

环形大跨变截面钢箱梁人行天桥设计

郑亮^{1,2}

(1. 西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068; 2. 陕西省林业调查规划院, 陕西 西安 710082)

摘要: 以榆林高新一中环形人行天桥为工程背景, 对天桥的方案构思、景观造型和总体布置进行了详细介绍。从梁高和钢板厚度两个因素出发, 对大跨变截面钢箱梁进行对比计算和分析, 寻找最经济的结构尺寸; 对大跨变截面钢箱梁人行天桥进行了人致振动、舒适度分析及减振控制。结果表明: 采用大跨变截面钢箱梁能够减少桥墩数量, 增加桥下通透感, 提高天桥的景观效果; 选取合适的梁高和钢板厚度等构造尺寸, 可以使天桥具有较好的经济性; 较大的桥梁跨度使人致振动问题比较显著, 采用适宜的减振控制措施可将行人舒适度控制在舒适的范围内。相应工程经验可为同类工程的设计提供借鉴。

关键词: 环形天桥; 变截面钢箱梁; 人致振动; 调谐质量阻尼器

中图分类号: U417.1⁺1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)03-0018-05

Design of Circular Long-span Variable Section Steel Box Beam Pedestrian Overpass

ZHENG Liang^{1,2}

(1. Xi'an Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710068, China; 2. Shaanxi Forestry Investigation and Planning Institute, Xi'an 710082, China)

Abstract: Taking the circular pedestrian overpass of Yulin High-tech Zone No. 1 Middle School as the background, the scheme conception, landscape design and overall layout of the overpass are introduced in detail. Starting from two factors of beam height and steel plate thickness, a comparative calculation and analysis of long-span variable section steel box beams are conducted to find the most economical structural dimensions. At the same time, the human-induced vibration and comfort analysis, and the vibration reduction control are carried out for the long-span variable section steel box beam pedestrian overpass. The results show that using the long-span variable section steel box beams can reduce the number of bridge piers, increase the clear view under the bridge, and improve the landscape effect of the overpass. Choosing the appropriate structural dimensions such as beam height and steel plate thickness can make the overpass more economical. The problem of human-induced vibration is more obvious in long bridge spans. Adopting the appropriate vibration reduction control measures can control the pedestrian comfort within a comfortable range. The summary of engineering experience can provide the reference for the design of similar projects.

Keywords: circular pedestrian overpass; variable section steel box beam; human-induced vibration; tuned mass damper

0 引言

环形天桥能够有效缓解繁忙路口的交通压力, 通过人车分流, 减少因行人穿越道路而造成的交通拥堵, 提高道路的使用效率。大跨变截面钢箱梁结构具有结构轻巧、跨越能力强、桥墩少及对道路现状影响小的优点。但较大的跨径会造成钢箱梁用钢量指标增加, 天桥经济性降低。同时, 较大的跨径会造成天桥钢箱梁结构刚度较小, 天桥基频低, 容易产生

人致振动问题。如何在设计阶段解决并完善这些问题意义重大。

1 工程概况

榆林高新一中人行天桥位于榆林市建业大道与长兴路交叉口, 属于榆林高新区的核心区域。该区域学校、商业、企事业单位密集, 人流聚集效应显著, 尤其在学校上、下学时段拥堵严重。建业大道为城市主干路, 三幅路, 红线宽 68 m, 主线双向 6 车道, 辅道双向 4 车道; 长兴路为城市支路, 单幅路, 东段红线宽 40 m 双向 8 车道, 西段红线宽 25 m, 双向 4 车道。现状道路下各类市政管线齐全, 主要位于人行

收稿日期: 2024-07-18

作者简介: 郑亮(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事道路、桥梁设计研究工作。

道和路侧绿化带下。

2 桥型方案设计

2.1 设计原则与思路

- (1)设计原则:不对道路及其附属设施的结构和功能产生不利影响,不对驾驶员和行人的安全通行产生不利影响。
- (2)设计思路:采用大跨变截面钢箱梁结构可以减少桥墩数量,降低对道路断面及地下管线的影响,另外较大的跨径和轻盈的主梁简洁大方,可以降低对驾驶员的视觉影响,见图 1。

