

深业上城皇岗景观人行天桥设计创新与实践

梁汇伟¹, 徐军丽², 潘可明¹, 王国兴¹, 潘 迪¹

(1. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京市 100082; 2. 深圳市交通公用设施建设中心, 广东 深圳 518000)

摘 要: 通过工程案例解析, 系统阐述了景观人行天桥的设计创新, 设计采用新型的三角形墩梁结合的空间钢结构形式以实现慢行交通联系、跨越现状快速路、与地铁车辆段结构共构以及建筑造型等功能。通过对比分析国内外人行天桥设计规范, 探讨舒适度指标的合理取值, 通过计算桥梁结构的最大振动响应来评估其舒适性, 进一步优化结构的布置形式。采用 MIDAS Civil 等空间有限元程序分析主体结构空间钢桁架受力性能, 对复杂钢节点进行精细化设计。同时介绍了人行天桥与城市环境、人性化设计与景观相融合的创新实践, 为类似景观天桥的建设提供重要的工程参考。

关键词: 景观人行天桥; 空间钢桁架; 有限元分析; 精细化设计; 人行舒适度指标

中图分类号: U448.11; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)11-0149-06

Innovation and Practice in Design of Huanggang Landscape Pedestrian Overpass in Shenye Shangcheng

LIANG Huiwei¹, XU Junli², PAN Keming¹, WANG Guoxing¹, PAN Di¹

(1. Beijing General Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China; 2. Shenzhen Transportation Public Facilities Construction Center, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Through the analysis of engineering cases, the design innovation of landscape pedestrian overpasses is systematically expounded. A new type of spatial steel structure form with integrated triangular piers and beams is adopted to fulfill the functions such as connecting non-motorized traffic, spanning the existing expressway, co-structuring with the metro depot structure, and architectural modeling. Meanwhile, through a comparative analysis of codes and standards for pedestrian overpasses at home and abroad, the reasonable value range of comfort indicators are further discussed. The comfort of the bridge is evaluated by calculating the maximum vibration response of the bridge structure so as to further optimize the structural layout. The spatial finite element programs such as MIDAS Civil are adopted to analyze the mechanical properties of the spatial steel trusses in the main structure. The refined design is conducted for complex steel joints. At the same time, the innovative practices of integrating the pedestrian overpasses with the urban environment, and the human-centered design with landscape elements are introduced, which provides the important engineering references for the construction of similar landscape pedestrian overpasses.

Keywords: landscape pedestrian overpass; spatial steel truss; finite element analysis; refined design; comfort indicator

0 引 言

人行天桥作为城市公共建筑, 解决了市民出行的交通要求, 带动了周边商业发展, 构造了特色城市景观, 反映了街区文化, 体现了城市文化氛围, 是重要的市政设施。一座成功的人行天桥甚至还可以成为城市的一张名片, 如著名的广州珠江上的海心桥、

伦敦泰晤士河的千禧桥、纽卡斯尔盖茨黑德“会眨眼”的千禧人行桥等。陈珊珊^[1]对人行天桥的造型语言进行探究, 提出一种结合实际应用, 分析和实践人行天桥造型设计语言的方法; 郭华东^[2]系统阐述了桥梁美学的基本准则和天桥的设计特点; 兰辉萍等^[3]介绍了环形天桥的结构特点, 通过分析对结构进行优化; 单晓方^[4]论述了景观天桥因地制宜, 城市现状与规划相融合的设计理念; 王佳^[5]结合实际工程介绍了景观天桥在结构形式、附属结构等方面的设计概念, 并对结构强度、变形、自振频率等进行了有限元分析。几年来, 各地陆续出台了相关的地方标准或指引, 北京市出版了地方标准^[6], 主要从无障碍

收稿日期: 2025-10-21

作者简介: 梁汇伟(1979—), 男, 工学学士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

通信作者: 潘可明(1971—), 男, 工学硕士, 教授级高级工程师, 公司专业副总工程师, 从事桥梁设计与科研工作。电子邮箱: pankeming@163.com

