

文章编号: 1000-4750(2016)10-0097-08

不同行走步速下人行桥振动舒适度量化评估

朱前坤^{1,2}, 李宏男¹, 杜永峰², 张琼²

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁, 大连 116024; 2. 兰州理工大学防震减灾研究所, 甘肃, 兰州 730050)

摘 要: 量化评估不同行走步速下人行桥的振动舒适度, 评估结果以概率的形式给出。建立了考虑步行参数个体变异性及动载因子群体变异性不同步速的时域随机行人荷载。选取 Živanović 建议在行人荷载作用下以第一阶竖向振动为主的人行桥基准模型为研究对象。施加不同步速的时域随机行人荷载到基准模型上, 得到不同步速下人行桥的加速度峰值并对结果进行修正, 得到修正后特定加速度峰值对应的概率值以及小于或等于某个特定峰值累计概率值。结果表明当步行频率与人行桥的频率一致时, 峰值达到极值并随着步行速度增大而线性增大; 慢速通过时, 振动舒适度程度最高, 快速时次之, 中速时最低。

关键词: 人行桥基准模型; 随机时域行人荷载; 振动舒适度; 量化评估; 累计概率

中图分类号: TU311.3 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.01.0066

QUANTITATIVE EVALUATION OF VIBRATION SERVICEABILITY OF PEDESTRIAN BRIDGE UNDER DIFFERENT WALKING SPEED

ZHU Qian-kun^{1,2}, LI Hong-nan¹, DU Yong-feng², ZHANG Qiong²

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: The quantitative evaluation of the vibration serviceability problem of pedestrian bridges under different walking speed is studied, and the evaluation results are developed in a probabilistic form. The walking load in different time domains under different walking speed is established, considering the individual variability of pedestrian parameter and population variability of a dynamic load factor. A first-order vertical vibration-based benchmark footbridge under the action of walking loads is selected as the research object according to the suggestion of Živanović. The acceleration peak value of a pedestrian bridge under different walking speed is obtained by applying the pedestrian load in a random time domain under different walking speed to the benchmark footbridge, and the results are corrected to attain the corresponding probability of each peak value after correction as well as the cumulative probability that is less than or equal to a specific peak value. The results show that: when the walking frequency is consistent with the frequency of a pedestrian bridge, the peak value reaches its maximal value and increases linearly with the increase of walking speed; when the pedestrian walks slowly, the vibration serviceability is the highest; when the pedestrian walks quickly, the vibration serviceability is middle; when the pedestrian walks at an intermediate speed, the vibration serviceability is the lowest.

Key words: benchmark footbridge; pedestrian load in random time domain; vibration serviceability; quantitative evaluation; cumulative probability

收稿日期: 2015-01-22; 修改日期: 2015-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508257, 51178211); 甘肃省青年科技基金项目(2013GS09576); 甘肃省建设科技攻关项目(JK2014-37)

通讯作者: 朱前坤(1981), 男, 江苏人, 副教授, 博士后, 主要从事工程减振控制研究(E-mail: zqkzj@21cn.com).

作者简介: 李宏男(1957), 男, 辽宁人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构抗震和防灾减灾研究(E-mail: hnli@dlut.edu.cn);

杜永峰(1962), 男, 甘肃人, 教授, 博士, 博导, 主要从事工程隔震减振研究(E-mail: dooyf@lut.cn);

张琼(1984), 女, 甘肃人, 讲师, 硕士, 主要从事工程减振控制研究(E-mail: 283322638@qq.com).

随着高强轻质材料的出现,工程实际需要及建筑美的要求,越来越多的人行桥向着轻柔、美观、大跨的方向发展,而使人行桥的振动频率降低,使其固有频率处在人行走的步频范围内,进而使其对人行荷载更加敏感。随之出现的桥梁振动引起行人的不舒适,成为设计中需要考虑的重要问题^[1-2]。

为了量化评估人行桥的振动舒适度,建立人行荷载的模型是关键科学问题之一^[3]。英国规范 BS5400^[4]在 20 世纪 70 年代、80 年代最早定义了单人行走荷载模型。该荷载模型假定荷载在桥面上移动,与桥面时刻保持接触,仅考虑人行桥的第一阶竖向振型,假设行走步频与桥梁的竖向振动第一阶频率相等。该周期性模型最为简单方便,目前所有的人行天桥舒适度评估几乎都采用周期性模型。实际上人行走步频不可能一直完全和桥梁的频率保持一致,采用周期性模型往往会造成过于保守的结果^[3]。Živanović 等^[5]提出的时域随机性模型将步行荷载的每个参数都看成随机变量,研究每个随机变量的统计特性,反映了步行荷载的非周期性以及个体差异性的影响,比周期性荷载更接近实际情况,但构造较为复杂,应用不便。中国建筑科学研究院潘宁^[6]等提出的伪时域随机性模型,构造较为方便,用于结构时程分析时,计算量远小于 Živanović 模型。同济大学袁旭斌^[7]等利用走步机测力台试验方法获取了步行荷载动力因子(Dynamic Load Factor)。湖南大学陈政清等^[8]采用录像技术统计分析了人群步行参数,给出了人群步行参数分布特征。同济大学陈隽等^[9]采用三维动作捕捉技术结合三向测力板对单人步行荷载进行了试验建模研究,得到荷载峰值因子、单步时程持续时间与行走步频的统计函数关系。Mullarney 等^[10]利用测力板,对来自 50 名世界各地的健康成年人开展 300 多人次慢速、正常和快速 3 种自由行走通过刚性通道的单人行走荷载试验,通过对试验数据统计分析,得到了 DLF 与步速、步长和步频的统计函数关系,结果表明 DLF 与步速的相关性要比步长和步频显著。

