

城市云道的人致振动舒适度分析

徐家慧¹, 黄永辉²

(1. 广州市城市规划勘测设计研究院, 广东 广州 510060; 2. 广州大学, 广东 广州 510060)

摘要: 综合对比了国内外规范对于人行桥通行舒适度的规定,并以某城市云道工程人行桥为研究背景,利用大型通用有限元分析软件 Midas/Civil 建立背景工程的有限元模型,计算了其在人群荷载激励下的加速度响应,最后参考德国人行桥设计规范中的舒适度评价方法对该人行桥进行舒适度评价,并提出了相关建议。

关键词: 云道;人行桥;人致振动;舒适度

中图分类号: U448.11

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)04-0081-03

1 项目简介

云道为一种高架空中步道,源于新加坡的公园连接系统(Park Connector Network),以增进绿色空间可达性为主要目标,采用高架人行桥的方式将人口密集区与公园、自然保护区、名胜古迹及其他自然空间连接在一起^[1-3]。白云山麓湖越秀山联通工程,西起中山纪念堂北门,经越秀公园到雕塑公园,东至麓湖公园西侧,通过空中步道和地面园道的打造,实现从中山纪念堂直达白云山,如图1所示。



图1 白云山麓湖越秀山联通工程位置图

在白云山麓湖越秀山联通工程中,空中步道长3.4 km,大部分为异形钢结构高架人行桥,其结构刚度小,自振频率低,人群行走的舒适度问题是设计中必须考虑的一个关键问题。现以该项目中的W2号人行桥为例,对其人致振动响应进行仿真计算,从而判断桥梁结构的舒适度。

2 国内外规范对人行桥舒适度的规定

中国人行桥的设计标准 CJJ 69—1995《城市人

行天桥与人行地道技术规范》^[4]规定人行天桥上部结构竖向自振频率应大于3 Hz,但没有对不能满足大于3 Hz频率限制要求的人行桥提供进一步的振动舒适度评价建议和方法。英国 BS15400^[5]规定,当人行桥梁在无活载作用下的竖向基频 $f_0 > 5$ Hz时,人行桥梁的振动使用性满足要求;当人行桥梁的竖向基频 f_0 在1.5~5 Hz时,要验算行人荷载作用下桥梁结构产生的最大振动加速度是否满足舒适度要求。英国规范 BS15400 采用结构振动响应峰值加速度作为人行桥的舒适度的评价指标。瑞典规范 Bro2004^[6]规定,人行桥第一阶竖向基频如小于3.5 Hz,则需要对人行桥进行振动响应分析并且评价其舒适度标准是否满足要求;如大于3.5 Hz,则说明桥梁满足动力设计要求。德国规范 EN03^[7]规定人行桥结构的竖向固有频率在 $1.25 \text{ Hz} \leq f_i \leq 4.6 \text{ Hz}$ 范围内,侧向固有频率在 $0.5 \text{ Hz} \leq f_i \leq 1.2 \text{ Hz}$ 范围内时,需要验算行人荷载作用下桥梁结构最大振动加速度是否满足舒适度要求。

3 有限元模型介绍

采用 Midas/Civil 进行有限元建模,桥墩和桥梁上部结构均采用梁单元建模。标准跨示意图如图2所示,跨度为16 m,模型如图3所示。

根据德国人行桥设计规范 EN03 进行人行舒适度评判,将人行荷载采用如下表达式表达:

$$P(t) = n' P \psi \cos(2\pi f_s t) = P_{\max} \cos(2\pi f_s t) \quad (1)$$

式中: n' 表示与桥上自由行走的N个人的效应等效的同步行走人数; P 是一阶荷载的幅值,竖向取为280 N,横向取为100 N; f_s 是关注模态的频率值,它正好在行人步频范围内,且假定它与行人步频相等;