碍设计上体现对于相对弱势群体的人文关怀。深圳市交通局组织相关部门及单位编写人行天桥设计标准^[7],提出人行天桥和连廊不仅要承担城市交通的职能,完善道路空间的组织结构,满足人们的出行、观赏、游憩、交往、休闲等需要,还应把握和传承历史文脉,塑造和体现具有城市文化内涵的建筑景观。本文以深圳市深业上城皇岗景观人行天桥工程为背景,从总体设计思路、国内外人行舒适度研究、特殊的空间钢结构布置、复杂的钢节点精细化分析、与众不同的景观设计等方面进行设计创新并予以实践,以期同类桥梁设计提供借鉴。

1 工程背景

深业上城项目位于深圳中部发展轴线上,东、西侧分别是深圳著名的城市中心公园——笔架山公园和莲花山公园。项目通过城市单元更新,打造以“创业板企业”与“高端服务业”为主的核心综合商业体。根据研究,现状笔架山公园—深业上城—莲花山公园的联系较弱,人行过街设施不足,规划部门提出串联“山—城”的空间慢行交通系统,在东、西侧分别修建皇岗、彩田人行天桥,以联系笔架山公园,深业上城综合体项目及莲花山公园。天桥全长366 m,桥面全宽7.16~10.45 m(含栏杆及景观植被),主桥面积3 495 m²;共设8条梯道及一座垂直电梯,梯道宽度为3.5 m(见图1)。

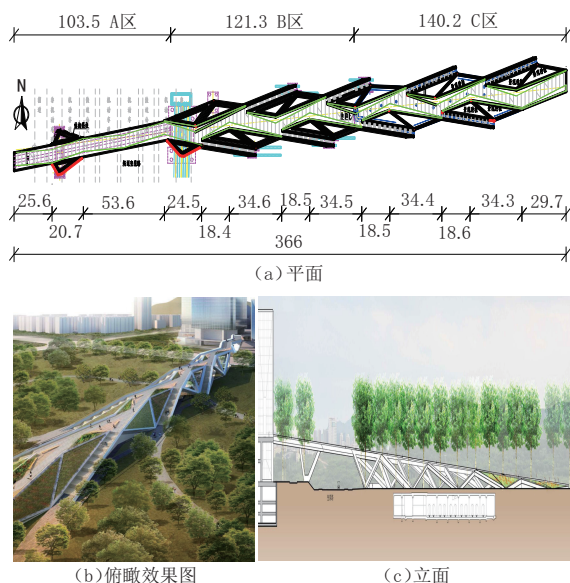


图1 桥型布置图(单位:m)

2 设计难点

(1) 天桥横跨交通繁忙的城市快速路及辅道,引

桥与地铁9号线车辆段结构顶板共构,需采用特殊的结构布置以及装配式施工工艺;

(2) 三角形多面体钢箱墩梁组合结构与地铁共构,节点设计复杂,需进行精细化计算分析;

(3) 结构刚度受限,需分析人行舒适度;

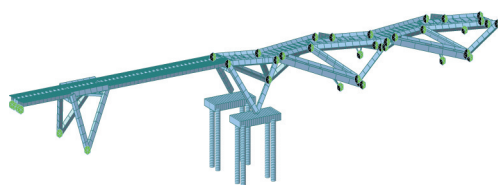
(4) 城市商业和自然核心区,景观要求高。

3 总体设计方案

结构分为A~C区,A区跨越皇岗快速路,上部钢箱梁结构架设简便,跨越能力强,有效解决约50 m的主跨跨度需求。B区及C区位于地铁车辆段结构上方,采用三角形墩梁结合钢结构以及直立钢网结构。标准化的钢结构可以快速便捷地施工,同时实现建筑景观“蜿蜒曲折”的形态要求。

4 主体结构设计及分析

采用有限元软件MIDAS Civil进行结构弹性分析(见图2),共计1 224个节点,1 407个单元。桁架、墩柱及桩基构件均采用梁单元模型,桥面采用板单元(不计重量和刚度)。桥台支座及墩底采用一般支撑,墩顶与主梁间采用弹性连接,按实际情况对纵、横向进行约束和释放,并采用SAP2000软件进行复核。



