

高墩人行桥人致振动分析与控制

卢祖梁

(厦门路桥工程设计院有限公司,福建 厦门 361006)

摘要:在高落差山地环境下的高墩人行桥具有轻柔、高耸的特点,其人致振动控制问题尤为突出,相关研究较少。参考德国人行桥设计指南(RFS2-CT-2007-00033),基于有限元分析和环境振动动力测试结果,对厦门健康步道观音寺螺旋坡道进行人致振动舒适性及减振措施分析研究。结果表明:阻尼器对抑制高墩人行桥侧向振动效果较好。

关键词:人行桥;高墩;人致振动;舒适度;减振措施

中图分类号: U448.11

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)12-0112-04

0 引言

近年来,随着人们对亲近自然、休闲游憩需求的提高,集生态、健康、旅游等元素于一体的空中森林步道备受游客欢迎,建设需求逐步增加,目前国内外已建成的空中森林步道桥已达数十座^[1]。空中森林步道以高架桥梁的形式串联城市与山林,结构在翻山越岭的同时还要求轻盈化,以利于与环境协调。因此,此种结构往往具有纤细、轻柔、高耸的特点,故,人致振动问题成为控制设计的关键因素。

我国现行行业标准《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ69—1995)^[2]内容已相对陈旧,其中仅对结构竖向基频进行限制,难以适应当前人行桥结构轻盈、造型独特的发展趋势。德国人行桥设计指南(RFS2-CT-2007-00033)(以下简称“德国指南”)通过考察桥梁自振频率敏感范围并结合舒适度评价,对竖向、侧向振动特性进行综合分析,采用的方法更接近实际情况,因此,在国际上得到广泛运用。

厦门市山海健康步道建成开放后,市民反应在观音寺螺旋坡道上驻足拍照时能明显感受到结构晃动。据此,建设方组织参建各方开展研究,并由检测机构对其进行了动力试验分析。本文以此为背景,参照德国指南,通过有限元模拟分析并结合动力试验测试结果,对该结构人致振动和舒适度问题展开研究。

1 工程概况

健康步道观音寺螺旋坡道主梁采用闭合钢箱梁,跨径为14.8~18.2 m,全宽3 m,净宽2.6 m,梁高0.724 m。墩柱采用直径为0.6 m钢管混凝土圆柱,主梁外伸钢横梁与墩身刚接组成多层门式墩,桥墩最高超过25 m。基础为嵌岩桩基础,基岩位于地面以下1 m左右。实景图如图1所示,主梁断面图如图2所示。



图1 观音寺螺旋坡道实景图

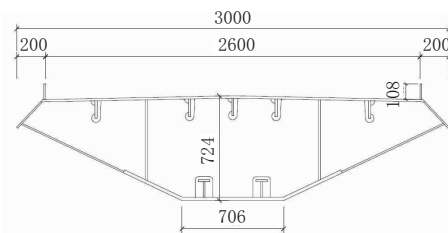


图2 主梁断面图(单位:mm)

2 分析方法

2.1 分析步骤

人行桥人致振动本质上是桥梁在行人步行简谐荷载作用下的多阶动力谐振响应问题^[3]。人致振动及舒适性评估的基本步骤如下:第一步,确定结构固有

收稿日期:2023-10-17

作者简介:卢祖梁(1989—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

频率是否落在敏感频率范围;第二步,对处于敏感频率范围的结构进行动力响应分析并进行舒适度评价;第三步,侧向同步动力失稳分析,防止出现侧向锁定;第四步,振动控制。

2.2 敏感频率

德国指南中给出敏感频率范围评价准则:侧向振动的敏感频率范围为 0.50~1.20 Hz,竖向振动的敏感频率范围为 1.25~2.30 Hz,当考虑第二阶步行力谐波分量时,竖向振动的敏感频率范围为 1.25~4.60 Hz。

首先,考察结构自振频率是否避开上述敏感频率范围,若是即可判定其人致振动问题自然满足要求;否则,进一步检算人行桥在人群步行荷载作用下的加速度响应是否满足舒适性要求。

2.3 荷载模型

根据德国指南,等效同步人群的简谐步行力为:

$$P(t)=P\times\cos(2\pi f_s t)\times n'\times\Psi\tag{1}$$

式中: P 为单人产生的荷载幅值; f_s 为步频,假设取人行桥基频; n' 为等效行人密度; Ψ 为折减系数,按图 3、图 4 取值。

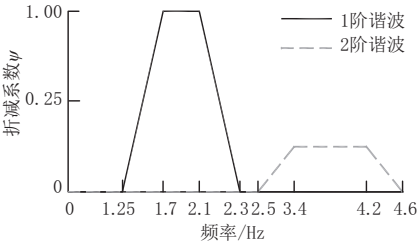


图 3 折减系数 Ψ (竖向)