收稿日期: 2020-07-30

作者简介: 徐家慧(1973—),女,本科,高级工程师,从事桥梁工程设计工作。

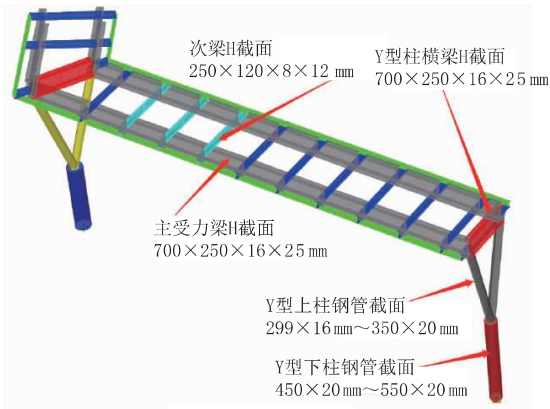


图2 16 m 标准跨结构示意图

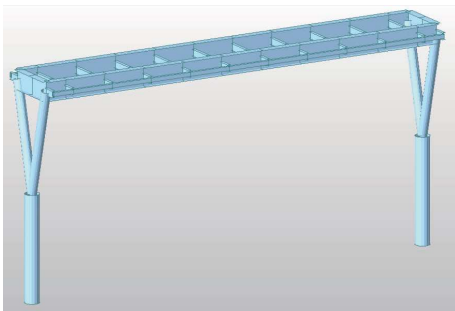


图3 有限元模型

ψ 为折减系数,这里取 1。

4 舒适度计算结果及分析

4.1 模态计算结果

该桥的前 8 阶频率和振型如表 1 所列。

表 1 前 8 阶频率计算结果表

模态数	频率/Hz	振型
1	0.718 3	1 阶横向弯曲
2	1.207 2	2 阶横向弯曲
3	1.232 1	1 阶纵向变形
4	2.331 0	1 阶主梁扭转
5	2.548 7	1 阶竖向弯曲
6	2.770 7	3 阶横向弯曲
7	3.897 4	4 阶横向弯曲
8	6.032 8	5 阶横向弯曲

根据德国人行桥设计规范 EN03,当人行桥的竖向固有频率在 $1.25 \text{ Hz} \leq f_i \leq 4.6 \text{ Hz}$ 范围内,横向固有频率在 $0.5 \text{ Hz} \leq f_i \leq 1.2 \text{ Hz}$ 范围内时,需要验算行人荷载作用下桥梁结构最大振动加速度是否满足舒适度要求。由表 1 可知,该结构的第 1 横向弯曲频率和第 1 阶竖向弯曲频率落入上述敏感频率范围,需要进行人致振动加速度响应时程分析。

