

湖州跨南横塘河下承式单拱肋人行桥设计

莫建超¹, 刘丰洲²

(1. 浙江交工集团股份有限公司, 浙江 杭州 311300; 2. 西城工程设计集团有限公司, 浙江 杭州 310005)

摘要: 以湖州跨南横塘河人行桥项目为背景, 充分考虑现场条件及景观性, 通过对方案的逻辑推演和比选, 创造性提出下承式单拱肋钢结构拱梁组合体系。桥梁跨径 1.3 m+6.3 m+74.8 m+6.3 m+1.3 m, 全宽 7.2 m, 拱肋跨径 74.8 m, 矢高 13 m, 高跨比为 1/5.75。桥梁横断面采用单拱肋低桥面系形式, 拱肋居中布置, 主梁在拱肋宽度范围内高于桥面系设置, 以提高结构体系刚度, 并形成休憩区, 避免人行交通交织。主梁采用单箱三室整体式钢箱梁, 以提高抗扭性能。拱肋采用单箱单室钢箱梁, 拱脚位置与主梁弧形刚接, 以提高拱肋的横向稳定性, 并提升桥梁整体景观性。桥墩采用两排倒三角钢墩, 并采用埋入式柱脚与承台刚接。在主梁 1/3 跨处设置 TMD, 以提升桥梁人行舒适度。

关键词: 人行桥; 下承式拱桥; 单拱肋; TMD; 桥梁设计

中图分类号: U448.11; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)08-0194-05

Design of a Through Single-Arch-Rib Pedestrian Bridge Crossing South Hengtang River in Huzhou

MO Jianchao¹, LIU Fengzhou²

(1. Zhejiang Communications Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 311300, China; 2. Xicheng Engineering Design Group Co., Ltd., Hangzhou 310005, China)

Abstract: Based on a pedestrian bridge project crossing the South Hengtang River in Huzhou, fully considering the on-site conditions and the landscape, a composite system of through single-arch-rib steel structural arch and beam is creatively proposed through the logical reasoning and comparison of the schemes. The bridge spans are 1.3 m+6.3 m+74.8 m+6.3 m+1.3 m, a full width is 7.2 m, an arch rib span is 74.8 m, a rise is 13 m, and a height-to-span ratio is 1/5.75. The cross-section of the bridge is in the type of single-arch-rib low bridge deck system. The arch rib is centrally arranged. The girder is set higher than the bridge deck system within the width of the arch rib to enhance the stiffness of the structural system and form a rest area, avoiding the interweaving of pedestrian traffic. The girder is a single-box three-chamber integral steel box girder to improve the torsional performance. The single-box single-chamber steel box beam is adopted for the arch rib. The position of the arch foot is rigidly connected to the girder in an arc shape to enhance the lateral stability of the arch rib and improve the overall landscape of the bridge. The bridge piers are two rows of inverted triangular steel piers and are rigidly connected to the base slab by the embedded type. A TMD is set at the 1/3 span of the girder to improve the pedestrian comfort of the bridge.

Keywords: pedestrian bridge; through arch bridge; single arch rib; TMD; bridge design

1 工程概况

湖州跨南横塘河人行桥位于湖州市织里镇洋西路北侧, 南北向跨越南横塘河, 南侧与织里换乘中心相接, 是该区域的重要节点工程。桥梁的建设对保证河道两侧人行和非机动车交通系统的良好沟通起重要作用。

桥位处跨越的南横塘河属于太湖溇港遗产, 已

列入《世界灌溉工程遗产名录》。根据桥梁使用功能及场地限制条件, 经综合分析, 主桥上部结构采用 1.3 m+6.3 m+74.8 m+6.3 m+1.3 m 下承式单拱肋形式的钢结构拱梁组合体系桥, 下部结构采用倒三角钢桥墩。河道两侧梯道与主桥单侧垂直布置, 梯道采用整体钢箱梁, 跨径 17.5 m, 与主桥刚接。桥梁总体效果见图 1。

2 桥梁总体设计

2.1 桥梁功能定位与方案控制因素

根据区域交通规划布局, 本桥承载着沟通河道

收稿日期: 2026-01-28

作者简介: 莫建超(1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。



图1 桥梁总体效果图

两岸人行和非机动车交通系统的重要作用。在满足功能需求和节约造价的前提下,打造集“休闲功能、交通功能、文化功能、景观功能”为一体的多功能城市家具,让桥梁成为城市记忆的载体,留住城市记忆^[1-4]。

