

大跨异形人行拱桥舒适度分析及 TMD 减振控制

童汉元，游科华

(南昌市城市规划设计研究总院, 江西 南昌 330038)

摘要:综合分析现有规范对舒适度分析的规定要求,结合国内外规范确定了大跨异形人行拱桥舒适度分析流程。同时对桥梁结构进行了TMD减振控制分析,对比分析了阻尼器的质量、刚度及布置形式等因素对舒适度的影响,提出了阻尼器布置的合理方案,对相似工程可以提供一定参考。

关键词:人行天桥;舒适度;自振频率;动力设计

中图分类号: U441+.3

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)02-0078-05

0 引言

近年来随着城市的不断发展、社会生活水平的提高,人行天桥不仅需要满足交通需求,还要考虑景观功能和商业功能^[1]。因此,新型高强材料、新颖结构形式不断地在人行天桥设计中得到应用,人行天桥向着轻柔、大跨及异形的方向发展。这种天桥的基频较低、阻尼小,当人行频率和桥梁自振频率接近时,往往会导致桥梁产生共振现象,严重时危及结构的安全性^[2]。

目前,满足人行天桥的舒适度要求的方法主要有避开敏感频率法和限制动力响应值法两种。我国规范《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69—95)^[3]中对人行天桥的舒适度判定仅以自振频率不低于 3 Hz 为设计依据。避开敏感频率法虽然简单实用,但是已经不适用现在的人行天桥设计建设需要^[4]。国外的规范主要有英国规范 BS 5400^[5]、瑞典 Bro 2004^[6]、德国规范 EN03^[7]及欧洲规范 JRC^[8],这些规范均采用限制动力响应值法来评价人行天桥的舒适度。限制动力响应值法通过加速度判断人行桥的舒适度,更能适应目前的人行天桥建设需要。

本文根据相关国外规范,结合某大跨异形人行拱桥工程,梳理了舒适度分析的详细流程,同时结合舒适度结果对其进行 TMD 减振分析,分析了阻尼器的质量、刚度及布置形式等因素对舒适度的影响,提出了合理的阻尼器实施方案。

1 工程概况

本项目为异形人行拱桥(见图 1、图 2),横跨青山北路,桥下有地铁车站结构,主跨净空为 5.9 m,边跨净空 5.0 m,桥梁跨径为 35.115 m+75.575 m+17.804 m=128.494 m。该桥主梁为钢箱梁,主梁为变截面异形箱梁,截面宽度为 5.036~8.125 m,梁高 1.2 m;主拱为圆曲线,矢跨比为 1/4,拱高 22.5 m,主拱和主梁斜交。主拱圈为椭圆截面,高 1.6 m,宽 2.4 m。拉索在拱肋上方沿着中心点对称布置,其间距为 4 m,主梁锚固处的间距为 6 m,两侧的边拉索位置采用两对拉索,主拱锚固位置相同,主梁锚固位置相距 0.5 m。

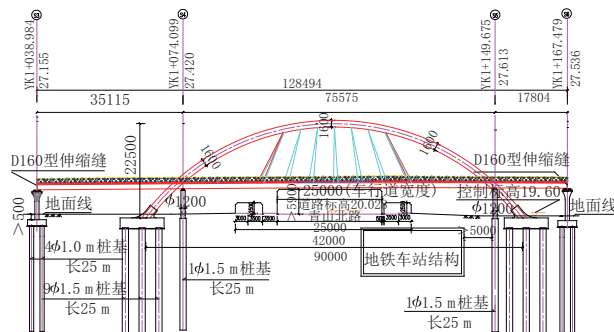


图 1 桥型立面布置示意图(单位:mm)

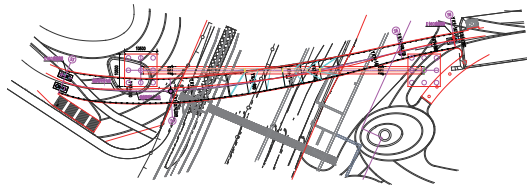


图 2 桥型平面布置示意图

桥梁下部结构采用钻孔灌注桩,主拱圈处为 9 根 $\phi 1.5\text{ m}$ 的钻孔灌注桩,承台高度为 2.5 m,宽度为 10.5 m。S3 和 S6 处桩基为 4 根 $\phi 1.0\text{ m}$ 的钻孔灌注桩,S4 和 S5 处桩基为 1 根 $\phi 1.5\text{ m}$ 的钻孔灌注桩。