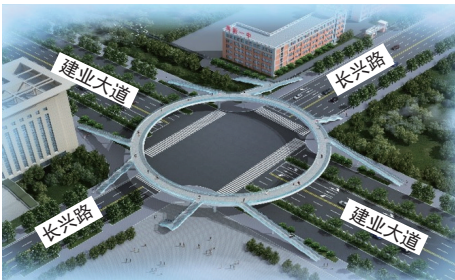


图 1 榆林高新一中人行天桥效果图

2.2 总体布置

全桥平面呈圆环形布置,上部采用连续梁结构,下部采用柱式墩结构,主桥共 8 跨,跨径布置为:56 m+11.26 m+44 m+11.26 m+56 m+11.26 m+44 m+11.26 m,主桥中心线直径 78 m,全长为 245.04 m;全桥设置 9 个梯道,其中 4 个坡度 1:2 梯道,5 个坡度 1:4 梯道,除榆林高新一中专用梯道 5 m 宽外,其余梯道均 3.1 m 宽。主桥面积为 1 225.25 m²,楼梯面积为 821.75 m²,桥梁总面积为 2 047 m²。

2.3 上、下部结构设计

主桥上部采用截面变高的钢箱结构连续梁,单箱单室结构,钢梁总宽 500 cm,跨中梁高 92 cm,支点梁高 142 cm,箱室宽 250 cm,两侧悬臂各 125 cm,横隔板间距 2 m。主桥墩柱采用直径 120 cm 的钢立柱,内部填充 C40 微膨胀混凝土,下接 1 根桩径 140 cm 的钢筋混凝土钻孔灌注桩。梯道梁采用双肋式钢梁结构,梯道墩柱采用直径 80 cm 的钢立柱,内部填充 C40 微膨胀混凝土,下接 1 根桩径 100 cm 的钢筋混凝土钻孔灌注桩。所有桥墩与钢梁之间设置板式橡胶支座,见图 2。

3 变截面钢箱梁结构优化

使用有限单元法在 MIDAS Civil2023 软件中建立天桥的有限元模型(见图 3)。



图 2 榆林高新一中人行天桥透视实景

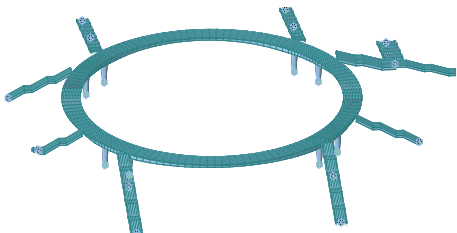


图 3 全桥有限元模型

3.1 优化方法

天桥的钢箱梁,在设计过程中一般是通过经验确定梁的截面,然后进行刚度和强度校核,再根据计算结果调整截面构造尺寸,从而得到满足刚度和强度要求的钢箱梁截面尺寸,但是得到的截面并不一定最经济且成本最低。

本文根据经验首先确定几组截面参数,其次根据这几组截面参数并考虑相同的设计安全储备系数求得跨中和支点最小梁高,然后对比这几组钢箱梁的用钢量指标选取最优的箱梁结构尺寸。

3.2 优化过程

首先对顶板厚度、底板厚度、腹板厚度 3 个截面参数分别取值,组成 4 组截面参数(见表 1),其中加劲肋均采用 14 mm 厚、150 mm 高的板肋(见图 4)。

表 1 截面参数表			单位:mm
序 号	顶板厚度 <i>a</i>	底板厚度 <i>b</i>	腹板厚度 <i>c</i>
1	12	14	12
2	14	16	14
3	16	18	16
4	18	20	18

天桥钢箱梁截面尺寸见图 4。

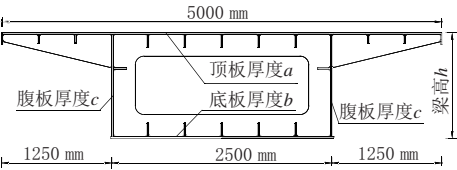


图 4 天桥钢箱梁截面尺寸

分别绘制这 4 组钢箱梁截面的抗弯截面系数与梁高关系曲线(见图 5)。

为了方便计算,采用多项式插值可得各组钢箱梁抗弯截面系数 *w* 与梁高 *h*_{弯矩} 的近似函数关系:

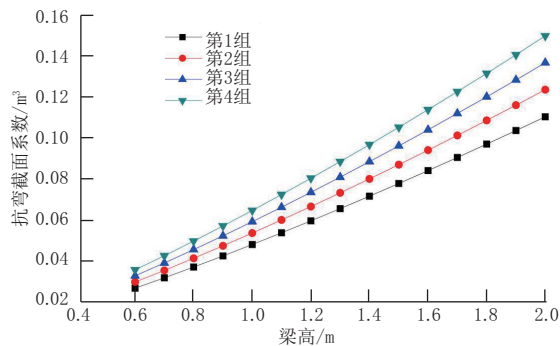


图5 钢箱梁抗弯截面系数与梁高关系曲线

$$h_{\text{弯矩}}(w)=175.551w^3-64.715w^2+22.914w+0.024 \quad (1)$$

$$h_{\text{弯矩}}(w)=122.225w^3-51.193w^2+20.419w+0.029 \quad (2)$$

$$h_{\text{弯矩}}(w)=88.590w^3-41.536w^2+18.417w+0.033 \quad (3)$$

$$h_{\text{弯矩}}(w)=66.331w^3-34.4w^2+16.774w+0.0383 \quad (4)$$

式(1)至式(4)分别为第1~4组截面的抗弯截面系数与梁高的函数关系。

根据天桥的有限元计算模型求得桥梁承载能力极限状态基本组合^[1-2]的钢箱梁内力(见图6、图7),其中钢梁自重轻,占总荷载比例小,可先根据经验取值试算,待确定梁高取值后进行复核算。

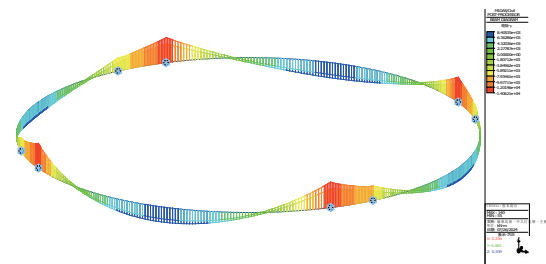


图6 基本组合钢箱梁弯矩包络图(单位:kN·m)

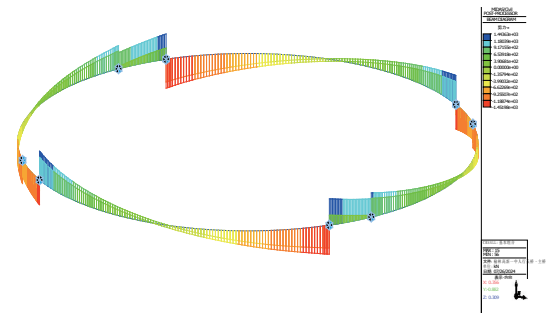


图7 基本组合钢箱梁剪力包络图(单位:kN)

钢箱梁最小截面抗弯系数 w :

$$w = \frac{M}{f_d \times k} \quad (5)$$

式中: M 为基本组合钢箱梁的弯矩; f_d 为钢材的抗拉、抗压和抗弯设计值,根据规范^[1]取值; k 为设计安全储备系数,考虑了结构重要性系数、钢箱梁受压局部稳定和剪力滞等折减。

钢箱梁最小抗剪截面高度 $h_{\text{剪力}}$:

$$h_{\text{剪力}} = \frac{F_s}{f_{vd} \times k \times \delta_{\text{腹}}} \quad (6)$$

式中: F_s 为基本组合钢箱梁的腹板剪应力; f_{vd} 为钢材的抗剪设计值,根据规范^[1]取值; $\delta_{\text{腹}}$ 为钢箱梁的截面腹板厚度总和,该天桥截面为双腹板取值 $2 \times c$ 。

最优截面高度的计算参数取值见表2。

表2 最优截面高度计算参数取值表

控制截面	基本组合截面内力		钢材强度设计值		安全系数
	弯矩 M / (kN·m)	剪力 F_s / kN	f_d / MPa	f_{vd} / MPa	
跨中	8 405	1 452	厚度≤16 mm 275	厚度≤16 mm 160	0.7
支点	14 062	153.9	厚度>16 mm 270	厚度>16 mm 155	

将承载能力极限状态基本组合^[2]钢箱梁的内力结果代入式(5)、式(6)中即可求得各控制截面的最小抗弯系数和最小抗剪截面高度,再根据图5钢箱梁抗弯截面系数与梁高关系曲线或式(1)至式(4)最终求得钢箱梁的最优梁高。计算结果见表3。

表3 各组控制截面梁高表 单位:mm

序号	跨中截面		支点截面	
	$h_{\text{弯矩}}$	$H_{\text{剪力}}$	$h_{\text{弯矩}}$	$H_{\text{剪力}}$
1	920	57	1 420	540
2	833	49	1 295	463
3	778	43	1 210	405
4	722	39	1 123	372