陈波等^[11]利用有限元计算和动力测试结合方法研究了斜拉人行桥人致振动舒适度,依据英国规范 BS 5400^[4]评价了该桥的振动舒适度状况。傅学怡等^[12]利用时程频谱结合分析方法对展望桥行人舒适度进行了分析和控制。聂建国^[13]、钱骥^[14]等也对人行桥在人致激励下的振动舒适度情况进行了研究。以上研究所得舒适度评估结果都是单一确定

值。Živanović 等^[3,15]基于所建立的随机性时域模型,研究了单人通过人行桥的振动舒适度,结果不再是单一确定值,而是给出概率值。韩建平^[16]基于概率性人行荷载模型进行了楼板结构振动分析。冯鹏等^[2]对大量的人行桥进行了实际动力测试,并同时进行了问卷调查,根据测试结果与调查结果进行分析,研究了人行天桥动力特性的规律,建立了定量描述行人实际舒适度的指标。

本文根据已有研究成果,建立了慢速、中速、快速行走时时域随机行人荷载,并施加到人行桥基准模型上,得到了以慢速、中速、快速通过人行桥时加速度峰值,每个特定加速度峰值对应的概率值以及小于或等于某个特定加速度峰值累计概率值。

1 行人荷载模型

行人荷载的竖向力分量可以展开成傅里叶级数的形式^[17]:

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

式中: f_p 表示行人步频; α_i 为行人步行荷载动力因子(Dynamic Load Factor); ϕ_i 为第 i 阶谐波波动荷载的初相位; G 表示为行人体重; i 为计算中采用的谐波项数。英国规范 BS5400-2^[4]和加拿大安大略省设计规范 OHBDC^[18]中均取 $i=1$; 相对于谐波产生的响应而言,行人自重产生的响应可忽略不计^[7],可取:

$$F(t) = G\alpha_1 \sin(2\pi f_p t) \quad (2)$$

对于 α_1 各国学者取值尽管变化很大,但在不同的国际设计规范中一般是和步频相关的取值。文献[10]通过试验测定,发现 DLF 与步速的相关性要比步长和步频显著, α_1 可取:

$$\alpha_1 = 2.5(0.111v^2 - 0.017v) \quad (3)$$

文献[9]针对中国人行走特点进行试验研究,结果显示慢速、中速和快速行走时步频的均值为 1.86 Hz、2.10 Hz 和 2.35 Hz,标准差为 0.14 Hz、0.15 Hz 和 0.23 Hz; 步速的均值为 1.25 m/s、1.49 m/s、1.72 m/s,标准差为 0.15 m/s、0.16 m/s 和 0.23 m/s。可以推算出 99.9%的慢速、中速和快速时步频分别落在 1.39 Hz~2.32 Hz、1.60 Hz~2.60 Hz 和 1.59 Hz~3.10 Hz; 99.9%的慢速、中速和快速时步速分别落在 0.75 m/s~1.74 m/s, 0.96 m/s~2.02 m/s 和 0.96 m/s~2.47 m/s。本文在建立

时域随机行人荷载模型时采用上述参数。

2 人行桥的控制方程及解析解

2.1 人行桥的控制方程

当行人以 v 速度通过人行桥时，其强迫振动微分方程为^[19]：

$$m \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^4} = \delta(x-vt)F(t) \quad (4)$$

式中： I 为横截面的惯性矩； E 为材料的弹性模量； m 为单位长度内梁的质量； c 为系统的粘滞阻尼系数； $\delta(x-vt)$ 为单位脉冲函数； $F(t)$ 为人行荷载。

引入广义坐标 $q_i(t)$ ，相应的振型函数 $\phi_i(x)$ ，则人行桥结构的动力位移 $u(x,t)$ 为：

$$u(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} q_i(t)\phi_i(x) \quad (5)$$