4.1 结构设计

4.1.1 主梁桁架设计

桥梁上部采用上承式空间钢箱梁和钢桁梁结构,其特点为构造简单、有利于标准化和便于制造安装^[8]。结构分为A、B、C区,A区为钢箱梁,梁高1.5 m,以直线形式快速跨越城市主干道。主桥上部结构。B区采用大截面三角形墩梁结合空间钢结构,三角形的两条边作为稳定的斜腿墩柱支撑,并与地铁车辆段结构共构。三角形的另一条边作为边纵梁,截面为正方形钢箱,边长1.5 m,与横向工字钢二等梁形成桥面支撑体系。C区采用小截面三角形墩梁结合空间钢结构与钢网结构组合,小三角形截面为正方形钢箱,边长为0.6 m。

三角形墩梁结合钢结构可单个独立,也可多个

组合而成,墩柱与上部结构主梁由旋转的多边形或矩形钢杆件组合为稳定的三角形结构构成。三角形中的一条边为上部结构的边纵梁(一等梁),对角为墩柱的柱脚。二条边纵梁之间设置横向工字钢为二等梁(见图3)。通过结构创新处理,三角形通过改变平面和立面角度可形成不同的平面,可实现建筑“蜿蜒曲折”的效果,同时“三角形”及“外八字”更有利于结构的稳定。

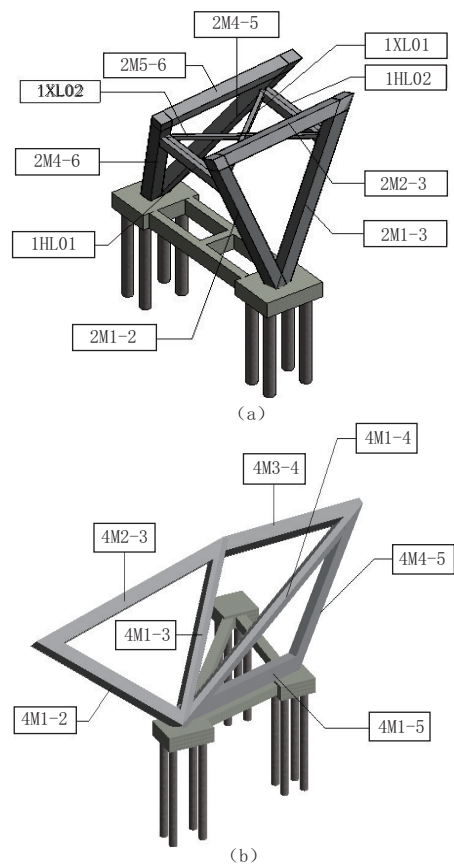


图3 多边形钢箱杆件组合的三角形结构墩柱

4.1.2 墩柱基础设计

下部结构采用钻孔灌注桩基础,桩顶设置承台,位于地铁车辆段上方基础需利用车站柱网设置基础。承台上方设置墩柱,墩柱由若干多边形钢箱杆件组合的三角形结构构成(见图3),并利用顶部的一条边作为主梁的边梁。

A区和B区焊接组合桥墩设计:倾斜钢柱截面为焊接钢板组合四边形或六边形截面,受力包括双向弯矩及轴向压力。为提供足够的刚度,截面边长为1 500 mm,钢板厚度 50 mm,截面四角采用加劲肋来避免局部弯曲。

计算结果显示,焊接钢板组合桥墩设计抗弯组合应力为 122 MPa,组合剪应力为 87 MPa,应力均满足规范要求。整体稳定系数为 15.07,大于规范值

10.5,受弯构件稳定及局部稳定(通过设置加劲肋)均满足规范要求。

4.2 复杂节点分析

节点设计采用SAP2000 建立壳单元模型,节点模型通过刚体约束来连接整体线单元模型,以保证内力传递。由于全桥节点较多,仅以节点5N1作为代表。节点5N1是一个底部结点,将3根倾斜钢柱连接至地基。外侧两根柱截面为正方形,中间柱截面为六角型,交点点在底板上方 500 mm,钢板连接处设置加劲板肋。选取主跨柱脚进行有限元实体分析,最大主应力 178 MPa,满足规范要求(见图4)。