收稿日期：2021-09-16

作者简介:童汉元(1994—),男,硕士,助理工程师,从事桥梁设计与研究工作。

拱肋立面、平面布置见图3、图4。上部结构横断面见图5。

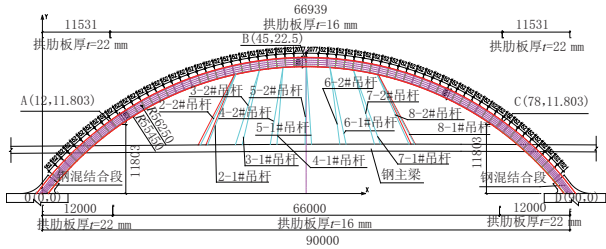


图3 拱肋立面布置示意图(单位:mm)

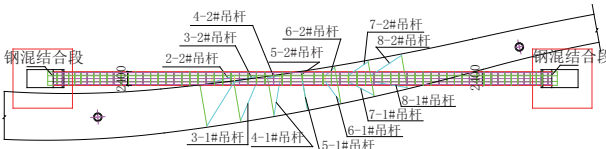


图4 拱肋平面布置示意图(单位:mm)

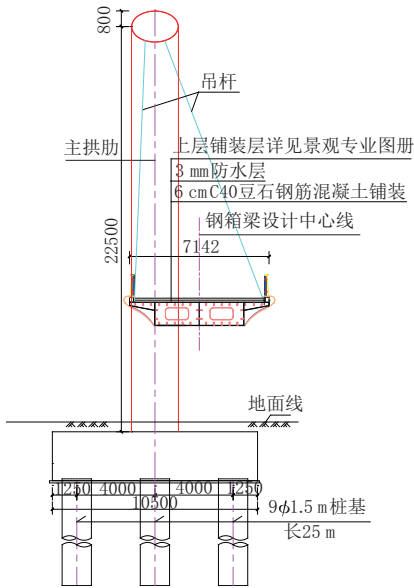


图5 上部结构横断面图(单位:mm)

2 舒适度设计分析方法

2.1 概述

鉴于我国规范对舒适度分析方法没有明确规定,本文的人行天桥舒适度分析流程主要参考德国规范 EN03^[7]中的相关规定。

分析人行天桥舒适度时,首先对结构的频率进行分析,判断是否在敏感频率范围内。当结构位于敏感范围内时,根据相应的设计工况确定桥梁的交通等级和舒适度等级。同时,根据结构的类型确定阻尼,计算结构的加速度。最后判断加速度是否满足舒适度等级的要求。具体的分析流程见图6。

