

深圳市燕罗人行桥人致振动分析与控制研究

倪健

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市200092]

摘要:结合国内外学者的研究以及国外现行的人行桥设计指南,以深圳市燕罗人行桥工程为背景,对大跨径人行桥的振动控制设计方法进行研究并实践。实践结果显示,调谐质量阻尼器的布置,可以有效降低大跨度人行桥人致振动响应,提高行人舒适度。

关键词:人行桥;人致振动;调谐质量阻尼器;舒适度

中图分类号:U441+3

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2022)09-0099-04

0 引言

随着我国社会发展,城市建设需求由量向质转型,许多位于城市中心的人行桥已经不仅是实现交通功能的结构物,还是一座体现城市文化、城市主题的建筑艺术品。在追求人行桥的附加景观艺术需求时,大跨纤柔、空间异形的桥梁结构越来越多。随之而来,人行桥的动力问题逐渐成为结构设计的控制因素。然而,我国《城市人行桥与人行地道技术规范》(CJJ 69—1995)仅对人行桥的竖向自振频率加以约束,要求竖向自振频率不应小于3 Hz。对于大跨纤柔、空间异形的人行桥而言,这一要求是难以满足的。在国内外学者的研究以及其他国家的现行人行桥设计指南^[1]中,仅粗略地对人行桥的竖向基频加以限制,这是存在一定问题的,因为评价桥梁动力特性时应该以人行舒适度作为指标。本文以深圳市燕罗人行桥工程为背景,采用人行舒适度作为评价指标,对大跨度人行桥人致振动控制设计方法进行研究。

1 人行桥动力设计方法

1.1 人行桥动力设计流程

人行桥动力设计的流程见图1。

1.2 频率敏感范围

结合国内外学者的研究,当桥梁固有频率落在敏感频率范围时需要进行动力响应分析,其中竖向振动敏感频率范围为1.25~3 Hz,横向振动敏感频率范围为0.5~1.2 Hz^[2]。

收稿日期:2022-01-06

作者简介:倪健(1992—),男,硕士,工程师,主要从事桥梁设计研究工作。

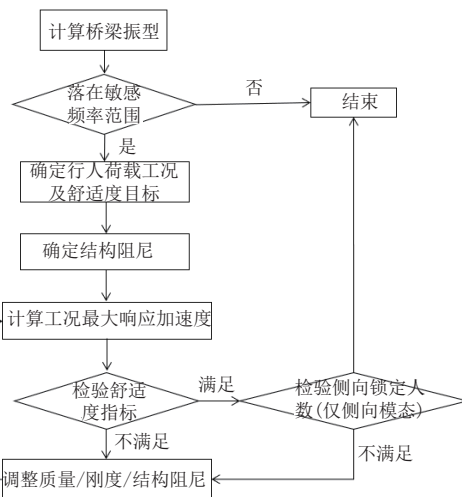


图1 人行桥动力设计流程图

1.3 行人动载模型

人的行走是连续且具有周期性的,行走时人的重心上下起伏,对地面产生周期性竖向荷载。两脚行走时交替的过程,会产生周期性的水平侧向动载。工程实践中一般采用确定性的行人动载模型 $F_p(t)$,用傅里叶级数表达,为静载和多阶简谐动载之和的形式^[2]:

$$F_p(t) = W + W \sum_{i=1}^n \alpha_i \sin(2\pi f_p t - \varphi_i) \quad (1)$$

式中: W 为平均行人重量,N; f_p 为行人步频,侧向取一半,Hz; α_i 为第*i*阶动载系数; φ_i 为第*i*阶动载相位; t 为时间。

在国外的设计指南中,一般竖向仅考虑1阶到2阶动载,横向仅考虑1阶动载。本文行人动载模型采用德国人行桥设计指南EN03,其行人动载模型 $p(t)$ 为:

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

式中: n' 表示桥上同步行走的等效人数,人/m²; P 为1阶荷载幅值(竖向取280 N,横向取35 N); f_s 为桥

梁敏感模态频率; ψ 为考虑频率范围的折减系数(见图2)。

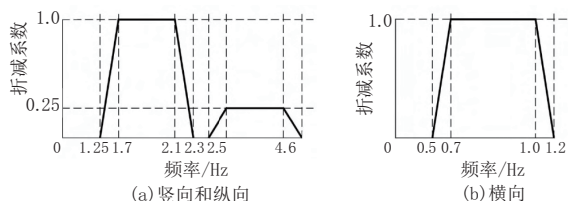


图2 折减系数

加载面积为 S 时,等效行人人数 n' 取值为:

$$n' = \frac{10.8\sqrt{\zeta n}}{S}, \quad d < 1.0$$

$$n' = \frac{1.85\sqrt{n}}{S}, \quad d \geq 1.0$$
(3)

式中: ζ 为结构阻尼比; n 表示加载面积为 S 时的行人人数; d 表示行人密度,人/ m^2 。

1.4 结构阻尼比

人行桥舒适性设计是一种使用状态性能指标,可采用表1数值用于舒适性设计时的最小阻尼比和平均阻尼比。

表1 舒适性设计结构阻尼比经验值

建造类型	最小阻尼比 /%	平均阻尼比 /%
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
木结构	1.0	1.5
悬索结构	0.7	1.0

1.5 侧向锁定

锁定现象系指当结构产生横向振动时,不同相位、不同频率的行人因相互影响而导致激励趋同,使得振动加剧的现象^[3]。

德国等的人行桥动力设计指南均采用了Dallard等的研究成果。对于频率小于1.2 Hz的横向振动,当产生较大振幅(加速度大于0.1~0.15 m/s^2)时,通过计算结构保持动力稳定的最大行人人数,检算横向振动的侧向锁定,最大行人人数 $N_{\max}$ 计算公式为:

$$N_{\max} = \frac{2\pi f M^* \zeta}{k} \quad (4)$$

式中: f 为固有频率; k 为负阻尼系数常量,300 $\text{N}\cdot\text{s/m}$; M^* 为模态质量; ζ 为结构阻尼比。

1.6 舒适度评价指标

根据国内外学者研究,舒适度指标大多采用加速度来表示,本文舒适度评价指标参考德国人行桥设计指南EN03。

行人舒适度评价标准见表2。

表2 行人舒适度评价标准

舒适度级别	舒适度	竖向峰值加速度限值 / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	侧向峰值加速度限值 / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
CL1	最好	<0.5	<0.1
CL2	中等	0.5~1.0	0.1~0.3
CL3	最小	1.0~2.5	0.3~0.8
CL4	不能接受	>2.5	>0.8

2 工程概况

燕罗人行桥位于深圳市宝安区燕罗街道,现状松罗路桥上游约630 m处,呈南北走向。主桥拱脚分别与南北两侧堤顶路接顺,主梁预留空间。远期考虑跨越沿河市政道路与企业接驳,服务于两侧工业园区。

燕罗人行桥主桥采用14 m+108 m+14 m斜拉-拱桥组合体系,桥梁总长136 m。桥梁宽度11.5 m,横断面布置为0.25 m栏杆+11 m人行道+0.25 m栏杆。上部主梁段宽度5 m,断面布置为0.25 m栏杆+4 m人行道+0.25 m栏杆。主拱矢高9.2 m,矢跨比1/11.74,采用分离式钢箱截面,截面高度1.2 m,拱脚通过PBL剪力键与混凝土拱座连接。塔为混凝土结构。塔与主索、背索共面,与竖直面夹角 12° 。主梁采用钢板梁截面,立柱为钢结构。