3.3 优化结果

根据这4组截面参数可求得天桥钢箱梁的用钢量指标(见图8)。

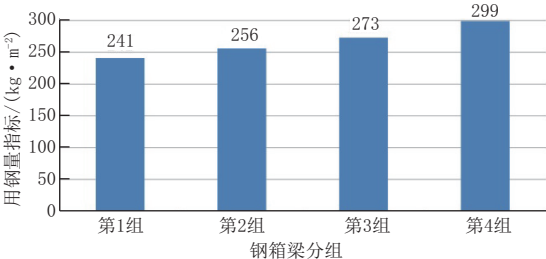


图8 各组钢箱梁用钢量指标

由图8可见,第1组截面参数的用钢量最低、经济性最好,为该项目设计采用的截面构造尺寸。

4 人致振动及舒适度分析及减振控制

天桥跨径大,在人行步频的激励下容易发生共振和行走舒适性不满足要求等问题,需要对该天桥进行人致振动评估,并提出相应的减振措施,以减小

天桥的振动。

4.1 天桥自振特性分析

根据天桥有限元模型,取主桥结构进行分析(见图3),计算得到了该桥的自振特性,表4给出了前4阶模态频率、模态质量、振型参与质量系数。

表4 人行天桥前4阶模态频率与振型参与质量系数

振型	频率/ Hz	振型描述	模态质量/t	竖向振型参与 质量系数/%
1	1.944	主跨竖向振动为主	378.64	44.75
2	2.078	副跨竖向振动为主	0.27	0.27
3	3.221	主跨竖向振动为主	2.01	2.01
4	3.366	副跨竖向振动为主	10.17	10.17

4.2 天桥减振前人致振动分析

(1)减振振型选择

据德国人行桥设计指南^[4],竖向步行力频率范围为1.25~4.6 Hz,侧向步行力频率范围为0.5~1.2 Hz。天桥自振频率在此范围内的振型为第1~4阶振型,其中第1阶振型参与质量占44.75%,因此基频为主要减振振型,限于篇幅仅列出针对基频的分析过程及结论,其余各阶频率的分析过程与此类同。

(2)人行荷载模型

根据指南^[4]自由行走的人群荷载等效为均匀分布的谐波荷载 $P(t)$ 按式(7)计算:

$$P(t)=P\times\cos(2\pi f_s t)\times\psi\times N_p \tag{7}$$

式中: P 为单人步行力1阶谐波荷载的幅值; f_s 为步行力频率,假定与处于步行力频率范围内桥梁某一阶模态的频率相等; t 为人群荷载作用时间; ψ 为折减系数; N_p 为与桥上自由行走的 N 个人的作用等效的等效行人密度。

根据指南^[4]取交通级别:十分繁忙时1阶竖向振动时自由行走的人群荷载等效为均匀分布的谐波荷载 $P(t)$ (见图9)。

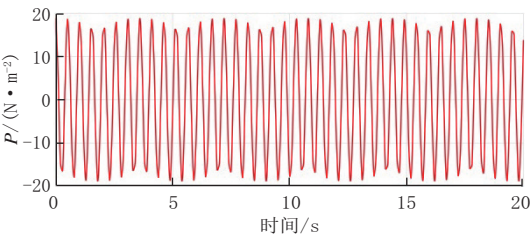


图9 人群荷载等效的谐波荷载 $P(t)$

(3)计算理论

根据式(7)计算的谐波荷载 $P(t)$,按照模态振型加载方式逐个加载到人行桥主梁上,分别计算出处于步行力频率之内的天桥各阶模态的主梁稳态竖向、侧向加速度响应峰值。

(4)人致振动响应结果

经计算可得,第1阶模态人致振动的竖向加速度峰值为0.93 m/s²(见图10)。

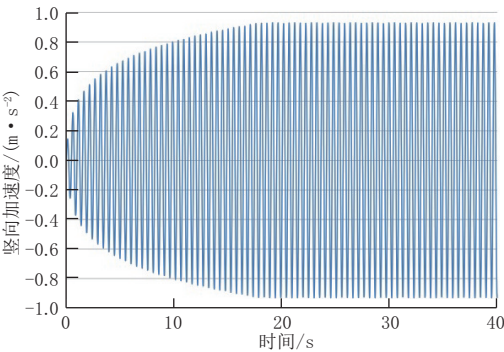


图10 天桥第1阶模态人致振动的竖向加速度响应

(5)行人舒适度评价

根据设计指南^[4],行人舒适度的标准根据人行桥的加速度来表示,见表5。

表5 行人舒适度评价标准

舒适性级别	舒适度	竖向加速度限值 $\alpha_{lim}/(m\cdot s^{-2})$	侧向加速度限值 $\alpha_{lim}/(m\cdot s^{-2})$
CL1	最好	<0.50	<0.10
CL2	中等	0.50~1.00	0.10~0.30
CL3	差	1.00~2.50	0.30~0.80
CL4	不可接受	>2.50	>0.80