2.2 舒适度设计工况的确定

在进行舒适度分析时,需要明确桥梁结构的设计工况。每个不同的设计工况,由一个交通等级和舒适度等级确定。因此,为了明确设计工况,需要先用

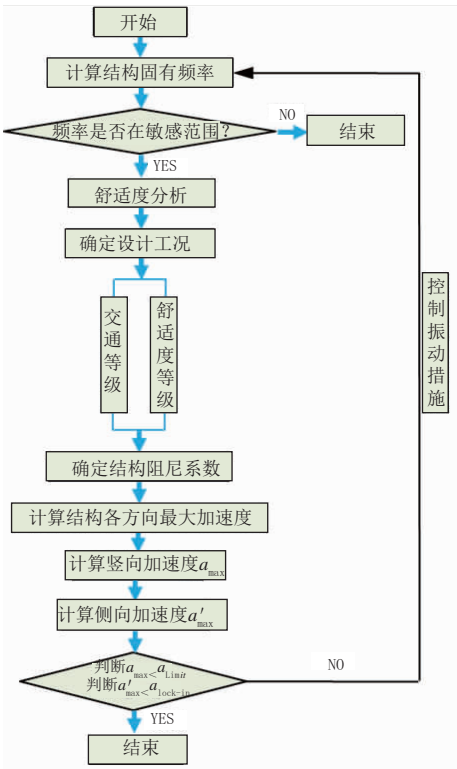


图6 舒适度分析流程图

确定交通等级和舒适度等级的划分。

德国规范 EN03 中,行人交通等级和相应的行人流量密度关系见表1。

表1 行人交通等级和人流密度

交通等级	人流密度 / (P·m ⁻²)	描述	特点
TC1	0.1	交通稀少	舒适而自由地行走,可快步行走,可自由选择步伐
TC2	0.2	交通较少	舒适而自由地行走,可快步行走,可自由选择步伐
TC3	0.5	交通较多	可以不受限制地行走,但快步行走被限制
TC4	1	交通拥挤	自由行走受到限制,快步走不再可能
TC5	1.5	非常拥挤	行走不舒适,人群拥挤,不能自由选择步伐

德国规范 EN03 中根据加速度,将结构的舒适度分成了4个标准,具体见表2。

表2 舒适度评价标准

舒适度等级	舒适度	竖向 a_{limit}	水平 a_{limit}
CL1	最好	$<0.5 \text{ m/s}^2$	$<0.1 \text{ m/s}^2$
CL2	中等	$0.5\sim1.0 \text{ m/s}^2$	$0.1\sim0.3 \text{ m/s}^2$
CL3	最小	$1.0\sim2.5 \text{ m/s}^2$	$0.3\sim0.8 \text{ m/s}^2$
CL4	不可接受	$>2.5 \text{ m/s}^2$	$>0.8 \text{ m/s}^2$

2.3 人行荷载模型

当人在天桥上行走时,就对桥梁施加了一个荷载。对于由 N 个随机行人组成的行人流模型,可以等

效为由 N 个完全同步的行人组成的行人流。在结构分析中,可以采用谐波荷载模拟人流对桥梁的作用。

人行荷载可以采用下列公式计算:

$$p(t) = P \cos(2\pi f_s t) n' \psi$$

式中: P 为单个行人以步频 f_s 行走产生力的分量; n' 为加载面积为 S 上的行人流等效人数; ψ 为落脚频率接近结构固有频率的概率折减系数。当行人密度 $d < 1.0$ 人 / m^2 时, $n' = \frac{10.8\sqrt{\xi \times n}}{S}$; $d \geq 1.0$ 人 / m^2 时, $n' = \frac{1.85\sqrt{\xi \times n}}{S}$ 。 ξ 为结构的阻尼比; n 为加载面积 S 上的行人数量, $n = S \times d$ 。

舒适度分析中,人行荷载的加载方向和振型模态方向一致。具体来说,谐波荷载的加载见图 7。

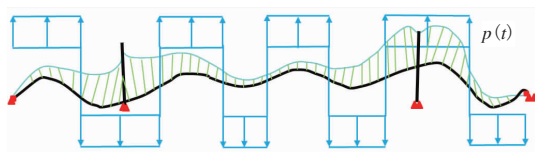


图 7 谐波荷载的加载示意图

由于行人落脚频率并不都是和结构的固有频率一致,而是一个概率分布函数。因此,需要进行相应的折减。德国规范 EN03 中对结构的竖向频率和横向频率的折减做了相应的规定,具体见图 8、图 9。

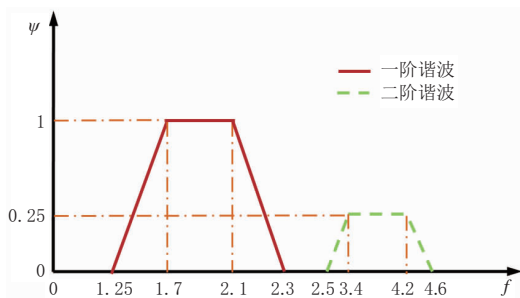


图 8 竖向折减系数

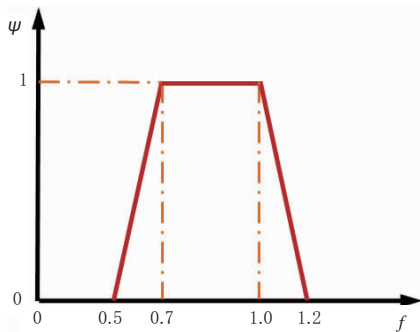


图 9 横向折减系数

由图 8、图 9 可知,德国规范中舒适验算的范围为竖向频率 1.25 ~ 2.3 Hz, 横向频率 0.5 ~ 1.2 Hz。我国规范^[3]规定小于 3 Hz 不满足舒适度要求。因此,针对上述情况,《城市人行天桥与人行地道技术规