人行桥通常能够被较好地分离成不同频率的振动模态，每个振动模态都可以用相应的模态频率、模态质量和阻尼系数表示为一个单自由度体系。在这些模态中，通常只有第一阶模态振动是引起人行桥振动的主要原因^[20]。其振型函数可近似为半正弦函数^[3]：

$$\phi(x) = \sin \pi x / L \quad (6)$$

则：

$$M_1 = \int_0^L m \sin^2 \frac{\pi x}{L} dx = \frac{mL}{2} \quad (7)$$

$$F_1(t) = \int_0^L \phi(x)\delta(x-vt)F(t)dx = \phi(vt)F(t) = \sin \frac{\pi vt}{L} F(t) \quad (8)$$

式(4)可改写为：

$$\ddot{q}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{q}(t) + \omega_n^2q(t) = \frac{2}{mL} F(t) \sin \frac{\pi vt}{L} = \frac{1}{M} F(t) \sin \frac{\pi vt}{L} \quad (9)$$

把式(2)代入到式(9)，可得：

$$\ddot{q}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{q}(t) + \omega_n^2q(t) = \frac{G\alpha_1}{M} \sin(2\pi f_p t) \sin \frac{\pi vt}{L} \quad (10)$$

2.2 控制方程的解析解

对式(10)右边进行三角函数的积化和差，可得：

$$\ddot{q}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{q}(t) + \omega_n^2q(t) = \frac{G\alpha_1}{2M} \left[\cos\left(2\pi f_p - \frac{\pi v}{L}\right)t - \cos\left(2\pi f_p + \frac{\pi v}{L}\right)t \right] \quad (11)$$

令：

$$f_0 = \frac{G\alpha_1}{2M}, \quad \omega_1 = 2\pi f_p - \frac{\pi v}{L}, \quad \omega_2 = 2\pi f_p + \frac{\pi v}{L} \quad (12)$$

则

$$\ddot{q}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{q}(t) + \omega_n^2q(t) = f_0[\cos \omega_1 t - \cos \omega_2 t] \quad (13)$$

令：

$$\alpha_1 = \omega_n^2 - \omega_1^2, \quad \beta_1 = \alpha_1^2 + (2\xi\omega_n\omega_1)^2, \quad \alpha_2 = \omega_n^2 - \omega_2^2, \quad \beta_2 = \alpha_2^2 + (2\xi\omega_n\omega_2)^2, \quad \omega_d = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \quad (14)$$

由文献[19]，可得：

$$q_{11} = e^{-\xi\omega_n t} \left\{ \left(y_0 - \frac{f_0\alpha_1}{\beta_1} \right) \cos \omega_d t + \left[\frac{\xi\omega_n}{\omega_d} \left(y_0 - \frac{f_0\alpha_1}{\beta_1} - \frac{2\xi\omega_n\omega_1^2 f_0}{\omega_d\beta_1} + \frac{\dot{y}_0}{\omega_d} \right) \right] \sin \omega_d t \right\} \quad (15a)$$

$$q_{12} = \frac{f_0}{\beta_1} (\alpha_1 \cos \omega_1 t + 2\xi\omega_n\omega_1 \sin \omega_1 t) \quad (15b)$$

$$q_{21} = e^{-\xi\omega_n t} \left\{ \left(y_0 - \frac{f_0\alpha_2}{\beta_2} \right) \cos \omega_d t + \left[\frac{\xi\omega_n}{\omega_d} \left(y_0 - \frac{f_0\alpha_2}{\beta_2} - \frac{2\xi\omega_n\omega_2^2 f_0}{\omega_d\beta_2} + \frac{\dot{y}_0}{\omega_d} \right) \right] \sin \omega_d t \right\} \quad (15c)$$

$$q_{22} = \frac{f_0}{\beta_2} (\alpha_2 \cos \omega_2 t + 2\xi\omega_n\omega_2 \sin \omega_2 t) \quad (15d)$$

$$q = q_{11} + q_{12} + q_{21} + q_{22} \quad (16)$$

2.3 解析解的修正

在式(9)，人行荷载假定为正弦荷载，所得到的模态加速度响应 $\ddot{q}_{\sin}(t)$ 。事实上不仅不同的人的行走特性不同，同一个人在行进中的每一步其实也有细微的区别，行人双腿交叉行进过程是一个窄带随机过程。为了简化在实际人行荷载作用下响应 $\ddot{q}_c(t)$ 计算，定义实际荷载作用下和简化人行荷载作用下响应峰值比 $\ddot{Q}_c / \ddot{Q}_{\sin} = c$ ，文献[21,3]通过大量的试验研究，结果表明 c 的概率密度分布和伽马分布最为接近：

$$f(x) = \frac{x^{a-1} e^{-x/b}}{b^a \int_0^{\infty} x^{a-1} e^{-x} dx} \quad (17)$$