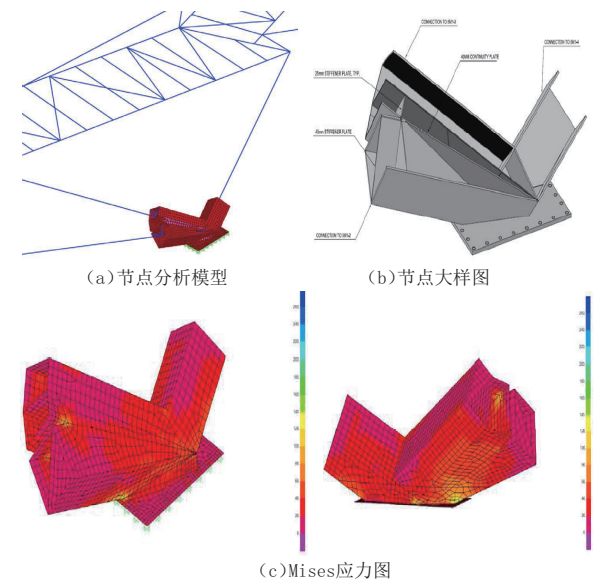


图4 柱脚精细化实体分析图

4.3 人行舒适度分析

地铁上方结构极限状态设计模型中的底部支撑采用弹簧刚度来模拟基础与地铁结构的水平及扭转刚度,振动设计模型中的底部模拟为刚接。结构周期与振型:全桥结构特性按A段、B段及C段联合分析,自振频率如表1所示。

表 1 结构自振频率表							
振型	周期/s	X 平动	Y 平动	Z 平动	X 扭转	Y 扭转	Z 扭转
1	0.56	0.01	0.52	0.00	0.00	0.00	0.54
2	0.42	0.02	0.52	0.50	0.51	0.51	0.54
3	0.37	0.02	0.52	0.50	0.51	0.51	0.54
5	0.26	0.17	0.65	0.50	0.52	0.51	0.67
99	0.04	0.96	0.94	0.93	0.94	0.93	0.94
100	0.04	0.96	0.94	0.93	0.94	0.93	0.94

限于篇幅,仅列出A段的分析振型图结果:桥梁A段较为不规则,第1振型为横向平动,第2振型为竖向平动(见图5):

为保证行人激励下人行天桥的舒适性,现行的各国规范在设计人行桥时主要通过两种方法来控

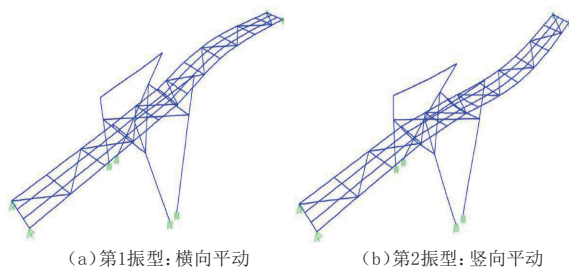


图5 A区结构自振频率图

制:避开敏感频率法和限制动力响应值法。

避开敏感频率法主要是通过回避敏感范围内的频率来达到振动适应性要求,既满足使用要求的桥梁振动允许值指标。该方法主要考虑到行人的正常行走步频介于1.2 Hz(慢走)和2.4 Hz(快走)之间、其二阶步频在2.8~4.8 Hz,而侧向的步频为0.8~1.2 Hz和1.6~2.4 Hz,结构基频在此范围外可避免出现人桥共振,为此对人行桥的结构频率进行了限制。《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ69)^[9]规定桥上部竖向频率(不考虑行人活载)不应小于3 Hz,对横向频率无要求;日本道路协会仅要求竖向频率不应该处于1.5~2.3 Hz范围之内;欧盟的EN 1990^[10]和英国BS 5400^[11]规定竖向基频应超过5 Hz;瑞典国家规范Bro 2004^[12]则规定竖向基频超过3.5 Hz时,舒适度可自然得到满足,无需验算结构的振动最大响应。一般情况而言,避开敏感频段法简单实用,但缺点是在设计阶段很难以足够的精度来预测结构的固有频