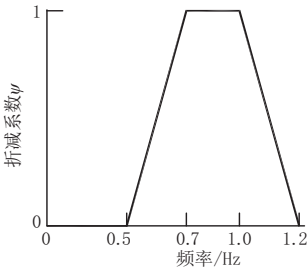


图 4 折减系数 Ψ (侧向)

加载面积为 S 的行人流等效人数 n' :

$$n'=\frac{10.8\sqrt{\zeta\times n}}{S},d<1.0\text{ 人/m}^2\tag{2}$$

$$n'=\frac{10.8\sqrt{n}}{S},d\geqslant 1.0\text{ 人/m}^2\tag{3}$$

式中: ζ 为阻尼比; S 为加载面积, m^2 ; d 为行人密度,人/ m^2 ; n 为总人数, $n=d\times S$ 。

德国指南建议,将人行桥交通等级分为 5 个级别,各等级的交通状态和人群行走特征如表 1 所列。

表 1 行人交通级别和密度

等级	行人密度 d	交通描述
TC1	15 人 /S	十分稀少
TC2	0.2 人 / m^2	稀少
TC3	0.5 人 / m^2	繁忙
TC4	1.0 人 / m^2	十分繁忙
TC5	1.5 人 / m^2	异常繁忙

注:人 /S,加载面积 S 内人数;人 / m^2 ,每 m^2 人数。

2.4 侧向锁定

锁定现象是与伦敦千禧桥^[4]类似的侧向振动,指高密度人群流动荷载状态下,行人之间相互影响使越来越多的人进入步频、相位与人行桥振动完全同步的状态,最终导致动力失稳。

侧向基频低于 1.2 Hz 的桥梁,当超过临界人数 N_L 时,加速度幅值达到一定阈值时(0.1~0.15 m/s^2)可能触发“锁定”现象^[3]。

2.5 舒适度评价指标

当通过调整频率来满足人行桥的振动舒适性要求无法做到时,最大加速度响应小于行人能够承受的最大加速度,则认为人行桥的人致振动问题满足要求。

依据德国指南所推荐的 4 种舒适度等级,本文采用的舒适度评价指标详见表 2。

表 2 舒适度评价指标表 单位: m/s^2

舒适级别	舒适度	竖向加速度限值	侧向加速度限值
CL1	最好	<0.50	<0.10
CL2	中等	0.50~1.00	0.10~0.30
CL3	最小	1.00~2.50	0.30~0.80
CL4	不能接受	>2.50	>0.80

3 动力特征分析

利用 MIDAS Civil 2022 进行建模分析,共 447 个单元,均采用梁单元,结构质量只考虑恒荷载。因基岩埋深浅,底部边界按墩底固结考虑,模型如图 5 所示。

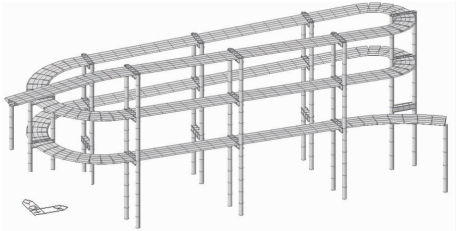


图 5 有限元计算模型

模态分析采用 Lanczos 法,通过分析,得到结构典型模态的固有频率、模态振型,见表 3 所列。侧向一

表3 主要模态特征

模态阶次	频率/Hz	模态振型
1	1.30	一阶Y向侧弯
2	1.76	一阶X向侧弯
3~9	2.19~5.19	—
10	5.34	一阶竖弯

阶频率 1.30 Hz > 1.20 Hz, 竖向一阶频率 5.34 Hz > 4.60 Hz, 均避开敏感范围。

4 环境振动动力试验结果

为进一步分析观音寺螺旋坡道的动力特征, 专业检测机构对结构进行了环境振动动力试验, 主要结果如下。

(1) 结构一阶Y向侧弯模态频率为 1.48 Hz, 一阶X向侧弯模态为 1.64 Hz, 一阶竖向模态频率大于 5 Hz。

(2) 结构各阶模态阻尼比约为 0.3%。

(3) 在交通十分繁忙状态下(交通等级TC4, $d=1.0$ 人/ m^2), 侧向加速度峰值可达 0.2 m/s^2 , 超过最优舒适度标准 0.1 m/s^2 , 舒适度等级为 CL2, 静立行人可感觉到明显的振动。