人行天桥最大竖向加速度为0.93 m/s²,根据表5中的行人舒适度评价标准,行人舒适度级别为CL2,舒适度中等,需要进行减振设计。

4.3 TMD减振设计及减振效果分析

(1)人行桥减振方法

改善人行天桥的动力特性有2种普遍可采用的方法。一是增加桥梁的刚度,避开激励频率。二是提高桥梁的阻尼,减少共振响应。大跨度人行桥,无论何种结构形式,其结构基频均难以保证在步行力的影响频率范围之外,且提高结构频率往往是很不经济的。因此对于这类人行桥而言,减振设计应当成为结构设计的一部分。最普遍采用且行之有效的方法就是增加人行天桥的结构阻尼比,而调谐质量阻尼器(TMD)最常用且最有效,且能满足阻振与吸振功能的减振装置。

(2)TMD减振参数设计

根据结构动力学原理^[5],TMD的减振参数计算可按式(8)至式(10)计算:

$$M_d=\mu\times\tilde{M}_j \tag{8}$$

$$k_d=\left(2\pi f_s\times\sqrt{\frac{1}{1+\mu}}\right)^2\times m_d \tag{9}$$

$$C_d = 4\pi m_d f_s \times \sqrt{\frac{3}{8(1+\mu) \times \left(1 + \frac{\mu}{2}\right)}} \quad (10)$$

其中,各参数含义、计算参数的取值、计算结果见表6。

表6 TMD减振参数设计

参数	取值
第j阶受控振型的模态(广义)质量 $\tilde{M}_j$ /kg	378 640
TMD质量与减振模态广义质量的比值 μ ([0.01,0.05])	0.011
TMD装置的最优频率 f_{opt} /Hz	1.934
TMD装置的质量 m_d /kg	2×2 000
TMD装置的刚度 k_d /(N·m ⁻¹)	590 538.71
TMD装置的阻尼 c_d /(N·s·m ⁻¹)	59 368.47

根据以上计算结果,在天桥两个56 m主跨的跨中各设置1套TMD减振装置。

(3)减振效果分析及测试

经计算可得,减振后第1阶模态人致振动的竖向加速度峰值为0.31 m/s²(见图11)。

该桥建成后,在环境随机激振试验中实测加速度峰值为0.43 m/s²(见表7)。

人行天桥经TMD减振后的最大竖向加速度无论是理论计算值,还是实测值均小于0.5 m/s²,根据表5行人舒适度评价标准,舒适度为最好,满足设计要求。

5 结 语

环形人行天桥作为城市的风景线,不但要求具

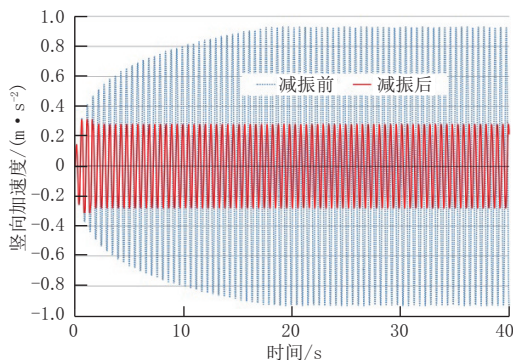


图11 安装电涡流TMD减振前后人致振动竖向加速度对比(1阶)

表7 天桥减振前后竖向加速度峰值对比 单位:m/s²

安装位置	减振前计算值	减振后计算值	实测值
北侧56 m跨跨中	0.93	0.31	0.43
南侧56 m跨跨中	0.886	0.30	0.41

有较好的景观造型,还要求具有较好的经济性和舒适性。本文通过大跨变截面钢箱梁结构实现桥梁的美感由结构本身来实现的理念,并通过对钢箱梁截面的设计优化、人致振动分析及减振设计,解决了大跨径造成的经济性和行人舒适性降低的问题,对同类工程具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [2] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
- [3] CJJ 11—2011,城市桥梁设计规范[S].
- [4] EN 03—2007,德国人行桥设计指南[S].
- [5] 陈政清.人行桥的振动与动力设计[M].北京:人民交通出版社,2009.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadfloodbridge@163.com