式中： x 代表 c 值； a 、 b 是和频率比及阻尼比相关的参数，如表1和表2所示。

表 1 伽马分布的参数 a
Table 1 Parameter a of gamma distributions

| 频率比 f_s/f_n | 阻尼比 ζ | | | | | | | | | |
|---------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.5 | 2.0 |
| 0.80 | 12.227 | 12.622 | 13.001 | 13.587 | 14.454 | 15.166 | 16.470 | 17.353 | 19.560 | 22.013 |
| 0.85 | 12.646 | 13.735 | 14.510 | 16.177 | 17.706 | 19.067 | 21.345 | 23.200 | 26.629 | 29.289 |
| 0.90 | 10.353 | 12.251 | 14.350 | 16.197 | 17.846 | 19.273 | 21.543 | 23.444 | 27.443 | 31.284 |
| 0.95 | 13.967 | 16.214 | 17.874 | 19.251 | 20.478 | 20.701 | 20.170 | 22.874 | 30.449 | 39.159 |
| 1.00 | 31.431 | 41.659 | 52.926 | 65.341 | 78.930 | 93.821 | 126.46 | 161.18 | 247.62 | 318.60 |
| 1.05 | 10.061 | 10.886 | 11.934 | 12.934 | 13.744 | 14.415 | 13.112 | 15.665 | 23.409 | 33.318 |
| 1.10 | 18.589 | 20.680 | 21.812 | 22.868 | 23.721 | 24.045 | 24.268 | 22.713 | 28.083 | 34.101 |
| 1.15 | 19.687 | 23.154 | 26.071 | 28.565 | 30.816 | 32.872 | 36.517 | 36.651 | 46.277 | 52.192 |
| 1.20 | 24.319 | 28.624 | 32.605 | 36.314 | 39.736 | 42.967 | 48.834 | 53.939 | 64.153 | 71.769 |

表 2 伽马分布的参数 b
Table 2 Parameter b of gamma distributions

| 频率比 f_s/f_n | 阻尼比 ζ | | | | | | | | | |
|---------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.5 | 2.0 |
| 0.80 | 0.2202 | 0.2019 | 0.1870 | 0.1715 | 0.1550 | 0.1429 | 0.1246 | 0.1133 | 0.0928 | 0.0777 |
| 0.85 | 0.1795 | 0.1567 | 0.1422 | 0.1226 | 0.1084 | 0.0979 | 0.0836 | 0.0743 | 0.0609 | 0.0530 |
| 0.90 | 0.1922 | 0.1541 | 0.1260 | 0.1080 | 0.0954 | 0.0863 | 0.0745 | 0.0665 | 0.0539 | 0.0455 |
| 0.95 | 0.1250 | 0.1038 | 0.0915 | 0.0829 | 0.0762 | 0.0741 | 0.0740 | 0.0632 | 0.0447 | 0.0332 |
| 1.00 | 0.0261 | 0.0203 | 0.0163 | 0.0135 | 0.0113 | 0.0097 | 0.0073 | 0.0059 | 0.0039 | 0.0031 |
| 1.05 | 0.1673 | 0.1500 | 0.1330 | 0.1197 | 0.1103 | 0.1032 | 0.1114 | 0.0900 | 0.0563 | 0.0376 |
| 1.10 | 0.0820 | 0.0719 | 0.0668 | 0.0627 | 0.0596 | 0.0581 | 0.0565 | 0.0596 | 0.0464 | 0.0371 |
| 1.15 | 0.0801 | 0.0659 | 0.0570 | 0.0509 | 0.0463 | 0.0427 | 0.0375 | 0.0338 | 0.0279 | 0.0241 |
| 1.20 | 0.0618 | 0.0510 | 0.0438 | 0.0386 | 0.0348 | 0.0317 | 0.0273 | 0.0243 | 0.0198 | 0.0173 |

2.4 累计概率分布

从上表 1 和表 2 可以看出修正系数 c 的概率密度分布取决于频率比 f_s/f_n 和阻尼比 ζ 的概率分布。同时三变量的联合概率密度 $p(f_s/f_n, v_s, c)$ 函数响应与每一组 $f_s/f_n, v_s$ 和 c 组合。 \ddot{Q}_c 的概率密度可由联合概率密度任意一点 $p(f_s/f_n, v_s)$ 与修正系数的概率密度函数 $p(c)$ 相乘得到：

$$p(f_s/f_n, v_s, c) = p(f_s/f_n, v_s) \cdot p(c) \quad (18)$$

\ddot{Q}_c 的概率分布可由下式得到：

$$P_c = p(f_s/f_n, v_s, c) \cdot \Delta(f_s/f_n) \cdot \Delta v_s \cdot \Delta c \quad (19)$$

式中, $\Delta(f_s/f_n)$ 、 Δv_s 、 Δc 中分别为变量 f_s/f_n 、 v_s 、 c 的计算步长。

处在 $Q_{c,i}$ 、 $Q_{c,i+1}$ 加速度峰值之间的 Q_c 概率分布可用下式表示：

$$P_{Q_{c,i} \sim Q_{c,i+1}} = \sum_{Q_{c,i} < Q_c < Q_{c,i+1}} P_c \quad (20)$$

3 算例分析

文献[22]给出了用于评估人行桥在竖向人行荷

载作用下振动舒适度的基准模型,该基准模型基于不繁忙且经常是单人通过的人行桥。该人行桥主跨为 78 m,在人行荷载作用下以第一阶竖向振动为主,对应的频率 2.04 Hz,阻尼比 0.26%,模态质量 58000 kg。