燕罗人行桥立面图见图3。

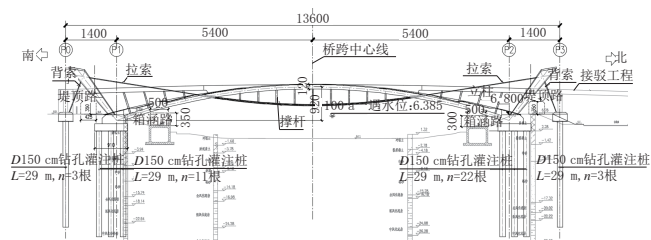


图3 燕罗人行桥立面图(单位:cm)

3 人致振动分析及控制

3.1 动力特性

根据有限元计算结果,燕罗人行桥前7阶振型(频率3 Hz以内)见图4~图10。

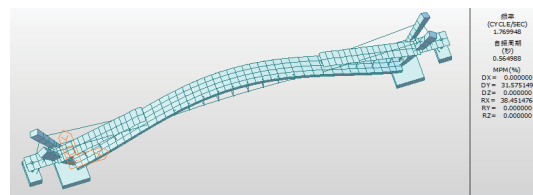


图4 第1阶:拱梁1阶侧向正对称(1.77 Hz)

根据1.2节敏感频率的范围以及1.5节侧向锁定验算前提,横向模态均未落在敏感频率范围内,即本工程无需进行侧向动力响应分析及侧向锁定检验

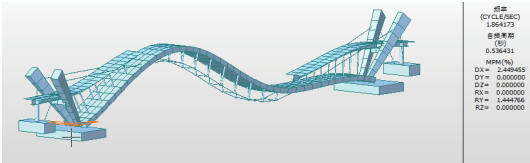


图5 第2阶:拱梁1阶竖向反对称(1.86 Hz)

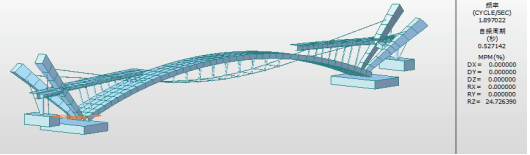


图6 第3阶:桥塔侧飘(1.90 Hz)

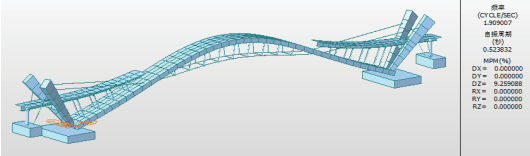


图7 第4阶:拱梁1阶竖向正对称(1.91 Hz)

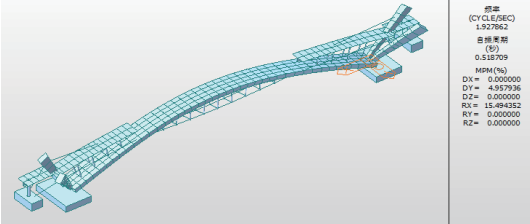


图8 第5阶:拱梁2阶侧向正对称(1.93 Hz)

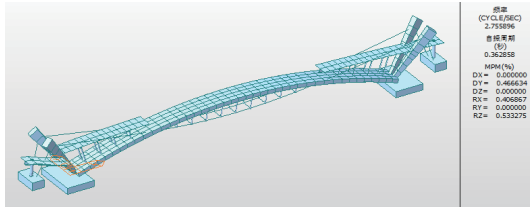


图9 第6阶:连接跨主梁侧飘(2.76 Hz)

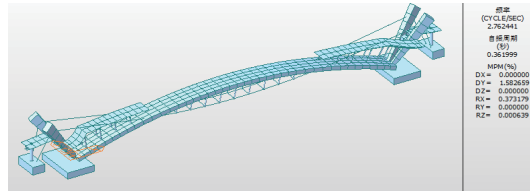


图10 第7阶:主梁局部侧飘(2.76 Hz)

分析。竖向1阶反对称模态(第2阶,频率1.86 Hz)和竖向1阶正对称模态(第4阶,频率1.91 Hz)落在了竖向敏感频率范围1.25~3 Hz范围内,以下将对此2个模态进行动力响应分析。

