

基于TMD减振技术的景观桥 人致振动控制研究

褚盼 蒙华昌 杨仁猛 卢宏波

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006)

摘要:人行桥的舒适度现已成为景观类桥梁设计的一个重要指标。本文以国内某景区内的人行景观桥工程为例,采用Midas civil有限元分析软件建立三维有限元模型,分析了该桥的结构动力特性及人致振动响应。人致振动加速度时程响应结果表明该桥的舒适度未能满足设计和规范的要求。因此,提出了采用电涡流调谐质量阻尼器(TMD)的减振设计方案,并通过实际工程中评估了减振效果,证实方案的可行性。

关键词:结构动力特性 人致振动 电涡流调谐质量阻尼器

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2017.03.006

引言

近年来,随着国民经济的发展与科技的进步,公园及景区等休闲旅游设施的建设步伐加快。人行景观桥融合现代科技与美学为一体,是公园及景区重要组成部分。设计师在设计景观桥时,要求克服传统粗体大刚度结构的设计思路,采用轻质材料、大跨度、优美流畅的弧线、增加艺术造型等设计理念,增加景观桥的观赏性,甚至将景观桥设计成某一景区的标志性建筑。然而这类结构往往都比较轻柔,横向及竖向自振频率较低。同时,景区内往往存在大量的游客,特别是节假日旅游旺季,景观桥的行人数量集中。在这种高密度行人荷载激励的作用下,容易引起“锁定”现象^[1]并产生过大振动,进而引发恐慌,导致动力失稳。

目前,国内针对人行桥的减振设计已有较多的研究,通过改善桥梁的模态特性可以使人行桥的共振响应得到有效控制。改变人行桥的模态特性普遍采用的两种方法是提高桥梁的刚度和提高桥梁的阻尼^[1]。提高桥梁的刚度可以改变桥梁的自振频率,以避免外部激励频率。提高桥梁的阻尼可以降低人桥耦合共振响应。而对于大跨度人行桥设计即使改变结构形式,也难以使其基频避开行人步行力的影响频率范围,而且工程中提高结构频率又往往会大幅增加建筑成本。因此,对于这类大跨度人行桥最受欢迎的减振设计方案就是采用被动耗能减振技术增大结构的模态阻尼,降低人行桥的外部激励共振响应,从而提高行人的舒适度^[2-5]。TMD是最典型的被动耗能减振产

品之一,其已成功应用在多个工程结构的减振控制^[6-8]。但是传统的TMD其阻尼元件多为油阻尼器或粘滞流体阻尼器,这种阻尼器都存在漏油和不易养护等缺陷。电涡流TMD其阻尼元件采用电涡流技术,利用导体切割磁感线提供阻尼,阻尼参数线性可调,具有耐久性高、使用寿命长等特点。

本文以国内某园区景观桥为研究对象,采用Midas civil通用空间结构有限元分析软件研究结构的动力特性,识别景观桥在人群荷载作用下易发共振的所有振型,建立行人荷载模型且针对该振型进行人致振动响应分析。提出TMD减振设计方案,在景观桥跨中安装电涡流TMD减振装置,将景观桥的人致振动加速度响应降至规范规定的舒适度范围内。

1 景观桥人致振动分析

本文以国内某园区观景人行桥为研究对象。该桥为双层组合式钢管拱桥,双幅桥面,对称布置,左右幅平面位于曲线上,如图1所示。主拱为单管 $\phi 1600\text{mm}$ 钢管,内填C50微膨胀混凝土,纵轴线里面采用抛物线。主梁为组合钢箱拱结构,左右幅桥间主梁中心距为17.7m,采用哑铃式钢管横向联系梁进行连接,增强整体性,横向联系梁间距5m。主拱和主梁采用斜拉索连接,在横向联系梁位置左右对称布置一对斜拉索,全桥共设置32套拉索,拉索采用平行钢丝成品束。桥梁标准横断面:单幅桥为1.0m(外挑含栏杆)+4m(人行道)+5m(观光车道)+1.0m(外挑含栏杆)=11m,左右幅桥中心间距13m~21.249m,桥梁全长137m。



图1 园林景观桥

1.1 结构动力特性分析

本文采用适用于桥梁结构的Midas Civil通用空间结构有限元分析软件，建立全桥实体三维有限元计算模型。以梁单元模拟桥面与主拱，桁架单元模拟斜拉索。对该桥进行特征值计算，得到该桥前10阶模态结果，见表1。