(4) 该桥一阶侧弯频率为 $1.48 \text{ Hz} > 1.2 \text{ Hz}$, 理论上不会出现侧向动力锁定。

结构动力特性试验结果与理论分析大致吻合, 避开了敏感频率, 但加速度峰值仍超过最优舒适度标准的限值。经初步分析, 原因为该桥曲折、高耸且质量轻、阻尼比低, 因模态振型耦合, 竖向步行荷载可以诱发侧向振动。一阶侧弯模态 1.48 Hz 对应步频为 3 Hz (跑步步频约 3 Hz) 左右时可能激发大幅的侧向振动。

5 减振措施

减振措施主要有频率调整法和附加阻尼法, 通过有限元模拟分析考察以上两种方法的效果。

5.1 频率调整法

由动力试验结果可知, 振感主要来自侧向振动, 改变桥墩直径考察侧向刚度变化对结构振动特性的影响, 不同墩径下的一阶侧向频率如图6所示。

通过增大墩径对侧向基频增大有限, 墩径为 1 m 时仍小于 2 Hz , 进一步增大桥墩不利于桥梁的经济性和美观性。根据振动试验的分析结果, 若结构侧向基频提高有限, 不能超过 3 Hz , 则不能有效改变桥梁的振动特性。

5.2 附加阻尼法

如图6所示, 墩径为 0.5 m 时一阶侧弯模态频率

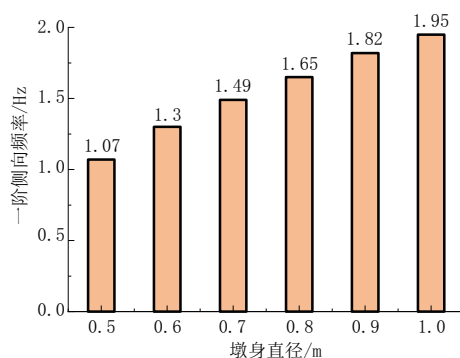


图6 不同墩径结构的一阶侧向频率

落在敏感频率范围内。为便于分析, 以其为代表, 考察添加调谐质量阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)的减振效果。

TMD 最优参数可按无阻尼结构的理论进行分析, 质量与控制模态的广义质量比在 $1\% \sim 5\%$ 之间为宜, 且宜布置在振型最大位移处^[5]。

相关参数计算公式如下:

最优频率比:

$$\alpha_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{1}{1+\mu}} \quad (4)$$

最优阻尼比:

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

TMD 质量:

$$m_d = \mu \times M_j \quad (6)$$

TMD 刚度:

$$k_d = (2\pi f_d)^2 \times m_d \quad (7)$$

阻尼系数:

$$c_d = 2m_d \times 2\pi f_d \times \zeta_{\text{opt}} \quad (8)$$

式中: μ 为质量比; f_d 为装置频率, $f_d = \alpha_{\text{opt}} \times f_s$; M_j 为振型质量。

一阶振型结构承整体侧弯, 墩顶位移最大, 各墩顶位移大致相当。据此确定 TMD 布置方案: 总质量 8 等分并分别布置于 8 个中墩墩顶横梁处。

考察总质量比为 2%、3%、4% 3 种情况, 对应单个阻尼器质量比分别为 0.25%、0.375% 和 0.05%。交通等级取 TC4, 阻尼比按试验实测值取 0.3%, 荷载参数和 TMD 参数分别见表 4、表 5。

未设置 TMD 时, 墩顶加速度峰值达 0.50 m/s^2 (见图 7), 仅能满足“最小”舒适度(CL3)要求。设置 TMD 后, 墩顶加速度峰值大幅降低, 总质量比为 2% 时加速度峰值为 0.103 m/s^2 (见图 8), 略高于 CL1 限值, 舒适度评价为“中等”(CL2); 总质量比取 3% 或 4% 时, 加速度峰值降至 0.10 m/s^2 以下 (见图 9、图

表 4 荷载参数表

参数名称	符号	数值
人群设计密度 / (人·m ⁻²)	d	1.0
步行力峰值 / N	P_0	35
步频 / Hz	f_s	1.07
等效行人密度 / (人·m ⁻²)	n'	0.067
折减系数	Ψ	0.63

表 5 TMD 布置及参数表

总质量比 / %	TMD 质量 / kg	TMD 刚度 / (N·m ⁻¹)	阻尼系数 / (N·s·m ⁻¹)
2	93.5	4 236	38
3	140.2	6 338	70
4	187	8 429	108