3.2 动力响应分析

针对竖向1阶反对称模态(下称反对称模态)和竖向1阶正对称模态(下称正对称模态)分别进行动力响应分析。

反对称模态最大响应加速度值为 3.9 m/s^2 ,位于拱跨四分点位置处(见图11);正对称模态最大响应加速度值为 4.8 m/s^2 ,位于拱跨跨中位置处(见图

12)。考虑桥梁人行设计流量大,本工程设计荷载工况为 1.5 P/m^2 (交通繁忙)的工况下,行人的舒适度能够保证满足CL2(中等)等级以上。据此标准,结构正对称模态和反对称模态动力响应舒适度等级为CL4,行人舒适度已达不能接受的程度。

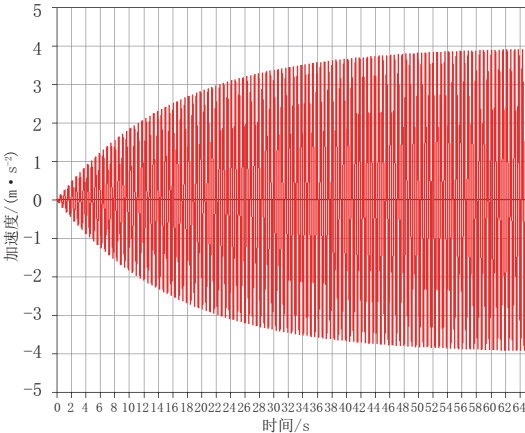


图11 反对称模态四分点加速度响应

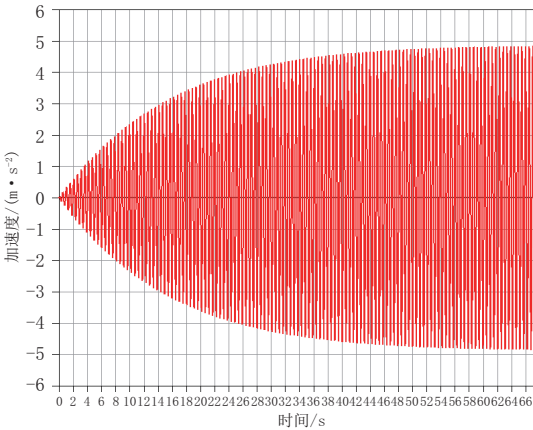


图12 正对称模态跨中加速度响应

3.3 调谐质量阻尼器(TMD)减震设计

3.3.1 TMD参数取值

TMD质量与减震模态广义质量的比值一般取0.01~0.05。考虑人行荷载模型为简谐荷载,响应目标为加速度,TMD的最优频率比 α_{opt} 计算公式见式(5),最优阻尼比 ζ_{opt} 计算公式见式(6)^[2]。

$$\alpha_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \mu}} \quad (5)$$

$$\zeta_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu/2)}} \quad (6)$$

根据式(5)、式(6),TMD布置情况及相关参数见表3。

表3 TMD布置及相关参数表

位置	TMD质量/t	TMD刚度/(kN·m ⁻¹)	TMD阻尼/(kN·s·m ⁻¹)	减震模态
跨中	7	950	24	正对称
四分点	3	411.3	5.7	反对称

考虑振动控制的效率,结合上述公式计算,TMD布置方案为:在正对称模态动力响应敏感的跨中位置设置1个7 t的TMD;在反对称模态动力响应敏感的2个四分点位置各设置1个3 t的TMD。

3.3.2 动力响应分析

加装TMD后,反对称模态最大响应加速度为 0.51 m/s^2 ,位于拱肋四分点位置,舒适度等级为CL2(见图13);正对称模态最大响应加速度为 0.45 m/s^2 ,位于拱肋跨中位置,舒适度等级为CL1(见图14)。行人舒适度等级为中等以上,满足设计目标。