表1 观景人行桥前10阶模态频率与振型描述

振型	频率 (Hz)	振型描述	模态质量 (t)
1	1.25	人行桥桥主拱扭转	347.7
2	1.60	人行桥主拱侧弯	312.1
3	1.72	人行桥主拱纵向弯曲	574.6
4	2.62	人行桥主拱侧弯	389.7
5	2.94	人行桥主梁竖向弯	309.3
6	3.14	人行桥主拱侧弯	533.2
7	3.41	人行桥扭转	691.7
8	3.59	人行桥主拱扭转	616.6
9	4.47	人行桥竖向弯	555.2
10	4.49	人行桥主拱侧弯	333.0

大量国内外研究表明，如果人行桥横向自振频率高于1.3Hz，竖向自振频率高于3Hz，可以不考虑振动问题，反之应进行动力设计。由表1可见，该观景人行桥前10阶振型主要为主拱扭转振动为主，因此设计时应提高该桥的扭转刚度。而该景观桥的第5阶振型为全桥主梁竖向弯曲振动，如图2所示，且变形最大位置为跨中。根据人群步频特性，该桥的第5阶振型频率低于3Hz，人群荷载激励下易产生共振，因此应针对该阶振型对该桥进行人致振动响应计算。

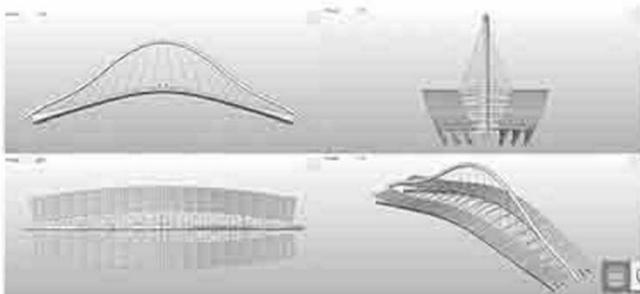


图2 景观桥第5阶振型

1.2 人致振动响应计算及舒适度评价

设计人行桥时，一般应依据当地实际情况确

定正常使用条件下桥上行人密度，目前一般认为1.5人/m²是人行桥的可容许最大人群密度。结合本景观桥实际情况，本次取该桥最不利行人密度为1.5人/m²。该桥总长137m，有效计算宽度为2×9m，得到总人数为2484人。不同人群密度自由行走时等效的同步人数不同，根据随机概率分布模拟法计算不同人群密度自由行走时等效人群数的公式如下：

当人群密度 < 1.0人/m²时：

$$N_p = 10.8 \sqrt{n \cdot \xi_i} ; \quad (1)$$

当人群密度 > 1.0人/m²时：

$$N_p = 1.85 \sqrt{n} , \quad (2)$$

N_p 为等效同步人群数， n 为总人群数， ξ_i 为第*i*阶振型阻尼比^[5]。2484位行人自由行走该景观桥时等效的完全同步人群数为： $N_p = 1.85 \sqrt{n} = N_p = 1.85 \sqrt{2484} = 92$ 人。钢结构人行桥的模态阻尼比取为2.0%。

国外早有研究人行竖向荷载模型。湖南大学陈政清对大量中国人步行荷载频率特征进行监测和总结，提出的适合中国人体质特征的荷载模型，假定单人的竖向步行力荷载为：

$$P_v = 280 \sin(2\pi f_s t) + 70 \sin(4\pi f_s t + \pi/2) \quad (3)$$

式中 f_s 为竖向步行力频率，且考虑了步行力的前两次谐波。

将景观桥有限元多自由度体系转换为单自由度体系，其运动方程：

$$M_n \ddot{q}_n + C_n \dot{q}_n + K_n q_n = P_n \quad (4)$$

M_n 、 C_n 、 K_n 、 P_n 分别为第*n*阶振型的振型质量、振型阻尼、振型刚度和振型荷载。计算得到该景观桥人致振动共振响应结果见图3。

行人舒适度是人行桥设计的一个重要指标，德国人行桥设计指南EN03(2007)采用规定行人承受的竖向及水平加速度峰值限值对人行桥行人舒适度等级做出的定义如表2所示：