桥位处南横塘河宽约 40 m,河道红线宽约 73 m。河道为Ⅶ级航道,通航净空 18.0 m×3.5 m,河道北侧防洪堤道路净空要求 4.5 m,控制桥面标高。

2.2 桥型立面方案拟定

根据太湖溇港遗产保护要求,桥梁需一跨过河,河道红线内不能落墩,因此桥梁主跨不小于 73 m。主桥首尾设置梯道以供两岸行人和非机动车上桥。考虑非机动车行车安全性,梯道与主桥垂直布置。考虑工程规模控制,非机动车推行上桥,梯道坡度为 1:4。

桥面标高控制由防洪堤道路净空和梁高控制,为方便行人上桥,需尽量减小桥面与地面的高差,因此考虑采用低梁高方案,并使桥梁整体造型轻盈简洁。常规连续梁方案梁高较高,且需配置长边跨,不适用于本工程^[5]。斜拉桥和悬索桥方案造价高,其经济跨径与该桥不匹配。经综合考虑,采用下承式拱桥方案是该项目的最优选择^[6-7]。同时,主桥设置短边跨,以实现主桥与梯道的交通转换,并可提高桥梁整体刚度和行人舒适性。

综上,桥型立面方案采用 1.3 m+6.3 m+74.8 m+6.3 m+1.3 m 下承式拱梁组合体系,拱肋跨径 74.8 m,矢高 13 m,高跨比 1/5.75。拱肋与主梁均采用钢结构,拱肋与主梁刚接,中跨主梁为偏拉构件,更能发挥钢结构材料优势。梯道在边跨及悬臂范围与主梁刚接,和主梁共同受力,以提升结构整体性并增大梯道刚度。桥梁立面布置见图 2。

2.3 桥梁断面方案拟定

下承式拱桥断面方案分为双拱肋断面和单拱肋断面^[8]。双拱肋断面主桥桥面整幅布置,拱肋设置

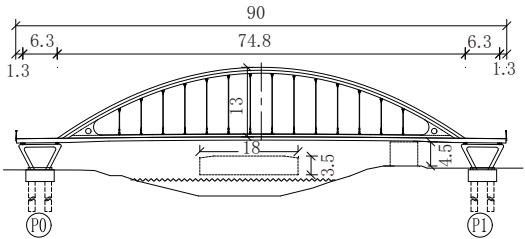


图2 桥梁立面布置(单位:m)

于两侧,拱肋采用风撑联系,整体稳定性好。但考虑人行交通习惯,主桥上人行道两侧布置,非机动车道居中布置;而梯道上人行道居中布置,非机动车推行道两侧布置,在转换平台处形成交通轨迹交织点,存在交通安全隐患。

因此,从以人为本的设计角度出发,本项目创造性地提出单拱肋低桥面系断面方案:单拱肋在断面上居中布置,主梁在拱肋宽度范围内高于桥面系布置。该方案有如下优点:

- (1)主桥桥面与梯道的断面布置形式一致,人行交通不存在交织点,桥上通行更顺畅。
 - (2)锚索区主梁高出桥面,提供人行休憩座椅。受力上可增大主梁刚度,有效降低主梁高度。
 - (3)采用单拱肋方案,拱肋截面利用率更高,更具经济性。
 - (4)可避免双拱肋吊杆在视觉上形成的重叠错乱,景观性更佳^[9-10]。
 - (5)增大内部空间以安置TMD(tuned mass damper)。
- 桥梁典型横断面见图 3 至图 5。

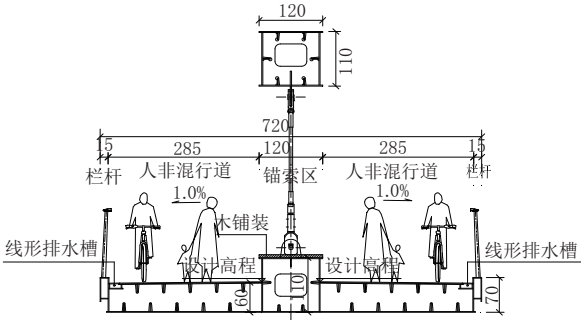


图3 主桥跨中处横断面图(单位:cm)