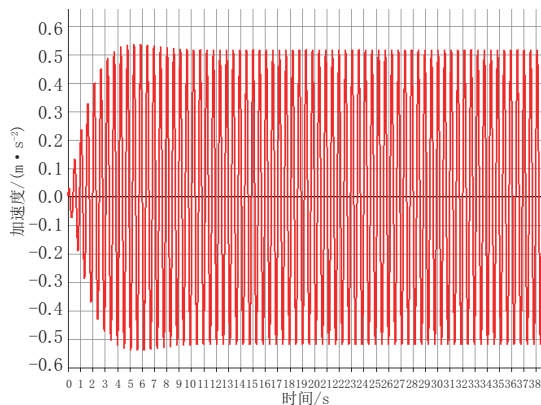


图13 反对称模态四分点加速度响应(加装TMD后)

3.3.3 TMD减震效果对比

设置TMD前后的人行桥动力响应对比见表4。

由表4可见,加装TMD后,有效控制了人行桥的动力响应,行人舒适度得到明显提高。

4 结 语

(1)国内人行桥设计规范关于人行桥动力设计内

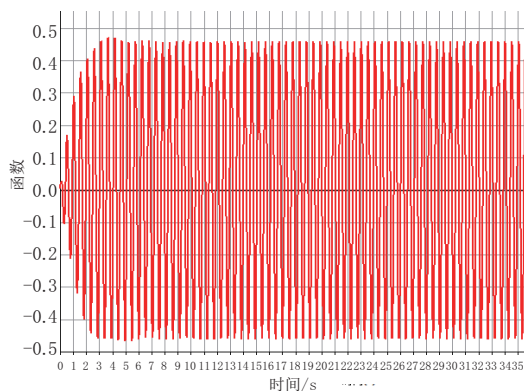


图14 正对称模态跨中加速度响应(加装TMD后)

表4 减震效果对比

敏感模态	频率/Hz	敏感位置	加速度响应/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)				加速度限值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
			原结构	舒适度	加装TMD后	舒适度	
反对称	1.86	四分点	3.9	CL4	0.51	CL2	0.68
正对称	1.91	跨中	4.8	CL4	0.45	CL1	0.69

容较为简单苛刻,不适应国内大跨度纤柔的人行桥设计需求。

(2)当大跨度人行桥固有频率落在人行敏感频率范围内时,可通过设置调谐质量阻尼器来有效降低结构的动力响应。

参考文献:

- [1] 费梁.大跨径钢结构人行桥人致振动分析与控制[D].南京:东南大学,2018.
- [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] 袁旭斌.人行桥人致振动特性研究[D].上海:同济大学,2006.

(上接第81页)

用下梁端的剪力值最大,即吊机前脚每个支撑点受力453 kN,后脚每个支撑点受力102 kN。

考虑靠近支座处横向分布系数较大,接近单板受力,取吊车荷载作用下板梁最大剪力为453 kN。

板梁抗剪承载力约为324 kN,板梁自重作用下剪力122 kN,单块板的可承受的汽车荷载剪力约为202 kN,需 $453/202=2.2$ 块板梁提供抗剪承载力。因此吊机支脚位置需设置横向分配梁做荷载分配,横向分配梁长度按不小于3.0 m设置。

3.2.3 承载能力验算结论

拆除、吊装运输过程中,既有中幅桥板梁抗弯承载能力满足要求;单片梁抗剪能力不足,吊机支脚位

置需设置横向分配梁,分配梁长度按不小于3.0 m设置。

4 结 语

海宁桥改建工程采用拆除中幅桥上部结构和盖梁,拓宽中幅桥的改建方案。拆除吊装方案的确定考虑起吊能力、工作条件、拆建结合等多方面因素,并结合既有板梁承载能力的加载效率比较结果编制方案,有效缩短项目总工期、降低工程总投资,最终顺利完成桥梁的拆建工作。开放交通一年多,各方面运营指标良好,对类似工程具有一定的借鉴意义。