范》(征求意见稿)(CJJ 69—201X)^[9]对竖向频率的折减系数做出了相应调整,具体见图 10。

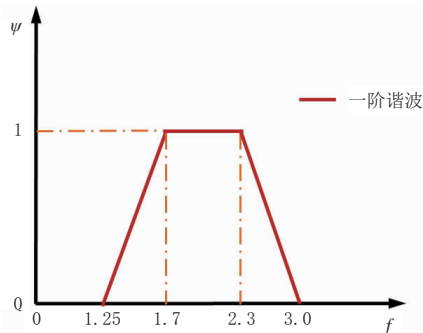


图 10 调整后的竖向折减系数

2.4 结构阻尼系数

阻尼是结构动力特性中重要的一种参数,反映了其耗能能力的大小。阻尼的确定对舒适度分析影响较大,阻尼的大小除了与结构类型、材料有关,还与振动的幅度有关。本文主要参考德国规范 EN03 和《城市人行天桥与人行地道技术规范》(征求意见稿)(CJJ 69—201X)中对常规材料的阻尼的规定,具体见表 3、表 4。

表 3 德国规范阻尼比值

结构类型	阻尼比最小值 $\xi_{\min} / \%$	阻尼比平均值 $\xi_{\text{avg}} / \%$
钢筋混凝土结构	0.8	1.3
预应力混凝土结构	0.5	1.0
钢-混组合结构	0.3	0.6
钢结构	0.2	0.4

表 4 城市人行天桥与人行地道技术规范阻尼比值

结构类型	阻尼比 / %
钢筋混凝土结构	2.0
钢-混凝土组合结构	1.0
钢结构	0.5
铝合金结构	0.9
木结构	1.0

2.5 舒适度分析结果及评价

2.5.1 有限元模型

本文采用 Midas Civil 2021 建立有限元模型。上部结构采用杆系单元模拟,拉索采用桁架单元模拟,支座采用一般支承和弹性连接模拟,桩土作用采用土弹簧模拟,具体模型见图 11。

本工程为景观天桥,连接周边诸多商场和公园,人流量大。同时,天桥作为重要的市政工程,其交通等级和舒适度等级要求均较高,本次选取分别为 TC5 的交通等级和 CL1 的舒适度等级。针对本工程为钢结构人行拱桥,两种规范的阻尼比差距不大,本

