

Comfort Analysis of Human-induced Vertical Vibration in a Footbridge

Lei Ren

Infrastructure Management Office, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083, China.

Abstract

The natural vibration frequency of the pedestrian bridge structure is low, and the frequency coincidence of people walking and running is easy to cause resonance of the structure. In recent years, structural vibration has become the focus of structural analysis and design. Based on the German and French pedestrian bridge technical guidelines, this paper evaluates the vertical vibration comfort of a steel structure pedestrian bridge. In the structural scheme, arch bridge and continuous beam bridge scheme are considered, and the bridge length is about 126m, and the maximum span of the middle span is 42m. In order to consider the vibration excitation effect of different crowd density and different step frequency on the structure, six kinds of crowd excitation loads are applied respectively. Using Midas gen carries on the finite element analysis, by comparing the footbridge vibration peak accelerations under different working conditions for comfort evaluation. Hope to provide reference for similar structure analysis in the future.

Keywords

footbridge; vertical vibration; comfort analysis

某人行天桥人致竖向震动舒适度分析

任磊

北京科技大学基建管理处, 中国 · 北京 100083

摘 要

人行天桥结构的自振频率较低, 人的走动、跑跳的频率重合很可能引发结构发生共振。近年来结构的振动问题越来越成为结构分析、设计的焦点问题。论文依据德国和法国人行桥技术指南, 对某钢结构人行桥人致竖向震动舒适度进行评估。结构方案中考虑拱桥和连续梁式桥方案, 桥长约126m, 中间跨最大跨度为42m。为了考虑不同人群密度、不同步频对结构的振动激励作用, 分别施加6种工况下的人群激励荷载。通过Midas gen对其进行有限元分析, 对比不同工况下人行天桥振动峰值加速度, 进行舒适度评价。希望能为以后类似结构分析提供参考。

关键词

人行天桥; 竖向震动; 舒适度分析

1 引言

近年来, 随着经济发展、科技进步, 建筑结构形式日益复杂, 建筑的使用者对于建筑品质的要求越来越高, 远远超越了最初的遮风挡雨的功能。随着新材料、新技术的应用, 建筑形式日益丰富, 如大型商业中内连廊纵横交错, 体育场馆悬挑看台司空见惯。对于悬挑结构、大跨度楼盖、人行天桥、连廊、钢结构的楼盖, 结构的自振频率较低, 很可能与人的走动、跑跳的频率重合, 进而引发结构发生共振。结构的振动问题越来越成为结构分析、设计的焦点问题。

舒适度问题引起广泛关注的一个工程是英国伦敦的千禧桥, 千禧桥连接泰晤士河两岸, 造价 1800 万英镑, 2000 年 6 月 10 日首次对公众开放, 当日就发生了过度的侧向人

致振动, 2 天后因桥体剧烈摇晃停止使用。据估计, 开放当天有 8 万至 10 万人通过该桥, 最高峰时人群达到 1.3~1.5 人 /m²。随后又投入 500 万英镑加装减振器, 20 个月后才重新开放。由此可见舒适度问题一旦出现, 加固改造的技术难度很大, 成本很高^[1]。如果在设计阶段就能对结构在行人作用下的反应有一个较准确的估计, 就可以避免类似的问题。

2 工程背景

某产业园跨越一条城市主干路, 为连接产业园的两个分区, 修筑一座人行桥。结构方案中考虑拱桥方案和连续梁式桥方案, 桥长约 126m, 中间跨最大跨度为 42m。针对两种方案, 对结构的舒适度进行分析。拱桥方案在 Midas Gen 中分析, 梁式桥方案在 Midas Civil 中分析。

3 舒适度评价指标

依据德国和法国规范^[2-3]的敏感频率范围(见表 1)对

【作者简介】任磊(1989-), 男, 中国陕西西安人, 硕士, 工程师, 从事工程管理、结构设计研究。

人行桥的自振频率进行评价,当人行桥的自振频率不在上述敏感频率范围时,认为人行桥的人致振动问题自然满足要求。

表 1 人行桥敏感频率范围

振动方向	敏感频率范围 (Hz)
横向	0.50~1.20
竖向	1.60~2.40

对于大多数人行桥,其竖向振动频率都位于敏感区间内。而通过调整频率来满足舒适度要求一般很难做到,故需对人行桥的动力响应进行限制以满足人行荷载舒适度的要求。论文建议采取限制最大加速的方法来考察人行桥的动力响应(见表 2),若最大加速度小于行人能够容忍的最大加速度,则认为人行桥满足舒适度要求。