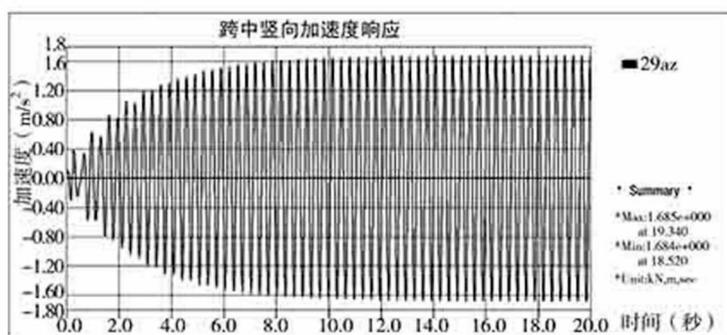


图3 景观桥人致共振竖向加速度时程响应

表2 EN03-8中行人舒适度定义 (单位: m/s²)

等级	舒适度程度	竖向	横向
1	很舒适	<0.50	<0.10
2	中度舒适	0.50~1.00	0.10~0.30
3	不舒适	1.00~2.50	0.30~0.80
4	不可忍受	>2.50	>0.80

由图3可见, 人群激励景观桥竖向共振时的最大加速度响应为1.68m/s², 已经在不舒适范围内。因此必须针对该景观桥竖向振动采取减振措施。结合该桥实际情况以及德国人行桥设计指南, 将减振目标最大加速度响应控制在舒适范围内 ($a_{\max} \leq 1.0\text{m/s}^2$)。

2 景观桥人致振动控制

TMD也被称为动力吸振器, 结构简单, 主要由质量块系统、弹簧系统和阻尼系统三大系统组成。TMD减振技术原理是指TMD减振器作为辅助系统安装在主体结构上, 将主体结构的部分振动能量转移至辅助系统, 从而达到控制主体结构振动的目的。通过调节TMD减振器的弹簧系统使TMD的固有频率与结构振动的主要频率接近。当主体结构振动, TMD减振器与主体结构发生相对运动, 即可实现将振动能量从主体结构向TMD减振器转移。TMD减振器是一种特别适合降低人行桥人致振动响应的吸能减振装置, 因此本文采用在景观桥跨中安装电涡流TMD的减振方案。电涡流TMD其阻尼系统为电涡流阻尼系统, 较传统粘滞阻尼系统的TMD具有以下优点: (1) 具有理想的线性粘滞阻尼特性; (2) 阻尼系数简单连续可调; (3) 材料均为耐久性高的金属; (4) 无附加刚度; (5) 无工作流体, 不会出现漏液问题; (6) 无接触无磨损, 不存在摩擦阻尼; (7) 在磁场中工作无需电源。

2.1 电涡流TMD减振参数设计及减振方案

TMD减振器主要的性能参数为: 有效质量、刚度、阻尼比。理论上TMD的质量越大, 其减振效果越好。但实际工程中TMD质量过大会带来一系列问题, 例如施工困难、影响结构安全等等。因此TMD的有效质量因综合多项因素选取。TMD减振是针对结构某一阶易发共振固有频率而设计的, TMD的频率 (由TMD刚度确定) 应接近结构该阶固有频率, 从而达到最优减振效果。TMD的阻尼比决定结构响应衰减的快慢。TMD减振器的刚度与阻尼比由以下公式确定:

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{1}{1+\mu}} \quad \zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu/2)}} \quad (5)$$

$$f_d = \alpha_{opt} \times f_s \quad k_d = (2\pi f_d)^2 \times m_d \quad (6)$$

α_{opt} 为TMD最优频率比, μ 为TMD质量比, ζ_{opt} 为TMD最优阻尼比, f_s 为结构固有频率, k_d 为TMD最优刚度, m_d 为TMD有效质量。

本文针对该景观桥的减振方案选取电涡流TMD减振器, 其性能参数及安装位置见表3。根据该桥第五阶振型可知, 该桥的最大位移为主梁跨中, 因此电涡流TMD减振器应安放于该景观桥的主梁跨中部位, 实际工程中可将电涡流TMD减振器安装于跨中箱梁内部, 不影响桥梁的美观。

表3 电涡流TMD减振器性能参数及安装位置

有效质量 (吨)	频率 (Hz)	阻尼比	安装位置
7.2	2.94	4.5%	主梁跨中

2.2 电涡流TMD减振效果评估

在景观桥安装电涡流TMD减振器后, 计算求得景观桥人致振动时程响应见图3。由图3可见, 安装电涡流TMD减振器后景观桥的竖向加速度响应得到很大程度的降低。景观桥的最大竖向加速度为0.68m/s², 已经位于行人舒适加速度范围内, 满足设计要求。图4、图5为电涡流TMD减振器的行程, 行程很小, 不超过3cm。