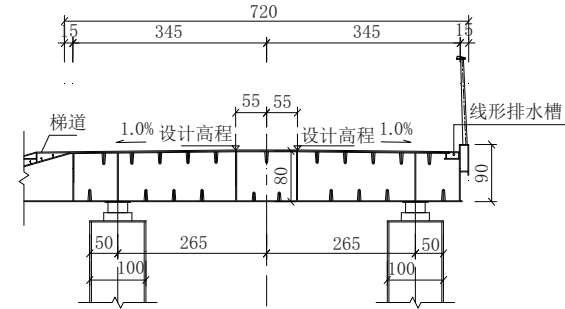


图4 主桥桥墩处横断面图(单位:cm)

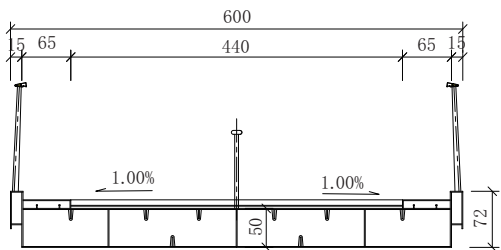


图5 梯道跨中处横断面图(单位:cm)

2.4 桥梁边界方案拟定

根据景观造型和体系受力性能,桥梁边界方案拟定考虑V墩刚构体系、倒三角墩4支点连续梁体系和直墩2支点连续梁体系3种边界方案。3种边界方案的立面见图6至图8。

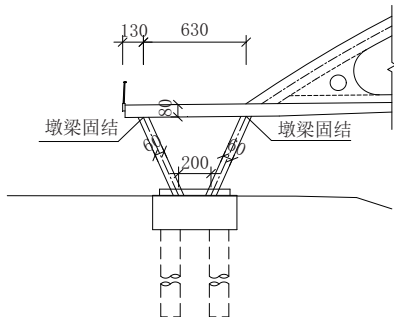


图6 V墩刚构体系立面图(单位:cm)

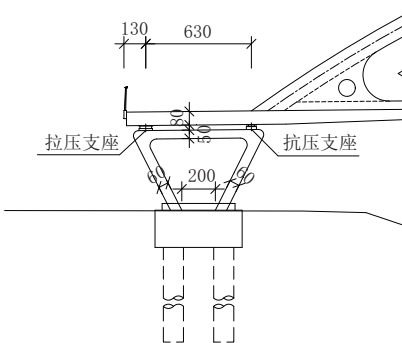


图7 倒三角墩4支点连续梁体系立面图(单位:cm)

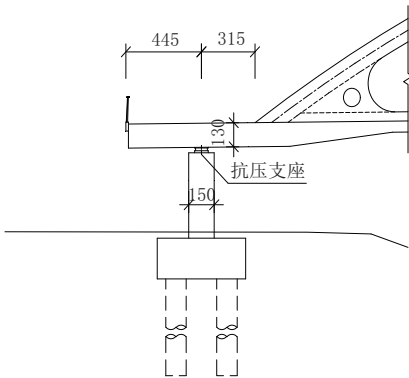


图8 直墩2支点连续梁体系立面图(单位:cm)

V墩刚构体系为桥墩采用V形钢墩,桥墩与主梁刚接。倒三角墩4支点连续梁体系为桥墩采用倒三角钢墩,墩顶设置两排支座,跨中侧支座与拱脚对齐。直墩2支点连续梁体系为桥墩采用混凝土柱式

墩,墩顶设置支座,支座与拱脚不对齐。
分别从受力性能、经济性和景观性方面对3种方案进行比选,见表1。

表1 桥梁边界方案比选			
方案比选	V墩刚构体系	倒三角墩4支点连续梁体系	直墩2支点连续梁体系
桥墩形式	V形钢墩	倒三角钢墩	混凝土柱式墩
边界形式	桥墩与主梁刚接	墩顶设置两排支座 跨中侧支座与拱脚对齐	墩顶设置支座 支座与拱脚不对齐
受力性能	结构刚度大 刚构体系温度效应显著 桩基存在较大的负反力	结构刚度较大 存在支座负反力	结构刚度较小, 拱脚范围主梁应力大,需加大梁高
经济性	下部结构用钢量较大,桩基需采用钢桩,经济性较差	上下部经济性均适中	下部结构较经济,上部结构用钢量较大,整体经济性最好
景观性	下部结构采用V墩,景观性最好	下部结构采用倒三角墩,墩顶横梁略显冗余,景观性较好	直墩设置景观上头重脚轻
比选	推荐		