步行参数中步频和步速呈正态分布,两者之间相互独立^[3,9]。所以步频和步速的联合概率密度函数可以由步频概率密度分布函数和步速的概率密度分布函数相乘得到。图 1 即为步频与人行桥基频频率比和步速的联合概率密度函数。从图 1 可以看出慢速和中速分布较为集中,快速分布较为离散。

不同频率比和速度组合对应一加速度峰值。图 2 给出了把人行荷载等效为正弦荷载不同行走模式下一可能的加速度峰值范围。从图 1 可以看出当步行频率与人行桥的频率一致时,峰值达到极值,峰值随着步行速度增大而线性增大。慢速、中速和快速对应的峰值最大值为 0.9929 m/s²、1.29 m/s²、和 1.542 m/s²。

图 3 为单人以慢速、中速和快速行走模式通过人行桥时修正后的加速度峰值的概率分布。从图中可以看出慢速时有些人能产生低于 0.05 m/s² 加速

度峰值,而有些能产生高达 0.993 m/s^2 加速度峰值,前者的概率到达 55.2% ,而后者分布则可以忽略不计;加速度峰值为 0.1 m/s^2 时概率为 24.6% 。不同于慢速时加速度峰值概率分布,中速和快速时加速度峰值为 0.1 m/s^2 时对应的概率分布为 31% 和 40% 峰值加速度为 0.05 时概率分布减少为 16.2% 和 19.9% 。可知慢速、中速和快速行走模式通过人行桥时加速度小于 0.1 m/s^2 累计概率为 79.8% 、 47.2% 和 59.9% 。

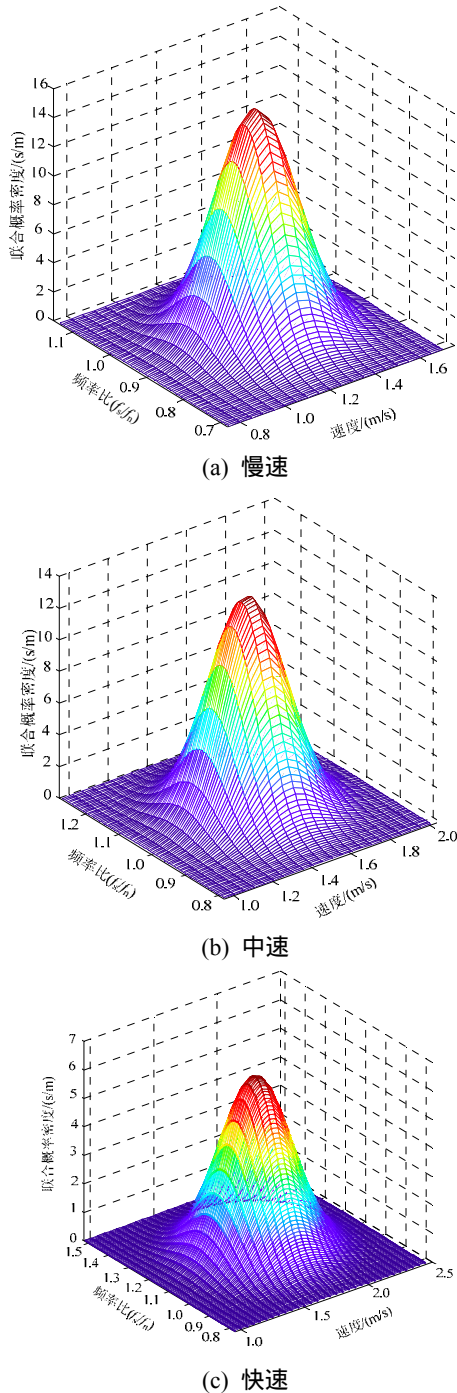
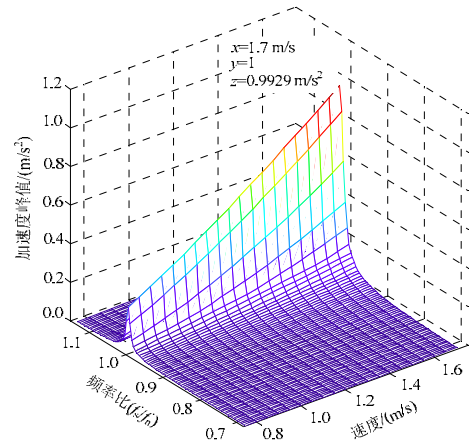
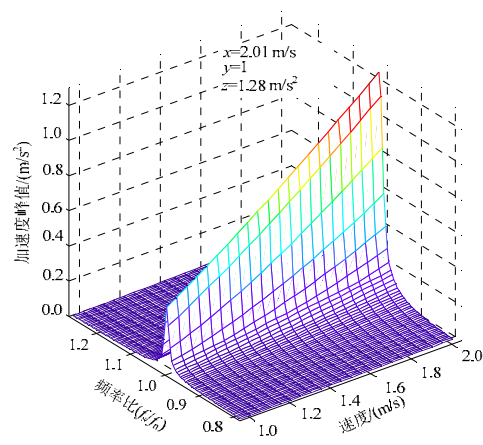