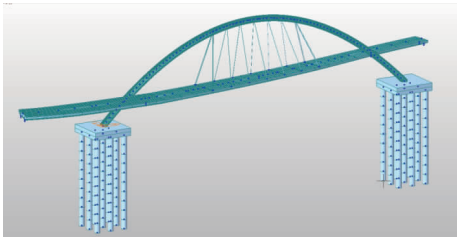


图 11 人行天桥有限元模型

文偏安全选取 0.4%。

为了更好反映结构的舒适度等级,本文沿着桥梁纵向选取了 11 个截面,分别对比分析这些断面的竖向加速度,具体截面位置见图 12。

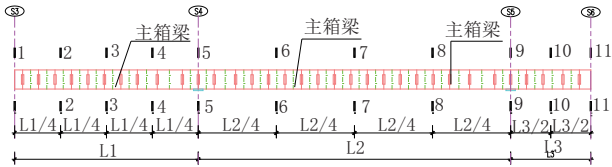


图 12 舒适度分析截面位置示意图

2.5.2 舒适度分析结果

通过计算分析,本天桥沿纵向各个截面的加速度见图 13。

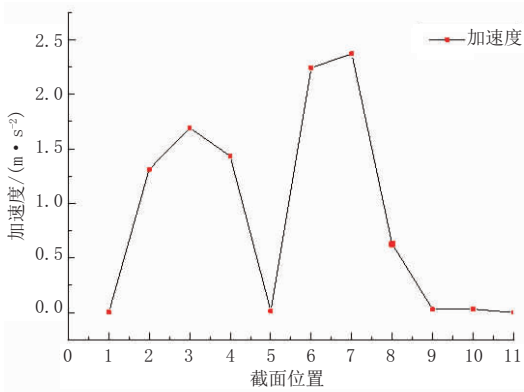


图 13 舒适度分析结果

由图 13 分析可知,S3~S4 跨和 S4~S5 跨的竖向加速度均超过 CL1 舒适度等级规定的 0.5 m/s² 加速度限值。可以看出,加速度呈现出跨中大的规律,同时跨径越大,对应的加速值越大。鉴于上述分析,本桥不满足 CL1 舒适度等级的要求,需要对其进行设置控制振动措施,使其满足舒适度要求。

3 TMD 减振设计方法

3.1 TMD 参数设计

TMD(tuned mass damper)即调频质量阻尼器,目前在结构被动减振中应用较为广泛。其减振原理是在其主结构上耦合一个和其固有频率接近的弹簧质量阻尼振动系统(附加系统),通过该系统的耗能降低结构的振动效应。

Den Hartog^[10]建立了无阻尼结构体系(主结构阻

尼 $c=0$)TMD 控制的最优参数计算公式,通过对最佳阻尼比、最佳频率比的优化,可以使主结构和附加系统谐振时,主结构的振动效应降到最低。具体公式如下:

$$\lambda_{\text{opt}} = \frac{1}{1+\mu}$$
$$\zeta_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}}$$
$$m_d = \mu m_0$$
$$\lambda_{\text{opt}} = \frac{f_{\text{opt}}}{f} = \frac{\omega_{\text{opt}}}{\omega_0}, \omega_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{k_{\text{opt}}}{m_d}}, \omega_0 = \sqrt{\frac{k_0}{m_0}}$$
$$k_{\text{opt}} = \lambda_{\text{opt}}^2 \omega_0^2 m_d$$
$$C_{\text{opt}} = 2\zeta_{\text{opt}} \omega_{\text{opt}} m_d = 2\zeta_{\text{opt}} \lambda_{\text{opt}} \omega_{\text{opt}} m_d$$

式中: μ 为 TMD 质量和主系统质量之比; m_d 为 TMD 质量; m_0 为主系统质量; λ_{opt} 为最佳频率比; ω_{opt} 为 TMD 最优自振频率; ω_0 为主系统的固有频率; k_{opt} 为最优刚度系数; ζ_{opt} 为最佳阻尼比; C_{opt} 为最优阻尼系数。

由上述公式可以得出 TMD 的最优参数。TMD 参数的设计流程见图 14。

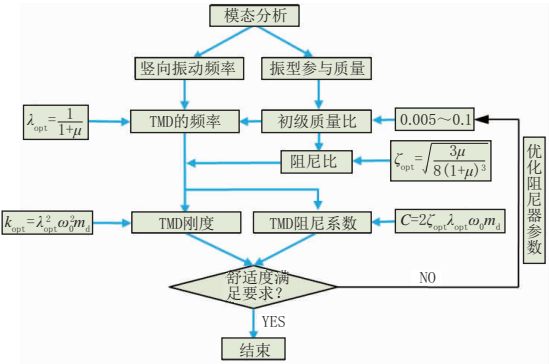


图 14 TMD 参数优化设计流程

3.2 TMD 优化设计

TMD 的数量和加载位置对结构的减振影响较大。为了确定合适的 TMD 布置形式,共设计了 7 种加载方式,具体见表 5。

表 5 TMD 加载方案

加载个数	加载位置	编号	μ
1 个 TMD	第一跨跨中	方案一	1%
	第二跨跨中	方案二	1%
	第三跨跨中	方案三	1%
2 个 TMD	第一、二跨跨中	方案一	1%
	第二、三跨跨中	方案二	1%
	第一、三跨跨中	方案三	1%
3 个 TMD	三跨跨中	方案一	1%