3 结论

文章通过分析景观桥的结构模态特征及计算人致振动时桥梁的最大竖向加速度响应, 提出在该桥主梁跨中箱梁内部安装电涡流调谐质量阻尼器的减振方案。根据TMD减振理论选取合适的电涡流TMD减振器力学参数, 同时验算得到安装电涡流TMD减振器后高密度人群作用下该景观桥的最大加速度响应得到大幅度降低, 达到行人过桥舒适度要求。文章提出的人行景观桥舒适度控制减振方案可为国内类似工程设计案例提供借鉴参考意义。

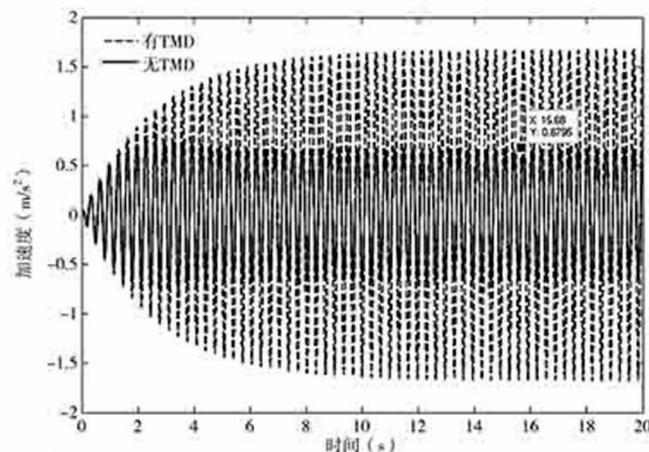


图4 景观桥减振前后竖向加速度时程响应

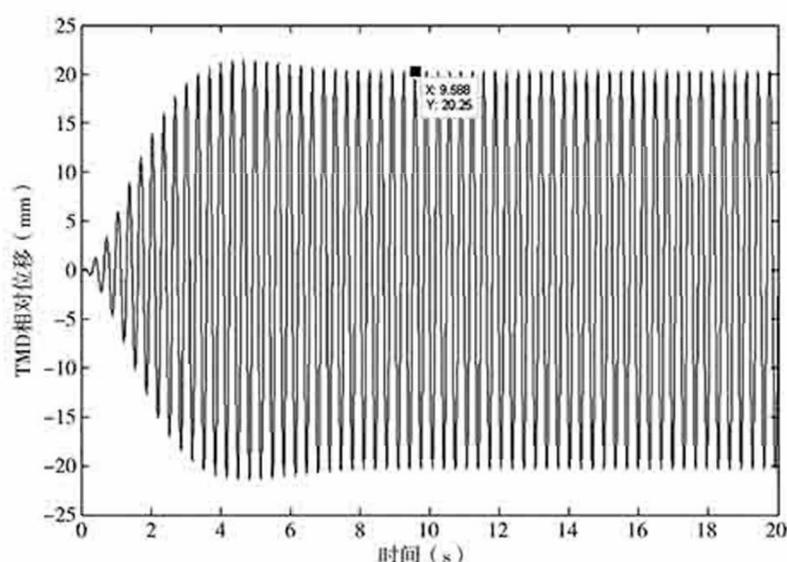


图5 景观桥ECD减振器行程

(上接第10页)

(6) RPC中的石英砂、硅灰及钢纤维成本较高,造成RPC的单位造价较普通混凝土高出许多。虽然采用RPC的桥梁结构可以通过减轻自重来降低材料的用量,耐久性的提高对全寿命周期的造价亦有降低。然而我国混凝土工业化程度较低的现实,目前依然无法提高RPC材料的经济性。若能解决RPC结构一次性投资的经济性,将会迎来其在桥梁结构中的大规模应用。

4 展望

RPC问世以来不过20来年的时间,但其作为一种性能优异的新型混凝土材料备受工程界的瞩目。中国的科研人员紧跟国际学术前沿,针对RPC开展了大量研究,在理论研究和工程实际方面均取得一定成果,为今后RPC在桥梁工程中的应用及推广奠定了坚实基础。相信随着研究的进一步深入,RPC工程应用方面的问题都将逐一克服。伴随着我国加速建设的大环境下,RPC具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] 黄建强. 公路混凝土桥梁常见病害与成因分析及处治方法[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014(1): 46-49.
 [2] RICHARD P, CHEYTEZY M. ACISp. Reactive powder concrete with high ductility and 200-800 MPa compressive strength[J]. , 1997: 507-518.
 [3] Material Property Characterization of Ultra-high Performance Concrete[R]. FHWA. Washington DC: FHWA, 2006.
 [4] WILLE K, NAAMAN A E, Parra-Montesinos G J. Ultra-high Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150MPa(22KSI): A Simpler Way[J]. ACI Materials Journal, &108(1): 34-46.
 [5] BRIAN F. FHWA Gives Superior Marks to Concrete Bridge Girder[J]. Civil Engineering Magazine, 2001,71(10): 12-13.
 [6] Association Francaise de Genie Civil. Ultra High Performance