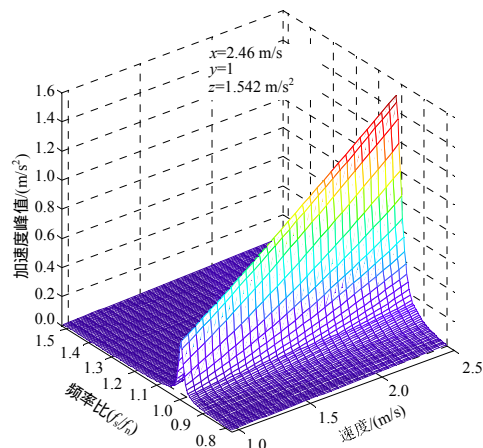
图1 不同频率比和速度的联合概率密度
Fig.1 Joint probability density function for different combinations of step frequency and velocity



(a) 慢速



(b) 中速



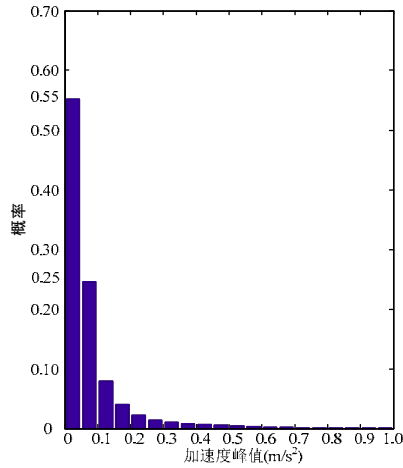
(c) 快速

图2 不同频率比和速度下加速度峰值

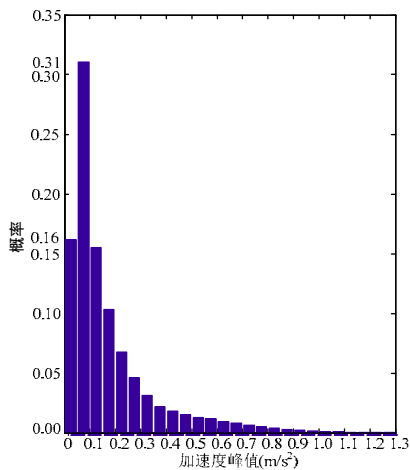
Fig.2 Peak acceleration for different combinations of step frequency and velocity

图4为单人以慢速、中速和快速行走模式通过人行桥时小于或等于某一特定加速度的累计概率分布情况。根据文献[2-3]建议,加速度峰值为 0.35 m/s^2 时,行人有感系数为 100% ,本文采取此建议值。从图4可以看出,以慢速、中速和快速通

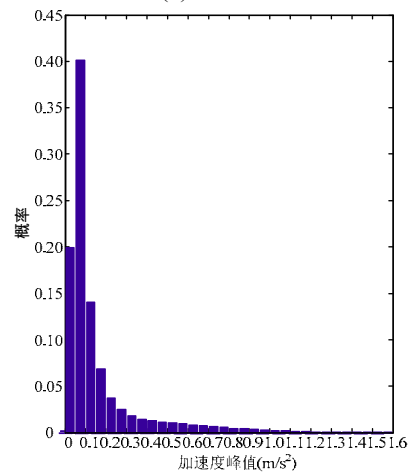
过人行桥时加速度峰值小于或等于 0.35 m/s^2 累计概率分别为 96.3%、87.6%和 88.9%。慢速通过时，人行桥振动舒适度程度最高，快速时次之，中速通过时最低。