率。其次,试验研究表明,一些人行桥的固有频率在规范建议的不允许频率范围内,其振动幅值仍可能是可接受的。因此,避开敏感频段法在设计阶段既难以实现,也可能偏于保守。而国外的人行桥的设计规范已逐渐从避开频率的评价方法向限制动力响应的的评价方法发展^[10-12]。

所谓限制动力响应值法,指桥梁结构频率不能避开行人步频范围时,需通过计算桥梁结构的最大振动响应来评估其舒适性的方法,例如国际标准组织ISO^[13]和德国人行桥设计指南EN 03^[14]。限制动力响应值法中关键的问题是如何确定人行荷载标准和如何选择舒适性指标的标准,在使用限制动力响应值法时,应考虑不同的人行交通工况(既不考虑在桥上的跑、跳和静止不动等极端情况)来确定人行荷载和人体舒适度指标,表2摘取了国内外主流规范关于舒适度研究的规定。陈政清^[15]等基于国内外桥梁振动事故案例及研究成果,系统梳理人行桥动力设计理论体系;伦敦千禧桥发生大幅度振动关停之后,Dallard等人采用逐渐增加行人的方法对该桥进行振动试验研究^[16],研究发现随着行人人数的增多,结构的振动效应会逐渐增大;陈阶亮^[17]系统分析了各国关于人行舒适度的规定并总结国际流行的采纳标准;曲慧磊^[18]通过实验分析与数值模拟对比分析,推荐采用德国人行桥设计指南EN 03进行人行舒适度分析更具代表性。

表2 国内外规范关于舒适度研究汇总表

序号	规范名称	峰值加速度限值/(m·s ⁻²)		说明
		横向	竖向	
1	中国,城市人行天桥与人行地道技术规范 CJJ69	无	无	需满足竖向3 Hz以上
2	中国,城市人行天桥与人行地道技术规范 CJJ69 (征求意见稿)	[0, 0.1)	[0, 0.25*f ₀ ^{0.78})	CL1 最佳
		[0.1, 0.15*f ₀ ^{0.5})	[0.25*f ₀ ^{0.78} , min(0.5*f ₀ ^{0.5} , 0.7))	CL2 合格
		[0.15*f ₀ ^{0.5} , ∞)	[min(0.5*f ₀ ^{0.5} , 0.7), ∞)	CL3 不合格
3	欧洲, EN1990 规范	0.2~0.4	0.7	竖向5 Hz以下以及横向2.5 Hz以下需要验算
4	德国, 人行桥设计指南 EN 03 规范	0.1	0.5	最佳
		0.3	1.0	合格
		0.8	2.5	不合格
5	英国, BS 5400 规范	无	0.5√f ₀ ; 3 Hz时0.87	竖向5 Hz以下验算
6	瑞典, Bro 2004 规范	无	0.5	竖向3.5 Hz以下验算
7	国际标准化组织, ISO 10137 规范	0.216	0.3	均方根加速度

本桥结构依据^[14]规定进行计算,当自振频率处于竖向振型1.25~2.3 Hz、2.5~4.6 Hz范围内或侧向振型0.5~1.2 Hz范围内,需进行人行舒适度评价。由表1可得:第一横向振型周期0.56 s,频率为1.79 Hz,满足要求。第一竖向振型周期0.37 s,频率为2.68 Hz,

不满足要求,需进行舒适度分析。计算阻尼比取0.4%,人群密度分别取3种工况进行试算:工况一:TC2:d=0.2人/m²,人行交通十分稀少可快步、自由的行走,单个行人能够自由选择步伐;工况二:TC4:d=1人/m²,人行交通繁忙,行走自由受限,快步行走不

可能;工况三:TC5: $d=1.5$ 人/ m^2 , 交通十分繁忙, 行走不舒适, 变得拥挤, 行人不能自由的选择步伐。计算结果均满足规范要求, 处于最佳状态, 其中工况三最大, 具体如下: 研究分析考虑模型中桥面上所有节点, 在结构反应系数最大的区域, 模拟人行加载激振影响, 最大响应加速度在第一跨跨中, 结构响应加速度最大值 $0.467 < 0.5 \text{ m/s}^2$, 响应加速度值(部分)见图6。

