UHPC，与正交异性钢板形成组合桥面，共同受力。

4.4　开孔钢板墙

在每榀钢梁拱合围形成的封闭区域采用2片开孔钢板墙填充连接成整体，开孔钢板间距30 cm，厚25 mm，平行设置，在开孔板上开设有韵律的带圆倒角的菱形孔，各孔的位置和大小通过采用阵列变换的方法来确定。沿菱形孔周边设16 mm厚加劲板贯穿2片开孔钢板墙，提高钢板的面外稳定性并使其协同变形受力。开孔钢板墙四周与钢梁、钢拱围焊，形成整体受力体系，共同承担竖向恒载和活载，同时抵抗水平荷载（风荷载、地震作用），减小桥墩支座顶处钢板应力。开孔钢板墙构造示意图如图5所示。

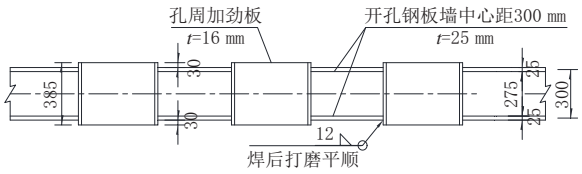

图5　开孔钢板墙构造示意图（单位：mm）

5　结构计算

采用有限元软件建立单幅桥梁空间模型[13]，其中钢梁钢拱均采用梁单元模拟，开孔钢板墙和开孔的孔周加劲板均采用板单元模拟，有限元模型如图6所示，全桥模型共计793个梁单元、3 834个板单元。

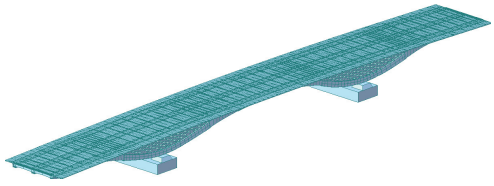

图6　空间有限元模型

由图7可知，承载能力极限状态下，钢梁钢拱最大应力值为204.7 MPa；由图8可知，开孔钢板墙板单

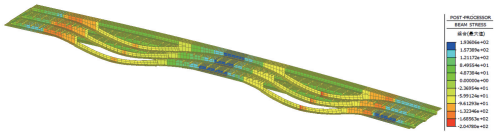

图 7　承载能力极限状态钢梁、拱应力（单位：MPa）

图 8　承载能力极限状态开孔钢板应力（单位：MPa）

元最大应力值为 99.2 MPa，且位于桥墩顶附近，属于局部应力集中情况，其余大部分区域应力小于 42.3 MPa；小于 Q345qD 钢材强度设计值[14]，满足规范要求。

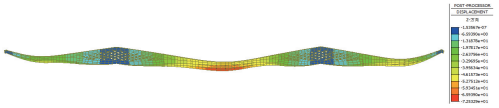

图 9　汽车活载作用下向下位移（单位：mm）

由图 9 可知，在汽车活载作用下，主跨跨中最大向下挠度为 72.5 mm，挠跨比为 72.5/67 500=1/931，小于 1/500，结构刚度满足规范要求。

6　结　语

济南横二路大寺河桥采用上承式钢梁拱组合结构一跨跨越大寺河，整体造型轻盈飘逸，力形合一，契合当地历史文化特色和城市发展理念，旨在丰富城市桥梁的美学效果，增强其与周围环境的协调性，提升景观桥梁城市客厅载体功能。同时，将开孔钢板墙作为一种创新型景观艺术载体应用到桥梁结构上，以其独特的孔洞设计、优良的力学性能[4-9]和美观丰富多变的表现形式，在景观桥梁设计中展现出广泛的应用前景，为类似工程的设计提供有益的参考和借鉴。

参考文献：

[1] 丁建明，曹菲，景国庆，等. 景观桥梁四维创新理念与设计方法——以北京冬奥冰雪五环桥为例[J]. 东南大学学报（自然科学版），2022，52（6）：1171-1177.

[2] 曹菲. 城市景观桥梁创新设计研究[D]. 南京：东南大学，2015.

[3] PURBA R, BRUNEAU M. Finite-element investigation and design recommendations for perforated steel plate shear wall[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2009, 135(11): 1367-1376.

[4] 林裕辉，谭平，周福霖. 开菱形孔钢板墙性能参数分析[J]. 地震工程与工程振动，2017，37（5）：58-68.

[5] 谭平，林裕辉，周福霖. 开菱形孔钢板剪力墙受力性能研究[J]. 建筑结构学报，2016，37（9）：117-125.

[6] 薛志杰，李启才，黄燊. 开孔率对多孔蝴蝶形钢板剪力墙抗震性能的影响[J]. 苏州科技大学学报（工程技术版），2020，33（3）：6-13.

[7] 袁朝庆，刘彦，王义荧. 蜂窝钢板剪力墙抗震性能研究[J]. 工程抗震与加固改造，2017，39（2）：41-46.

[8] 徐亚飞，谭平，陈林，等. 内加劲双钢板剪力墙抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动，2022，42（4）：113-124.

[9] 方礼凯. 开孔和未开孔钢板剪力墙抗剪性能研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2005.

[10] 周伟明. 三跨梁拱组合体系拱桥上部结构拼装施工关键技术[J]. 铁道建筑，2017，57（12）：29-33.

[11] 刘国光. 钢-UHPC 组合桥面板构造参数研究[J]. 城市道桥与防洪，2024（2）：206-213.

[12] 胡文哲. 正交异性钢-UHPC 轻型组合桥面板优化设计[D]. 成都：西南交通大学，2023.

[13] 施颖，史杰. 梁拱组合桥梁上部结构空间分析计算研究[J]. 浙江工业大学学报，2010，38（5）：522-526.

[14] JTG D64—2015，公路钢结构桥梁设计规范[S].