由表1知,V墩刚构体系虽然景观性最好,但桩基负反力问题采用常规钻孔灌注桩方案难以解决。直墩2支点连续梁体系受力最简单,但刚度较小需加大梁高,景观性欠佳。倒三角墩4支点连续梁体系经济性和景观性均较优,支座负反力可以根据计算结果,配置边跨压重或设置受拉支座等方式消除,因此推荐采用。

3 结构设计细节

3.1 主梁

主梁总宽7.2 m,包括6.9 m宽的单箱三室整体式钢箱梁和两侧各0.15 m宽的栏杆基座小箱室。主跨中箱宽度1.2 m,高1.1 m,宽度与拱肋对应,高出边箱顶面0.5 m。两侧边箱宽2.85 m,根部高0.6 m,横向呈1%排水横坡。边跨梁高0.8 m,中箱高度与边箱相同。

钢箱梁顶底板厚14 mm,中腹板厚20 mm,边腹板厚16 mm。中箱顶板设置1道140 mm×12 mm板肋;中箱底板设置2道120 mm×12 mm板肋,同时作为TMD支撑板;中箱腹板设置1道140 mm×12 mm板肋,在TMD位置断开。边箱顶板设置5道160 mm×16 mm板肋,底板设置5道120 mm×12 mm板肋。边箱两侧结构下凹,设置纵向线型排水槽。外侧栏杆

基座底部设置凹槽,布置灯线。边跨钢梁顶板开设多个直径 200 mm 的灌注孔及直径 20 mm 的气孔,方便灌注 C40 自密实补偿收缩混凝土压重。主梁断面见图 9。

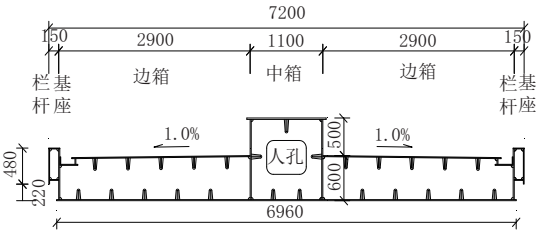


图9 主梁断面图(单位:mm)

3.2 拱肋

拱肋上缘跨径 74.8 m,矢高 13m,高跨比 1/5.75,采用二次抛物线线型。拱肋采用钢箱梁形式,以保证单拱肋的横向稳定性。拱肋宽 1.2 m,高 1.1 m。顶底板厚 20 mm,腹板厚 20 mm。顶底板均设置 2 道 140 mm×20 mm 板肋,腹板设置 1 道 140 mm×20 mm 板肋。

为提高拱肋的横向稳定性,同时提升整体景观性,拱脚位置拱肋与主梁弧形刚接,拱肋底板与主梁中箱钢板顺接,拱肋腹板与主梁中腹板顺接。同时,在拱脚处桥面以上 0.8 m 位置,设置直径 1 m 的对穿孔,以提升景观性及趣味性。拱肋断面见图 10。

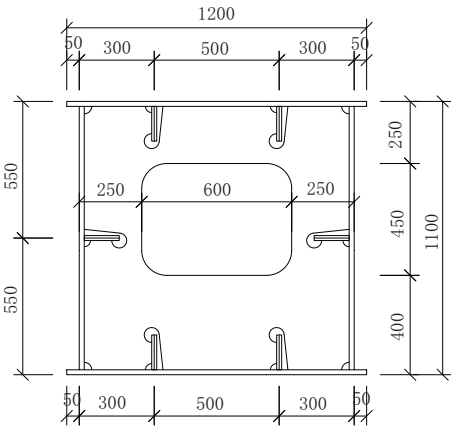


图10 拱肋断面图(单位:mm)

3.3 吊杆

全桥共设置 14 根吊杆,吊杆间距 4 m。吊杆采用 GJ15-6 钢绞线整束挤压吊杆。索体用 PE 护套环氧喷涂钢绞线,缠包外挤 PE。单根钢绞线公称直径为 $\phi 15.2$ mm,公称抗拉强度为 1 860 MPa,弹性模量为 1.95×10^5 MPa。