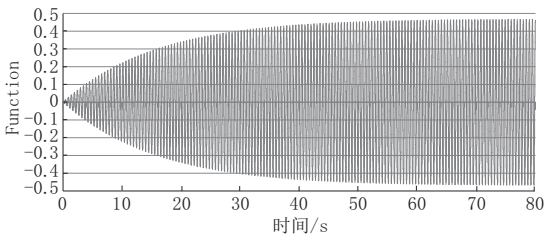


图6 步行加载激振反应图

6 景观设计

桥址位于深业上城三层平台商业综合体东部, 西端紧邻宴会厅和超高层塔楼, 横跨皇岗快速路及地铁车辆段, 向东延伸至笔架山公园, 全桥总长约366 m, 落差约15 m, 是综合体东侧标志性建筑物。设计的灵感源自中国古典园林的九曲桥, 通过“步移景异”的手法, 将商业综合体的行人流线巧妙地与笔架山公园关联。蜿蜒曲折的流线设计有别于以往人行天桥为保证快速通过而形成的单调死板的直线型, 借助有利的景观高度和开阔的视野, 让行人在行进过程中放慢速度充分驻足, 欣赏笔架山的自然景观。同时将笔架山的游客引导至商业综合体, 为公园和商业增添更多活力。步道坡度约5%的符合无障碍设计规范, 保证了行人在行走途中不易察觉出高差的变化, 轻松惬意的徜徉其中, 天桥效果图及建成图如图7。



图7 整体俯瞰图

天桥的造型犹如一条长龙, 从商业体徐徐延伸至公园自然环境中。随着曲折的漫步道, 向下伸展出三角形的构件, 成为支撑桥体的“龙爪”, 在皇岗路

两侧, “龙爪”轻盈而挺立, 三角形构件中空, 在减少荷载的同时, 保证了结构的稳定性, 进入笔架山公园后, “龙爪”缓缓展开, 保证结构稳定支撑的同时提供立体绿化的平台。

设计除了考虑到桥上行人的流线外, 还在每个转折处进行局部放大, 形成三角形的公共空间和绿化空间, 提供座椅等城市家具, 为行人创造休憩的条件。在桥下的半围合空间中, 提供了诸如都市集市、小型表演及运动休闲场合等多种可能性(见图8), 丰富了公园的环境行为属性。

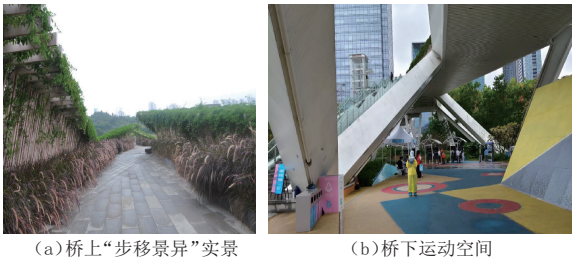


图8 皇岗人行桥实景图

7 结 语

深圳市深业上城皇岗景观人行天桥跨越交通繁忙的城市快速路、连接商业综合体及自然核心区, 项目通过创新的结构选型、合理的人行舒适度分析以及新颖的建筑造型以期达到功能满足、环境协调的效果:

(1)结构选型: 采用简单而稳定的三角形钢结构作为基本结构单元, 与钢箱梁或桥面系结构组合形成稳定的整体结构, 并通过改变三角形的空间形态与建筑形态相适应。三角形桥墩在梁高受限的情况下实现较大跨越能力, 且减少临时支墩的设置, 有效降低桥梁施工期对现状交通的影响。地铁车辆段共构节点受力及构造复杂, 采用有限元实体分析, 合理配置加劲板肋以实现应力平顺过渡。

(2)舒适度分析: 由于主梁结构刚度受限, 需进行人行舒适度的合理分析, 通过对比国内外主流的人行桥规范和标准, 探讨舒适度指标的合理取值, 推荐采用德国人行桥设计指南EN 03人行振动响应分析的有关规定作为控制指标。本结构竖向基频为2.68 Hz, 处于需进行人行舒适度评价的频率范围, 经分析, 人致振动最大加速度响应值为 $0.467 < 0.5 \text{ m/s}^2$, 舒适度满足要求。