10),满足“最好”舒适度(CL1)要求。

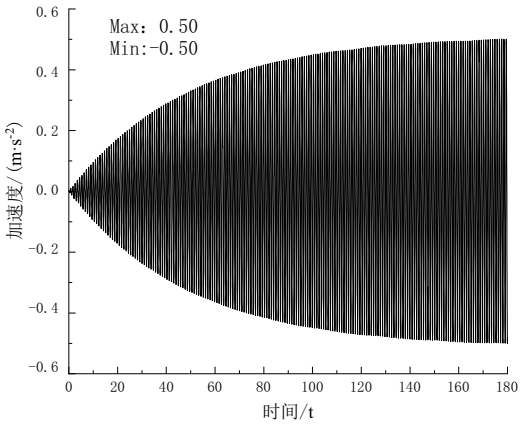


图 7 加速度时程曲线(未设置 TMD)

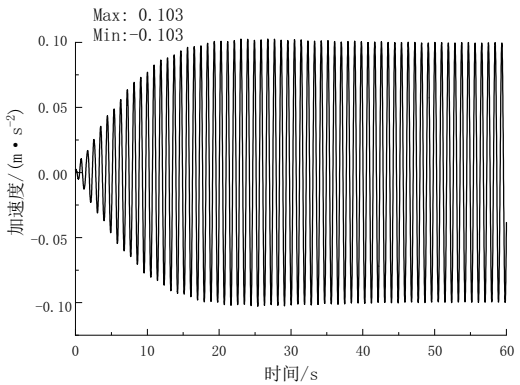


图 8 加速度时程曲线(TMD 质量比 2%)

图 7 所示加速度时程曲线经过较长时间才趋于稳定,并且维持在较大的加速度值,能量难以耗散,直观地反映出该结构质量轻、刚度小、阻尼低的特点。

如图 8 至图 10 所示,得益于 TMD 的耗能减振作用,加速度短时间达到峰值后迅速收敛稳定,结构振动得到有效抑制,且 TMD 减振能力随着质量增大而增强。对于本项目,为满足“最好”舒适度,TMD 总质量比宜取 3% 以上,取 3% 时单个装置质量仅

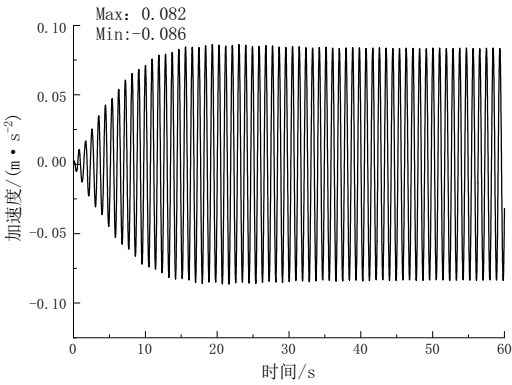


图 9 加速度时程曲线(TMD 质量比 3%)

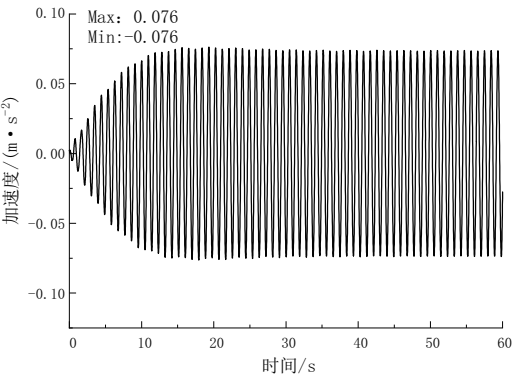


图 10 加速度时程曲线(TMD 质量比 4%)

140 kg,易于吊装施工,具备可行性。

6 结 语

本文参照德国人行桥设计指南,结合动力试验结果,对厦门健康步道观音寺螺旋坡道的人致振动和舒适度问题展开分析研究,并对减振措施效果进行评估,得出以下结论。

(1)该人行桥侧向刚度较低,结构侧向振动控制设计不容忽视。由于其线形复杂、桥墩较高,模态振型存在竖向、横向耦合,即使基频避开敏感频率,结构仍产生较明显的侧向振动。此类结构水平振动问题较复杂,有待进一步研究。

(2)通过加强桥墩对结构侧向刚度提高有限,不能有效改变结构的振动特性;采用附加阻尼的方法添加 TMD 是抑制结构振动行之有效的措施。建议类似人行桥设计时考虑增设阻尼器。

参考文献:

[1] 林月彬,柯彦.空中森林步道的发展进程与设计实践新进展[J].世界林业研究,2022,35(6):42-48.
[2] CJJ 69—95,城市人行天桥与人行地道技术规范[S].
[3] 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.
[4] Dallard P,Fitzpatrick A J,Flint A,et al. The London Millennium Footbridge[J].The Structural Engineer,2001,79(22):17-33.
[5] 李爱群.工程结构减振控制[M].北京:机械工业出版社,2007.