表 2 人行桥的加速度舒适度指标

舒适度	竖向加速度限值 m/s^2	侧向加速度限值 m/s^2
最好	< 0.50	< 0.10
中等	0.50~1.00	0.10~0.30
差	1.00~2.50	0.30~0.80
不可容忍	> 2.50	> 0.80

4 拱桥方案的结构舒适度分析

为了得到人行桥的自振频率以及各阶振动模态,采用 MIDAS GEN 对人行桥进行了模态分析。人行桥阻尼比按 0.01 考虑。表 3 给出了人行桥的前八阶模态频率与振动模态。

表 3 人行桥前 8 阶振动模态

模态	频率 (Hz)	模态描述
1	1.64	横向
2	2.01	纵向
3	2.31	竖向
4	2.67	横向
5	2.8	横向
6	2.9	横向
7	3.02	横向
8	4.29	竖向

人行桥第一阶为横向振动(见图 1),振动特点为主跨侧弯。第一阶横向振动频率 $1.64\text{Hz} > 1.2\text{Hz}$ 不在敏感频率 $0.50\sim 1.20\text{Hz}$ 范围内。故不需进行横向振动舒适度分析。



图 1 人行桥第一阶振动模态

人行桥第三阶竖向振动(见图 2),振动特点为行人桥主跨竖弯。第一阶竖向振动频率 $1.60 < 2.31\text{Hz} < 2.40$ 恰巧

落在敏感频率 $1.60\sim 2.40\text{Hz}$ 范围内。故需要对人行桥进行竖向振动舒适度分析。

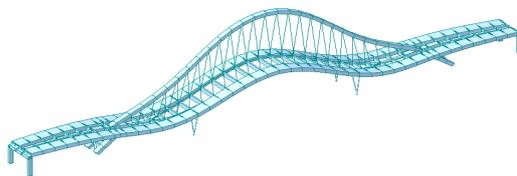


图 2 人行桥第三阶振动模态

为了考虑不同人群密度、不同步频对结构的振动激励作用,分别施加 6 种工况下的人群激励荷载,详见表 4。

表 4 加载工况列表

工况	人群密度	步频 (Hz)	单位面积等效人数 (P/m^2)	加载位置	工况描述
1	1P	2.4	—	主跨跨中	单人跨中快速走动
2	20P	1.6	—	主跨跨中	小组同步慢速走动
3	20P	2.4	—	主跨跨中	小组同步快速走动
4	$0.5P/m^2$	1.6	0.024	全桥加载	低密人群自由行走(慢速)
5	$0.5P/m^2$	2.4	0.024	全桥加载	低密人群自由行走(快速)
6	$1.5P/m^2$	1.2	0.0714	全桥加载	高密人群自由行走

工况 1: 根据竖向第一阶模态,在人行桥两侧箱梁主跨跨中节点施加激励荷载为最不利情况。故将单人固定人行荷载是置于主梁跨中,步频 f 取 2.4Hz 。

工况 2: 考虑小组同时过桥情况,小组人数取 20 人。假定这 20 人完全同步,步频取 1.6Hz 。根据竖向第一阶模态可知,将荷载施加在两侧箱梁主跨跨中节点时为最不利情况,故将激励荷载施加于跨中。

工况 3: 与工况 2 相同,但步频 f 取 2.4Hz 。

工况 4: 模拟较低密度人群在桥面流动情况,取人群密度为 $0.5P/m^2$ 。考虑到人群密度较为稀疏时行人可以根据自己的习惯步行不会受到其他人的影响,即行人之间不会发生同步的情况。故需对人群数进行等效,根据《法国人行桥技术指南》低密人群 ($d < 1P/m^2$) 自由行走时单位面积等效人数按式 (1) 计算。步频 f 取 1.6Hz ,荷载施加在两侧箱梁全部节点。

$$n = \frac{10.8\sqrt{\zeta \times N}}{S} \quad (1)$$

式中: ζ ——结构阻尼比;