上述 7 种加载方式中,为了反映结构的一般规律,初始的质量比 μ 采用 1%,具体分析结果见图 15

至图 17。

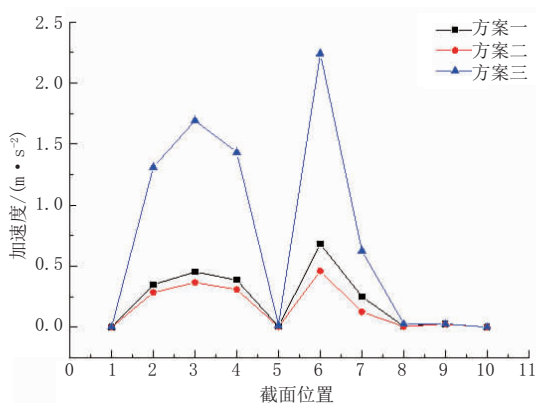


图 15 1 个 TMD 舒适度分析结果

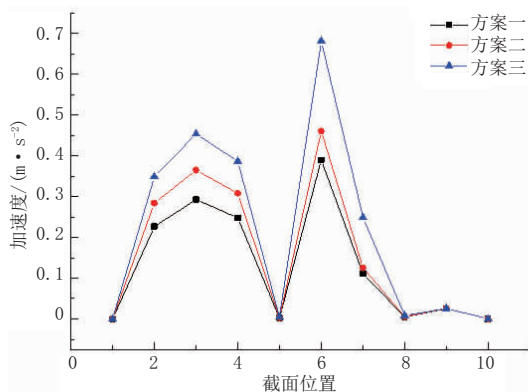


图 16 2 个 TMD 舒适度分析结果

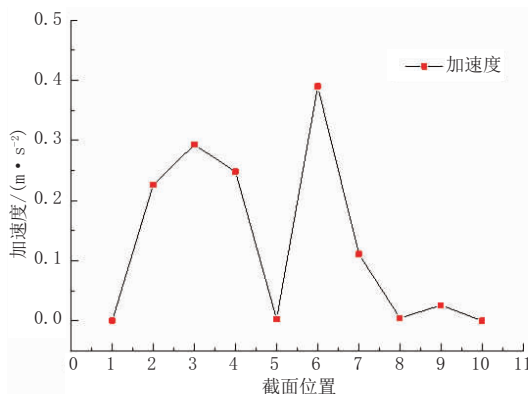


图 17 3 个 TMD 舒适度分析结果

由图 15 可知,方案二效果最好,方案一效果次之,方案三效果最差。只有方案二满足 CL1 级舒适度要求,不建议在第三跨设置阻尼器。

由图 16 可知,当采用两个阻尼器后,竖向加速度明显降低。方案一和方案二均满足 CL1 级舒适度要求,方案三效果最差。

由图 17 可知,当采用 3 个阻尼器时,结构的加速度得到了明显的抑制,最大加速度为 0.4 m/s^2 ,满足舒适度要求。

结合上文分析,考虑到经济性和施工周期等因素,本工程选取在跨中增加一个阻尼器的方案。为了选取合适的 TMD 参数,对初始的质量比 μ 做相应的

分析,结果见图 18。

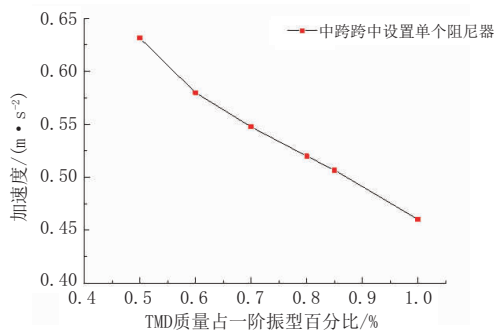


图 18 跨中最大加速度和质量比关系示意图

综合分析结果可知,跨中最大加速度和初始质量比近似呈负相关。当初始质量比 $\mu=0.85\%$ 时,最大加速度低于 0.5 m/s^2 ,满足舒适度要求。因此,本工程采用该方案设置阻尼器。

4 结 论

本文结合国内外规范对某大跨异形人行拱桥做了舒适度分析,并对其进行了 TMD 减振分析,提出了合理减振措施,得到了以下结论:

(1)我国现有规范对舒适度的要求不能满足大跨人行天桥建设的需求,需要对大跨异形人行拱桥进行舒适度分析和控制。

(2)结合德国规范和《城市人行天桥与人行地道技术规范》(征求意见稿),对人行桥的舒适度分析流程进行了总结。

(3)对大跨异形人行拱桥进行舒适度分析表明,其跨径越大,对应的加速值越大,其结构的加速度不能满足对应的舒适度等级要求,需要对其采取相应的控制振动措施。

(4)分析 TMD 的数量、加载位置等因素对减振效果的影响。结果表明,随着 TMD 数量的增加,减振效果越好。同时在跨径大的位置设置阻尼器,减振效果更好。

(5)考虑了经济性、施工周期及减振效果等因素,选取了合适的阻尼器方案,并对阻尼器的参数进行了优化设计。

参考文献:

- [1] 陈正斌.城市人行天桥美学造型简析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2007(4):120-123.
- [2] 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.
- [3] CJJ 69—1995,城市人行天桥与人行地道技术规范[S].
- [4] 乐小刚.城市人行天桥舒适性设计标准探讨[J].中国市政工程,2016(6):23-24,28.
- [5] BS 5400,Steel concrete and composite bridges[S].

(下转第 86 页)

截面假定等初等材料力学假定,单梁模型计算结果可满足工程要求。

5 施工过程

UHPC 优越的工程使用性能,得益于其各组分适当的配合比以及高温蒸汽养护,其施工要求较常规混凝土严格许多,现场浇筑条件有限,质量难以保证,所以一般为工厂预制品。

本项目 UHPC 材料配合比设计符合《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)要求,并达到设计需求的各项力学指标。UHPC 材料原材料、搅拌、运输、浇筑、养护等符合湖南省地方标准《活性粉末混凝土结构设计规程》(DBJ43/T 325—2017)相关要求。

主要施工步骤^[5]为:

(1)在工厂分节段预制 UHPC 梁,并蒸汽养护成型;
(2)节段临时拼装,在接缝处采用硅酮硫密封胶,安装预应力管道密封圈,移动待拼梁段,准确对位拼接,初张拉使环氧树脂在不小于 0.3 MPa 的压力下固化;

- (3)浇筑湿接缝,形成 π 型梁;
(4)对称张拉预应力,压浆封锚;
(5)运输、整孔吊装就位;
(6)施工桥面系及附属设施。

主要施工过程现场照片如图 8、图 9 所示。

6 结 语

超高性能混凝土(UHPC)材料具有优良的力学性能,在桥梁工程中的实践案例越来越多。本项目首次在桥梁主体结构中大规模应用了 UHPC,取得了一定成效——不到 40 天时间,18 座人行天桥主梁全部架设完毕,缩短了工期;相比原设计钢结构天桥,建安



图 8 绑扎钢筋



图 9 π 型梁成型

费节约了约 10%,建设效果良好。表明 UHPC π 型梁是一种有竞争力的人行天桥方案,特别是大规模应用时,相比钢结构有经济优势,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 章烽锋.超高性能混凝土(UHPC)在桥梁改建工程中的应用[J].广东交通科技,2019,45(5):31-34.
- [2] 陈宝春,季韬,黄卿维,等.超高性能混凝土研究综述[J].建筑科学与工程学报,2014,31(3):1-24.
- [3] 管亚萍.预制超高性能混凝土 π 形梁桥的设计与初步试验[D].湖南长沙:湖南大学,2016.
- [4] 阳琴.超高性能混凝土在城市人行天桥中的应用[J].福建建材,2020(11),71-73.
- [5] 管亚萍.RPC 的力学性能及在桥梁工程中的应用前景研究[D].重庆:重庆交通大学,2008.

(上接第 82 页)

- [6] Bro 2004, Vaagverkets allmänna tekniska beskrivning för nybyggande och förbättring av broar[S].
- [7] EN 03, Design of Footbridges Guideline[S].
- [8] JRC, Design of lightweight footbridges for human induced vibrations

[S].

- [9] CJJ 69—201X, 城市人行天桥与人行地道技术规范(征求意见稿)[S].
- [10] Hartog, De J P. Mechanical Vibrations /-4th ed[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc, 1956.