4.2 竖向加速度结果

由德国规范,根据公式(1)将人群荷载等效为简谐荷载,对不同频率的振型按最不利加载方式施加

简谐荷载,如图 4,图 5 所示。竖向最大加速度时程结果如图 6 所示,横向最大加速度时程结果如图 7 所示。

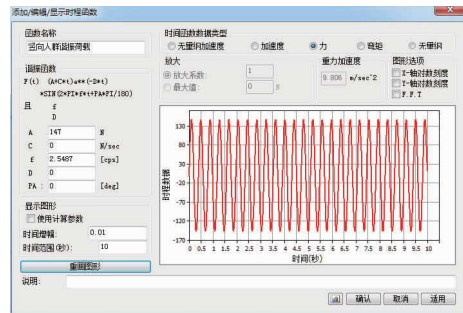


图4 1阶竖向弯曲对应最不利人群竖向荷载函数图

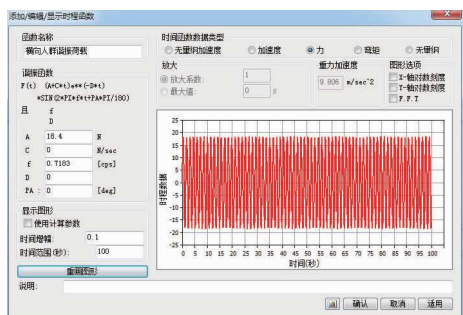


图5 1阶横向弯曲对应最不利人群竖向荷载函数图

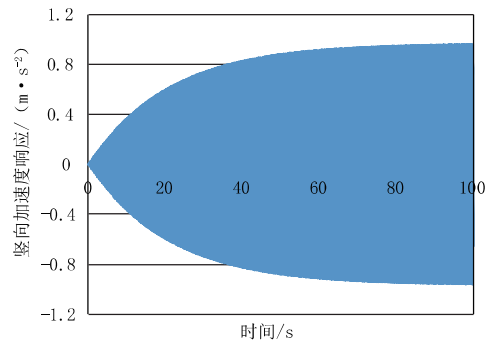


图6 竖向加速度时程响应曲线图

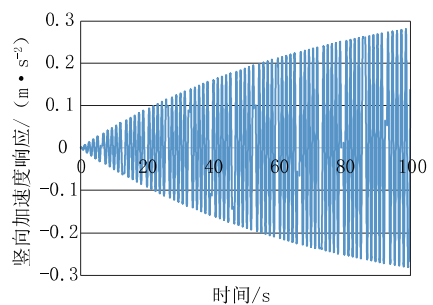


图7 横向加速度时程响应曲线图

4.3 舒适度判断

根据德国设计规范,人行桥的加速度舒适性指标如表 2 所列。

由表 2 可知,虽然该云道人行桥的竖向固有频率小于 3 Hz,不满足中国人行桥的设计标准 CJJ 69—1995《城市人行天桥与人行地道技术规范》的要求,但其人致振动加速度响应竖向最大为 0.96 m/s^2 ,

表2 舒适度指标一览表

类别	舒适度	竖向加速度限值 /(m·s ⁻²)	侧向加速度限值 /(m·s ⁻²)
CL1	最好	0.50	<0.10
CL2	中等	0.5-1.0	0.1-0.3
CL3	差	1.0-2.5	0.3-0.8
CL4	不可接受	>2.5	>0.8

横向最大为 0.28 m/s²,属于舒适度中等的等级,可不进行特殊的减振处理。

5 结论

通过对比各国相关规范对于人行桥人致振动舒适度的规定,发现德国人行桥设计 EN03 规范较为全面,值得我国借鉴。参考德国 EN03 人行桥设计规范中的舒适度评价方法,采用 Midas/Civil 实现了对某城市云道工程人行桥人致振动响应的舒适度评价。当人行天桥一阶自振频率小于自振频率限值 3 Hz

时,需要对人群荷载激励下的加速度响应进行计算,从而判断其人群舒适度等级,对于舒适度等级为“差”的情况,需要采用减振措施以满足振动舒适性要求。

参考文献:

[1] 金显贺,王昌长,王忠东,等.让“云道”成为人与自然互动的纽带 [N].中国青年报,2020-05-15(1).

[2] 王超.某大跨人行桥舒适度评估及振动控制[J].工程设计,2018(7):76-80.

[3] 施颖,张振宇,姚君,等.某异形拱人行桥通行舒适度及其控制研究 [J].浙江工业大学学报,2017(10):495-500.

[4] CJJ 69-95,城市人行天桥与人行地道技术规范[S].

[5] British Standards Institution (BSI).British standard specification for loads: BSI5400 [S].London: Steel Concrete and Composite Bridges, 1978.

[6] Svensk Byggtjänst. Allmänna tekniska beskrivning för nybygande och förbättring av broar: BR02004 [S]. Sverige: Stockholm, 2004.

[7] Human Induced Vibration of Steel Structures. Vibration design of foot bridge: EN03 [S]. Germany: Background Document, 2008.

(上接第 71 页)

5 结语

海子湖特大桥是国内首例双幅 15 跨连续梁景观桥,为全国同类型桥梁榜首。桥梁整体结构简洁、线条流畅,景观效果好,见图 6;且桥址位于楚王宫旅游景区附近,与景区环境协调性好,整体美感突出,展现了荆州城市的独特魅力。可为类似涉航道、涉湖桥梁规划和建设提供借鉴。该桥于 2019 年 9 月建成通车。



图6 海子湖特大桥建成实景图