

# Research on Human-induced Load Model and Comfort Evaluation Method of 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. The paper introduces a practical analysis method for the comfort analysis of pedestrian bridges, elaborates on the quality sources, damping ratios, and load application methods of pedestrian bridges in relevant foreign standards and guidelines, and proposes a suitable comfort evaluation method for pedestrian bridges based on other national standards and guidelines. Based on this, the practical analysis process for the comfort analysis of pedestrian bridges is summarized. It is hoped that the design evaluation method in this paper can provide effective reference for the comfort time history analysis of pedestrian bridges.

## Keywords

footbridge; human-induced load model; comfort evaluation method

## 人行天桥人致荷载模型与舒适度评价方法研究

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。论文介绍了人行天桥舒适度分析的实用分析方法, 阐述了国外相关规范与指南对人行天桥质量源、阻尼比以及荷载施加方法, 依据其他国家相关规范与指南提出适宜人行桥的舒适度评价方法, 并据此总结出人行天桥舒适度分析的实用性分析流程。希望论文的设计评价方法可以为人行天桥舒适度时程分析提供有效的参考与借鉴。

## 关键词

人行天桥; 人致荷载模型; 舒适度评价方法

## 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 万~10 万人通过该桥, 最高峰时人群达到 1.3~1.5 人/m<sup>2</sup>。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<sup>[1]</sup>。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 质量源

在结构动力学问题中, 结构的质量是一个非常重要的参数, 这也是动力分析和静力分析的一个重要差别。EN03 2007《德国人行桥设计指南》<sup>[2]</sup>中指出, 计算固有频率时, 当行人的模态质量大于桥主梁模态质量的 5% 时, 建议应当考虑行人的质量。

在研究大跨度结构人致结构振动的时程分析中, 由于人员荷载是主要的可变荷载, 此时是不能忽略的。最常用、最简便的模型为把所考虑的人员按照质量来考虑。也有部分文献简便起见, 按照“恒+0.5 活”来考虑。

笔者认为, 应该根据所验算结构的实际分布的活荷载

【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。

情况(家具等)和人员情况,根据不同建筑功能,来考虑活荷载的质量贡献,分析的结果应更接近于实际情况。

对于人的体重,对于一般人群,可取70kg(0.7kN),对于特殊情况,如篮球运动员等可根据实际情况进行适当调整。

### 3 阻尼比

在研究结构舒适度问题时,结构的振动幅度较小,并不如地震作用下结构的振动那么强烈。因此在阻尼比取值上,按照结构抗振分析的阻尼比来选取,是不合适的。

中国JGJ3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》<sup>[3]</sup>对于钢筋混凝土楼盖结构和钢—混凝土楼盖结构阻尼比取值范围为0.01~0.05,室外人行天桥结构阻尼比为0.01,室内人行天桥结构阻尼比取值为0.01~0.02;商场结构阻尼比取值为0.02;对住宅、办公、教堂,无家具和非结构构件情况阻尼比可取0.02,有家具、非结构构件及带有少量可拆卸隔断情况阻尼比可取0.03,含全高填充墙情况阻尼比可取0.05。

AISC-11(Floor Vibrations Due to Human Activity)<sup>[4]</sup>中对结构阻尼比的取值与中国JGJ3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》很接近,除室内人行天桥阻尼比取值为0.01外。

由此可见,确定阻尼比时除要考虑结构形式、结构材料之外,还要考虑活荷载分布情况等因素。

### 4 荷载施加方案

时程分析方法中,可将人对结构的作用考虑为以荷载的时程曲线的方式将力施加给结构。对楼盖结构,可将楼板划分网格,将荷载施加给相应的节点上;对空间网格结构,可根据中间的节点分担的面积,将荷载分担到网架等节点上,对分析模型进行简化;对人行天桥可根据人群密度将荷载等效为单位面积荷载或集中荷载。需要指出的是,要根据实际建筑布置等因素,来确定加载的方式和位置。

#### 4.1 荷载模型

人行桥主要考虑不同人流密度下的步行和跑动荷载,荷载模型采用ISO10137规范<sup>[5]</sup>中的竖向力模型。依据陈政清《人行桥的振动与动力设计》<sup>[6]</sup>知行人步频 $f$ 通常分布在1.60~2.40Hz这样一个很窄的频带内。

人的运动对结构的作用可以表达为频域上的傅里叶级数:

$$F_v(t) = Q(1 + \sum_{n=1}^k \alpha_{n,v} \sin(2\pi nft + \phi_{n,v}))$$

式中: $\alpha_{n,v}$ ——第 $i$ 阶荷载频率的竖向动力因子;

$Q$ ——人的重量,通常取0.7kN;

$f$ ——第 $i$ 阶荷载频率;对于评估横向水平振动, $f$ 取走动或跑动情况下的一半;