S ——加载面积;

N ——加载面积为 S 时的总行人数;

n——单位面积等效人群数。

工况 5: 与工况 4 相同, 但步频 f 取 2.4Hz。

工况 6: 模拟高密度人群在桥面流动情况, 取人群密度为 1.5 人 /m²。考虑到人群密度较高 (> 1.0 人 /m²) 时行人已不能自由地按本人意愿和习惯行走, 相互同步的概率要比低密度人群大很多。故对人群数等效时与低密度人群有所不同, 根据《法国人行桥技术指南》高密人群单位面积等效人群数 ($d \geq 1P/m^2$) 根据式 (2) 计算。虽然在高密度人流下人群的步行同步性增强, 但由于人流量大人群的步频会降低, 此工况人群步频取 1.2Hz。荷载施加在两侧箱梁全部节点。

$$n = \frac{1.85\sqrt{N}}{S} \quad (2)$$

式中: ζ ——结构阻尼比;

S——加载面积;

N——加载面积为 S 时的总行人数;

n——单位面积等效人群数。

经分析, 跨中节点的加速度峰值详见表 5。

表 5 加速度最大值

工况	加速度最大值 m/s ²	加速度最大值出现位置
1	0.13	跨中
2	0.275	跨中
3	0.715	跨中
4	0.02	跨中
5	0.011	跨中
6	0.101	跨中

5 梁式桥方案的结构舒适度分析

对梁式桥方案的舒适度分析, 就不按照前序分析情况一一列举。竖向振动第一阶自振频率为 3Hz, 自振周期 0.33s。仅考察前面工况 6 的情况, 荷载加载模式详见表 6。

表 6 荷载加载模式

人群密度	步频 (Hz)	单位面积等效人数 (P/m ²)	加载位置	工况描述
1.5P/m ²	1.5	0.072	全桥加载	高密人群自由行走

经分析 30s 时长内的结构响应, 结构跨中处的加速度峰值最大, 最大值为 0.29m/s²。连续梁桥的加速度峰值分布情况如图 3 所示, 跨中节点的加速度时程曲线如图 4 所示。

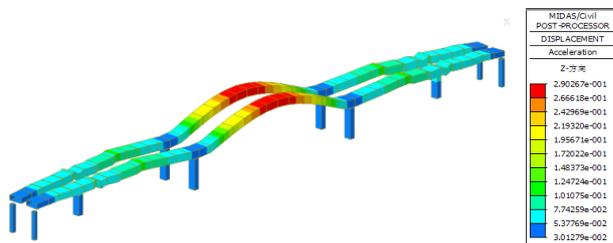


图 3 加速度峰值分布情况

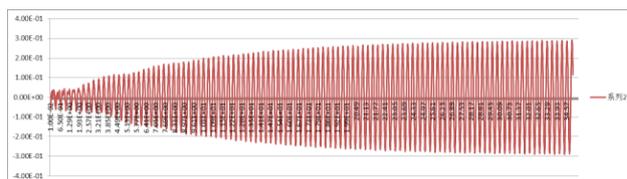


图 4 跨中节点的加速度时程曲线

由此可见, 在正常使用情况下, 拱桥方案和梁式桥方案, 结构的舒适度均能满足要求。

6 结语

① 工况 3 情况下跨中峰值加速度最大, 故对于同步频的密集人群激励应着重进行验算评估。

② 对于大多数人行桥, 其竖向振动频率都位于敏感区间内, 而通过调整频率来满足舒适度要求一般很难做到, 故还应采取限制最大加速度的方法来考察人行桥的动力响应。

③ 对于人行天桥, 出现密集人群同时通过的概率较大, 在以后的研究中应加强对密集人群不同协调度的激励荷载导致的振动反应进行分析。

参考文献

[1] 申选召. 大跨度梁板结构人致振动舒适度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

[2] EN03. Design of Footbridges-Guideline.

[3] French association of civil engineering working group: Assessment of vibration behavior of footbridge under pedestrian loading [S]. Sétra, October, 2006.