参考文献

[1] 陈政清, 华旭刚. 人行桥的振动与动力设计[M]. 人民交通出版社, 2009.
 [2] 袁旭斌. 人行桥人致振动特性研究[D]. 同济大学, 2006.
 [3] 陈政清, 刘光栋. 人行桥的人致振动理论与动力设计[J]. 工程力学, 2009(S2):148-159.
 [4] 钱骥, 孙利民. 大跨径人行桥人致振动舒适性评估及减振措施[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(5):677-681.
 [5] 可路, 王达磊, 陈艾荣. 景区大跨径人行索桥人致振动响应研究[J]. 公路交通科技, 2013, 30(11):101-105.
 [6] 刘建华, 王惠明, 庄表中. TMD减振在大型结构上的应用[J]. 振动与冲击, 2009, 28(5):199-199.
 [7] 李晓玮, 何斌, 施卫星. TMD减振系统在人行桥结构中的应用[J]. 土木工程学报, 2013(S1):245-250.
 [8] 王立彬, 花杰, 刘康安等. 大跨度人行桥TMD减振设计[J]. 世界桥梁, 2013, 41(6):6-10.
 Fiber-reinforced Concretes-interim Recommendations[M]. Paris: Association Francaise de Genie Civil, 2002.
 [7] Japan Society of Civil Engineers. Recommendations for Design and Construction of Ultra-high Performance Fiber-reinforced Concrete Structures(DRAFT)[M]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2006.
 [8] 闫光杰, 阎贵平, 安明. 200MPa级活性粉末混凝土试验研究[J]. 铁道学报, 2004, 29(2): 116-119.
 [9] 余清河, 闫光杰. 钢筋活性粉末混凝土矩形梁抗弯性能试验研究[J]. 通部管理干部学院学报, 2009,19(2):41-45.
 [10] 郑文忠, 李莉, 卢珊珊. 钢筋活性粉末混凝土简支梁正截面受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6):125-134.
 [11] 季文玉, 丁波, 安明喆. 活性粉末混凝土T形梁抗剪试验研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(5):38-42.
 [12] 李莉, 郑文忠. 活性粉末混凝土连续梁塑性性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(2):193-199.
 [13] 闫志刚, 季文玉, 安明喆. 活性粉末混凝土T形梁承载力试验与全过程分析[J]. 北京交通大学学报, 2009, 33(1): 86-90.
 [14] 潘春风, 魏锦辉, 孙庆珍. 铁路20m预应力活性粉末混凝土T形梁整体性能研究[J]. 中原工学院学报, 2010, 21(1): 60-63.
 [15] 卢珊珊, 郑文忠. GFRP筋活性粉末混凝土梁正截面抗裂度计算方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(4):536-540.
 [16] 马远荣, 胡钧策. 活性粉末混凝土预应力叠合梁抗剪强度[J]. 公路交通科技, 2007, 24(12):85-88.
 [17] 活性粉末混凝土. GB/T31387-2015 [S].
 [18] 杜任远, 黄卿维, 陈宝春. 活性粉末混凝土桥梁应用与研究[J]. 世界桥梁, 2013, 41(1):69-74.
 [19] 周一桥, 杜亚凡. 世界第一座预制预应力活性粉末混凝土结构—舍布鲁克人行桥[J]. 国外桥梁, 2000(3):18-23.
 [20] 檀军锋. 活性粉末混凝土(RPC)在铁路预制梁工程中的应用[J]. 上海铁道科技, 2007(2):54-55.
 [21] 邵旭东, 曹君辉, 易笃韬等. 正交异性钢板-薄层RPC面基本性能研究[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2): 40-45.
 [22] 郑楷柱, 何海, 梁立农等. 佛陈大桥(扩建)正交异性钢桥面板铺装耐久性设计[C]. //中国科学技术协会、广东省人民政府. 第十七届中国科协年会——分8交通基础设施安全及耐久性论坛论文集 2015.
 [23] 我校主持研发的国内首座超高性能混凝土桥梁通过验收 [EB/OL]. <http://news.hmu.edu.cn/zhyw/2016-09-09/12572.html>, 2016-09-09/2016-09-10.