(3)建筑景观设计: 灵感源自中国古典园林的九曲桥, 通过“步移景异”的手法, 将商业综合体的行人流线巧妙地与公园关联。通过合理的结构选型与新

颖的景观设计相融合,充分利用桥上、桥下空间提供观景、休憩、运动、表演的场所,是人与自然和谐共生理念的一次充分实践;

该桥于2020年建成投入使用,与西侧的彩田景观人行天桥遥相呼应,作为深圳市区“五园联通”以及“鲲鹏径”的重要组成部分,为城市和公园间构建了和谐的联系纽带。

参考文献:

- [1] 陈珊珊.城市人行天桥造型设计研究[D].武汉,华中科技大学,2012.
- [2] 郭华东.人行天桥美学设计的研究与实践[J].西部交通科技,2017,12(11):52-55.
- [3] 兰辉萍,孟德伟.大型环向人行天桥的综合分析与探讨[J].城市道桥与防洪,2010,27(2):30-33.
- [4] 单晓方.浅谈景观人行天桥的设计[J].城市道桥与防洪,2006,23(5):72-74.
- [5] 王佳.谈一座景观人行天桥的设计[J].山西建筑,2015,41(30):157-158.
- [6] SJG 70—2020,人行天桥与人行地下通道无障碍设施设计规程[S].
- [7] SJG 70—2020,人行天桥和连廊设计标准[S].
- [8] 吴冲.现代钢桥(上册)[M].北京:人民交通出版社,2006.
- [9] CJJ 69—95,城市人行天桥与人行地道技术规范[S].
- [10] EN 1990: 2002/A1: 2005, Eurocode—Basis of structural design. Application for bridges[S].
- [11] BS 5400, Steel Concrete and Composite Bridges Part2: Specification for Loads; Appendix C: Vibration Serviceability Requirements for Foot and Cycle Track Bridges[S].
- [12] Bro 2004. VagVerkets Allmänna Tekniska Beskrivning för Nybyggande och Förbättring av Broar[S].
- [13] ISO 10137: 1992, Bases for Design of Structures[S].
- [14] EN 03. Design of Footbridges Guideline[S].
- [15] 陈政清,华旭刚.人行桥的振动与动力设计[M].北京:人民交通出版社,2009.
- [16] Dallard P., Fitzpatrick A.J, Flint A, *et al.* London Millen—nimm bridge: Pedestrian—induced lateral vibration[J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(6): 412-417.
- [17] 陈阶亮,裴新谷.人行桥振动舒适性评价方法及标准研究现状[J].桥梁建设,2010,40(1):75-78.
- [18] 曲慧磊.行人激励下人行天桥的振动舒适性研究[D].杭州:浙江大学,2014.

(上接第131页)

抗震性能与现浇桥墩具有高度一致性,在高烈度区应用预制拼装连接时,可选择将套筒预埋在承台内;

(4)《预制拼装混凝土桥墩技术规程》T/CCES 31—2022中建议在VIII和IX区应用预制拼装桥墩,宜进预制拼装桥墩减隔震设计,与本文研究成果一致。

参考文献:

- [1] 刘书杰.全预制拼装技术在呼和浩特市某快速路改造提升工程中的应用[J].上海建设科技,2018(6):25-27.
- [2] 徐俊,王明晔,卢永成.高烈度区城市高架桥梁的全预制拼装设计方案[J].城市道桥与防洪,2017(12):72-75.
- [3] CJJ 166—2011,城市桥梁抗震设计规范[S].
- [4] 上海市政交通设计研究院有限公司.《呼和浩特市昭乌达路哲里木路改造提升工程——预制拼装桥墩抗震性能试验研究》研究报告[R].上海:上海市政交通设计研究院有限公司,2019.
- [5] 张杨宾.预制拼装混凝土桥墩抗震性能振动台试验与数值分析研究[D].上海:同济大学,2019.
- [6] 孙先锋.高性能混凝土桥墩抗震性能试验研究[D].上海:同济大学,2018.