吊杆成桥索力采用基于影响矩阵法原理的索力优化实用方法确定^[11-12],并采用迭代法确定张拉索力^[13]。经 6 次迭代,吊杆索力误差均在 4% 以内,满

足工程要求。索力计算见表 2。

表2 吊杆索力计算

吊杆编号	1	2	3	4	5	6	7
目标索力/kN	192.3	229.9	228.6	225.2	224.5	229.8	239.4
初始索力/kN	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
迭代 1	索力均值/kN	205.2	412.1	389.5	206.0	190.8	169.6
	差值/%	6.7	79.3	70.4	-8.5	-15.0	-26.2
迭代 2	调整索力/kN	3.3	-69.3	-60.4	18.5	25.0	36.2
	差值/%	2.9	44.9	40.3	-2.4	-12.3	-15.7
迭代 3	调整索力/kN	0.4	-114.2	-100.7	20.9	37.3	51.9
	差值/%	1.3	25.3	22.7	-0.1	-9.4	-9.2
迭代 4	调整索力/kN	-1.0	-139.5	-123.4	21.0	46.7	61.1
	差值/%	0.7	14.2	13.1	0.7	-6.8	-5.5
迭代 5	调整索力/kN	-1.7	-153.7	-136.5	20.4	53.5	66.7
	差值/%	0.3	8.1	7.6	0.8	-4.8	-3.2
迭代 6	调整索力/kN	-2.0	-161.8	-144.1	19.5	58.3	69.9
	差值/%	2.8	3.5	3.6	3.3	3.5	3.2

3.4 桥墩

每个桥墩设置两排倒三角钢墩,横桥向间距 5.3 m。钢墩立柱倾角约 63°,高约 4.7 m,采用单箱 2 室箱型截面,横桥向宽 1 m,顺桥向宽 0.6 m,板厚 25 mm。钢墩顶系梁采用单箱 2 室箱型截面,横桥向宽 1 m,高 0.5 m,板厚 25 mm。

桥墩承台采用 H 形承台,承台高 2.2 m,横桥向总宽 7.6 m,顺桥向宽 5.2 m,系梁宽 1.4 m。每个桥墩设置 4 根直径 1.2 m 的钻孔钢管桩基础。钢墩与承台采用埋入式柱脚形式连接,柱脚伸入承台 1.3 m,设置 d19×120 剪力键。柱脚侧边及顶底板开设多个直径 200 mm 的灌注孔及直径 20 mm 的气孔,以保证承台混凝土振捣密实。桥墩断面见图 11。

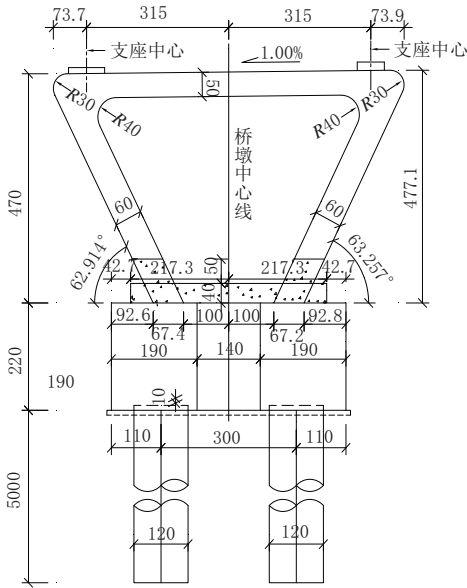


图11 桥墩断面图(单位:cm)

3.5 梯道

梯道宽6 m,断面布置为0.15 m(栏杆)+0.65 m(推行道)+4.4 m(人行道)+0.65 m(推行道)+0.15 m(栏杆)。梯道长17.56 m,高差4.2 m,坡度1:4,中间设置一个1.9 m宽的平台。梯道上部结构采用单箱四室整体式钢箱梁结构,梁高0.5 m,与主桥刚接。