$\phi_{n,v}$ ——第 $i$ 阶竖向相位角;有节奏跳动竖向相位角取0。其他行为第一阶取0,高阶取-90度。

### 4.2 荷载参数取值

不同情况下的人行荷载计算取值主要根据ISO10137规范<sup>[5]</sup>。在群体活动荷载不同人群密度下,还需根据《法国人行桥技术指南》<sup>[7]</sup>对群体活动荷载进行单位面积等效。如表1所示。

表1 ISO10137 规范步行与跑步荷载参数取值

作用	n	常见频率范围 nf (Hz)	竖向动力因子	水平向动力因子
走动	1	1.2~2.4	0.37 (f-1.0)	0.1
	2	2.4~4.8	0.1	
	3	3.6~7.2	0.06	
	4a	4.8~9.6	0.06	
	5a	6.0~12.0	0.06	
跑动	1	2.0~4.0	1.4	0.2
	2	4.0~8.0	0.4	
	3	6.0~12.0	0.1	

4、5阶不会影响到人的感知,对精密仪器需要考虑

人群的动力作用,通过调整系数考虑 $F(t)_N = F(t)C(N)$ 。 $N$ 为参与人数。

当一群人的动作不协调时,协调系数可表示为

$$C(N) = \frac{\sqrt{N}}{N}$$

根据《法国人行桥技术指南》<sup>[7]</sup>,当人群密度不同时人群步调的协调程度是不同的。故应该根据人群密度的不同对群体荷载进行等效:

低密人群自由行走时单位面积等效人数( $d < 1P/m^2$ )

$$n = \frac{10.8\sqrt{\xi \times N}}{S}$$

高密人群单位面积等效人数( $d \geq 1P/m^2$ )

$$n = \frac{1.85\sqrt{N}}{S}$$

考虑不同协调度的协调系数取值亦可参考表2,密集人流在高度协调的人行荷载下容易与人行桥的模式频率发生共振,在进行人行天桥舒适度分析时建议对密集人流高度协调的人行荷载进行模拟分析。

表2 考虑协调度的协调系数取值

评估非参与者舒适度,当 $N \geq 50$ 时 $C(N)$ 取值			
协调度	第一阶	第二阶	第三阶
高度协调(健身房、体育馆)	0.8	0.67	0.5
中等协调(体育赛事观众)	0.67	0.5	0.4
低度协调(流行音乐会观众)	0.5	0.4	0.3

1.  $C(N)$ 值仅用于正常使用极限状态

2.  $N \leq 5$ 时 $C(N) = 1$ ,  $5 \leq N \leq 50$ 时 $C(N)$ 取值线性插值

3. 考虑惊恐情况, $C(N)$ 取第一阶数值;对于其他情况(如座椅上观众的晃动),建议取值 $C(N) = 1$

4. 竖向力、有节奏的跳动—相位角取0。其他行为—第一阶取0,高阶取-90度。

## 5 舒适度评价标准

### 5.1 自振频率

结构满足最小自振频率的要求对于控制结构在人致结构振动下的振动是大有帮助的。论文依据德国和法国规范的敏感频率范围(见表3)对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。否则需要检验人行桥在人行荷载下加速度是否满足人行荷载作用下舒适度条件。

表3 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

### 5.2 峰值加速度

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4),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。否则,应该对人行桥进行减振设计。

表4 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

## 6 结构舒适度分析的适用性流程

根据前述规范及文献中的规定及范例,舒适度分析的

实用性分析流程总结如图1所示。

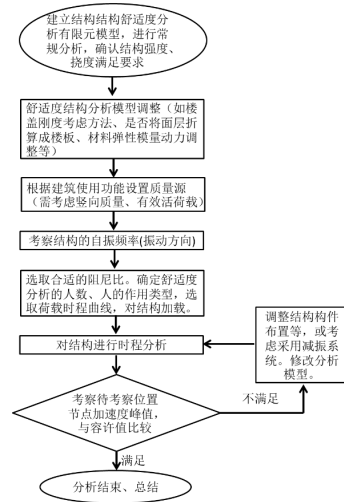


图1 舒适度实用分析流程

## 7 结语

①结构在人致作用振动时,并没有显著的耗能,处于微弱振动状态,阻尼比并不能按照抗震分析的阻尼比来选取。②人群效应影响应考虑人群动作的协调程度,根据协调性对群体荷载作用进行折减。③群体荷载作用同频激励步频越接近人行桥模态频率越容易出现舒适度问题。

### 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[S].
- [3] JGJ 3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程[M].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [4] AISC Steel Design Guide Series 11. Floor Vibrations Due to Human Activity[S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2003.
- [5] ISO10137.Bases for Design of Structures -Serviceability of Buildings and Walkways against Vibrations[S].International Organization for Standardization, 2007.
- [6] 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.
- [7] French association of civil engineering working group: Assessment of vibration behavior of footbridge under pedestrian loading[S].