4 施工方案

- 该桥采用水中少支架施工方案,主要步骤如下:
- (1)场地整平,进行桩基础施工,同时钢厂内制作钢结构;
 - (2)预埋桥墩钢柱脚,浇筑桥墩承台和梯台;
 - (3)安装钢桥墩,柱脚及墩底处灌注C40自密实补偿收缩混凝土;
 - (4)在跨径1/4位置,搭设钢管型钢临时支架,吊装钢主梁和钢梯道;
 - (5)钢主梁上搭设临时支架,并完成支架预压,吊装钢拱肋;
 - (6)拆除梁上临时支架,安装吊杆,从梁端至跨中依次对称同步张拉吊杆;
 - (7)拆除水中临时支架,主桥钢梁边跨灌注C40自密实补偿收缩混凝土压重;
 - (8)安装及调试TMD;
 - (9)桥面系施工,成桥。

5 人致振动分析

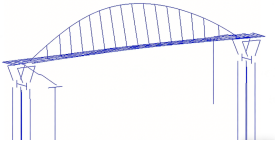
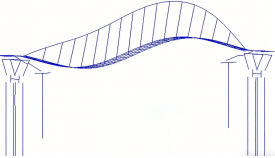
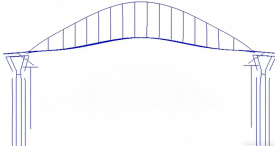
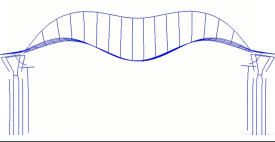
本桥结构轻盈,前三阶竖向振动模态见表3。根据德国人行桥设计指南EN03,一阶竖向振动模态频率为1.78 Hz,满足条件 $1.25\text{ Hz}\leq f\leq 2.4\text{ Hz}$,需进行人致振动及人行舒适性分析。一阶横向振动模态频率为1.3 Hz,不满足条件 $0.5\text{ Hz}\leq f\leq 1.2\text{ Hz}$,不存在横向“锁定”现象。

对一阶竖向振动模态进行分析,在1/3跨处最大竖向加速度为 3.2 m/s^2 ,舒适级别为CL4“不可接受”,需设置TMD进行减振^[14-16]。该桥在1/3跨处设置2件TMD,全桥共设置4件TMD。单个TMD质量为1 500 kg,刚度为383 kN/m,阻尼系数为3.9 kNs/m。设置TMD后,在1/3跨处最大竖向加速度为 0.29 m/s^2 ,舒适级别为CL1“好”,人行舒适性满足要求。

6 结 语

湖州跨南横塘河人行桥在设计和施工过程中存在以下难点:(1)一跨跨越73 m河道红线;(2)预留

表3 振型频率及阵型

模态号	频率/Hz	振型形状	振动形态
1	1.3		正对称横向振动
2	1.78		反对称竖向振动
3	2.60		正对称竖向振动
4	3.51		正对称竖向振动

航道及堤坝道路净空,需要低梁高结构;(3)兼顾人行和非机动车推行功能,并考虑两者的交通交织;(4)桥梁宽跨比较小,横向刚度及抗扭刚度要求高;(5)景观性和经济性要求高;(6)施工期间航道需保通。

本文创造性地提出了下承式单拱肋形式的钢结构拱梁组合体系方案。单拱肋在断面上居中布置,主梁在拱肋位置高于桥面系布置,提高结构刚度的同时兼做人行休憩平台,提升桥梁景观的同时解决人行交通的交织点问题。主梁和拱肋截面均采用钢箱截面,梯道与主梁刚接,提高了桥梁整体的刚度和稳定性。桥梁边界采用倒三角墩4支点连续梁体系结合边跨压重,兼顾桥梁景观和工程造价。在1/3跨处设置TMD,人行舒适性基本由CL4提升至CL1,达到良好的人行舒适度。结构形式及施工方法可作为同类型桥梁设计的参考。

参考文献:

- [1] 乔云强,刘小飞,史建朋.人行桥美观设计研究[J].世界桥梁,2013,41(4):15-20.
- [2] 罗晓甜,胡志梅.城市人行桥梁景观设计构成与实例[J].世界桥梁,2012,40(5):7-11.
- [3] 于洋.大跨径景观人行桥设计[J].城市道桥与防洪,2025(7):140-143.
- [4] 刘忠清,陈超,邓玮琳.一座大跨径山间人行景观桥方案设计[J].中国市政工程,2023(1):4-6.
- [5] 杨兴,武电坤.短边跨连续梁设计理论与创新技术研究[J].中外

(下转第207页)