(a) 慢速



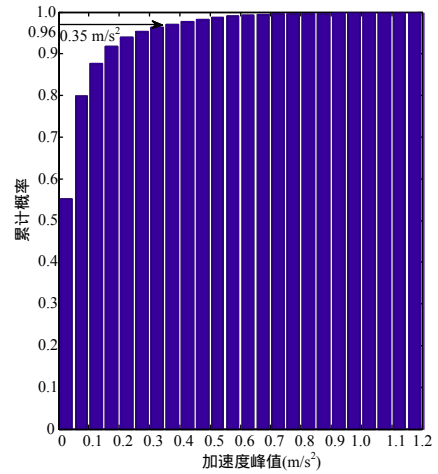
(b) 中速



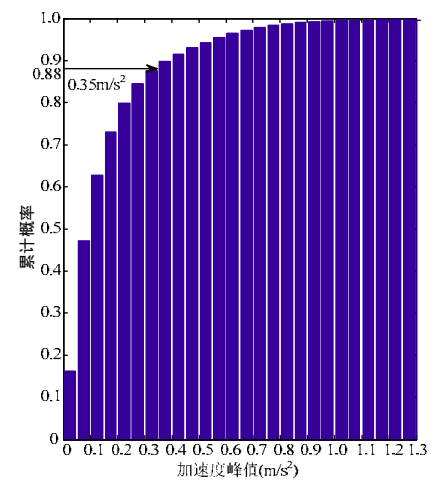
(c) 快速

图3 加速度峰值概率

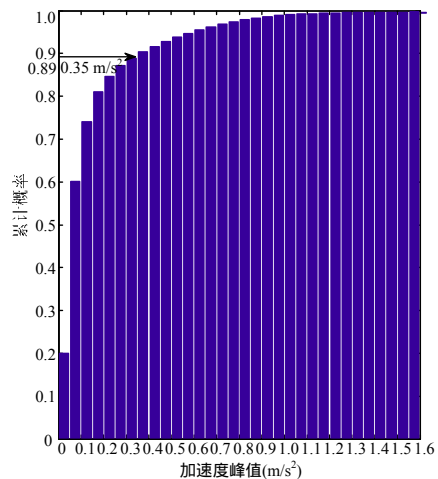
Fig.3 A peak acceleration level



(a) 慢速



(b) 中速



(c) 快速

图4 小于或等于特定加速度峰值的累计概率分布

Fig.4 Cumulative probability that the acceleration level is smaller than or equal to the acceleration level considered

采用 Monte Carlo 随机抽样法对上述振动舒适度评估方法的正确性进行验证。首先，生成 1000 组呈正态分布的行走步频，然后再生成 1000 组独立于步

频的可能步速, 荷载动力因子取式(3)确定的均值, 行人体重取为 750 N, 人行桥参数不变。用生成的 1000 条人行荷载时程计算人行桥的时程响应, 获得其统计量, 得到的累计概率分布如图 5 所示。结果显示其概率与行人中速通过人行桥的累计概率分布十分相似, 验证了上述方法的正确性。

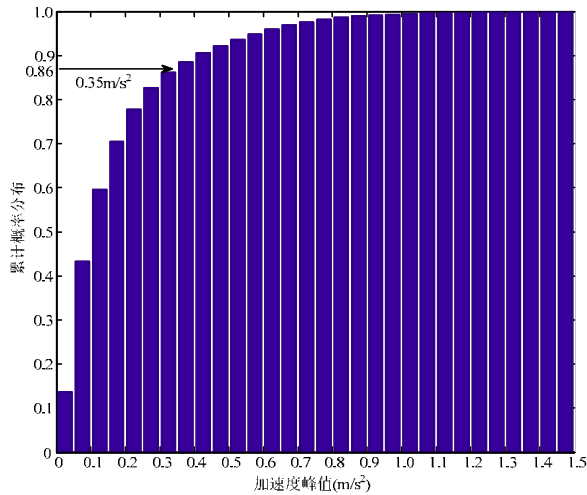


图 5 Monte Carlo 法累计概率分布模拟结果

Fig.5 Cumulative probability as a result of MC

4 结论

本文在前人已有研究成果基础上, 建立了慢速、中速、快速行走时随机时域行人荷载, 并施加至人行桥基准模型上, 得到了以慢速、中速、快速通过人行桥时最大加速度峰值, 每个特定峰值加速度对应的概率以及小于或等于某个特定加速度峰值累计概率。得到的主要结论以下:

(1) 当步行频率与人行桥的频率一致时, 峰值达到极值, 峰值随着步行速度增大而线性增大。慢速、中速和快速对应的峰值最大值为 0.9929 m/s^2 、 1.29 m/s^2 和 1.542 m/s^2 ;

(2) 慢速、中速和快速加速度峰值 0.05 m/s^2 概率分别是 55.2%、16.2%和 19.9%, 加速度峰值是 0.1 m/s^2 概率分别是 24.6%、31%和 40%。慢速、中速和快速行走模式通过人行桥时加速度小于 0.1 m/s^2 累计概率为 79.8%、47.2%和 59.9%。

(3) 取加速度峰值 0.35 m/s^2 为舒适度限值, 以慢速、中速和快速行走模式通过人行桥时小于或等于限值累计概率分别为 96.3%、87.6%和 88.9%。慢速通过时, 人行桥振动舒适度程度最高, 快速时次之, 中速通过时最低。

参考文献:

- [1] Figueiredo F P, Da Silva J G S, De Lima L R O, et al. A parametric study of composite footbridges under pedestrian walking loads [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(3): 605-615.
- [2] 冯鹏, 金飞飞, 叶列平, 等. 人行天桥结构振动舒适度量化与振动特性实测研究[J]. *振动工程学报*, 2013, 26(4): 545-553.
Feng Peng, Jin Feifei, Ye Lieping, et al. Quantification of pedestrian's comfort level and dynamic properties of footbridge vibration based on in-situ measurement [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2013, 26(4): 545-553. (in Chinese)
- [3] Živanović S, Pavić A. Quantification of dynamic excitation potential of pedestrian population crossing footbridges [J]. *Shock and Vibration*, 2011, 18(4): 563-577.
- [4] BS 5400-2, Concrete and composite bridges: Specification for loads [S]. London: British Standard Institution, 1978.
- [5] Živanović S, Pavić A, Reynolds P. Probability-based prediction of multi-mode vibration response to walking excitation [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(6): 942-954.
- [6] 潘宁. 人行荷载下楼板振动响应舒适度研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2012.
Pan Ning. Study on vibration serviceability of floor due to walking excitation [D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2012. (in Chinese)
- [7] 袁旭斌. 人行桥人致振动特性研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
Yuan Xubin. Human-induced footbridge vibration [D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)
- [8] 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: 1-18.
Chen Zhengqing, Hua Xugang. Vibration and dynamic design of footbridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2009: 1-18. (in Chinese)
- [9] 陈隽, 彭怡欣, 王玲. 基于步态分析技术的三向单足落步荷载曲线试验建模[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(3): 79-87.
Chen Juan, Peng Yixin, Wang Ling. Experimental investigation and mathematical modeling of single footfall load using motion capture technology [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(3): 79-87. (in Chinese)
- [10] Mullarney B, Archbold P. Modelling the vertical loads applied by pedestrians at a range of walking velocities [J]. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2013, 7(5): 266-277.

- [11] 陈波, 王鑫, 刘浩, 等. 基于实测响应的斜拉人行桥人致振动舒适度研究[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(7): 99-103.
Chen Bo, Wang Xin, Liu Hao, et al. Research on the vibration serviceability of a cable-stayed footbridge based on field measurement [J]. Journal of Wu Han university of technology, 2013, 35(7): 99-103. (in Chinese)
- [12] 傅学怡, 曲家新, 陈贤川, 等. 时程频谱结合分析方法对展望桥人行舒适度的分析与控制[J]. 土木工程学报, 2011, 44(10): 73-80.
Fu Xueyi, Qu Jiaxin, Chen Xianchuan, et al. Walking comfort analysis and control for the Expectation Bridge using combined time history and frequency spectra method [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(10): 73-80. (in Chinese)
- [13] 聂建国, 陈宇, 樊健生. 步行荷载作用下单跨人行桥振动的均方根加速度反应谱法[J]. 土木工程学报, 2010, 43(9): 109-116.
Nie Jianguo, Chen Yu, Fan Jiansheng. RMS acceleration response spectrum method for single span footbridges under pedestrian load [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(9): 109-116. (in Chinese)
- [14] 钱骥, 孙利民. 大跨径人行桥人致振动舒适性评估及减振措施[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(5): 677-681.
Qian Ji, Sun Limin. Comfort evaluation and vibration reduction design of long span footbridges [J]. Journal Of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(5): 677-681. (in Chinese)
- [15] Živanović S, Pavić A, Reynolds P. Probability-based prediction of multi-mode vibration response to walking excitation [J]. Engineering Structures, 2007, 29(6): 942-954.
- [16] 韩建平, 王洪涛, 刘云帅. 基于概率性人行荷载模型的楼板结构振动分析[J]. 工程力学, 2013, 31(2): 81-87.
Han Jianping, Wang Hongtao, Liu Yunshuai. Vibration analysis of a floor system based on probabilistic human-induced force model [J]. Engineering Mechanics, 2013, 31(2): 81-87. (in Chinese)
- [17] RFS2-CT-2007-00033, Design of footbridges guideline [S]. London: HIVOSS, 2008.
- [18] Code O H B D. Highway engineering division [S]. Toronto: Ministry of Transportation and Communication, 1983.
- [19] 刘晶波, 杜修力. 结构动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 51-59.
Liu Jingbo, Du Xiuli. Structural dynamics [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2007: 51-59. (in Chinese)
- [20] Bachmann H, Pretlove A J, Rainer H. Vibrations induced by people, in: vibration problems in structures: practical guidelines [M]. Basel: Birkhäuser Verlag, 1995: 81-86.
- [21] Brownjohn J M W, Pavić A, Omenzetter P. A spectral density approach for modelling continuous vertical forces on pedestrian structures due to walking [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2004, 31(1): 65-77.
- [22] Živanović S. Benchmark footbridge for vibration serviceability assessment under the vertical component of pedestrian load [J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 138(10): 1193-1202.

(上接第 75 页)

- [15] 谢楠, 王勇, 李靖. 高大模板支架极限承载力的计算方法[J]. 工程力学, 2010, 27(增刊 1): 254-259.
Xie Nan, Wang Yong, Li Jing. A calculating method on ultimate capacity of high falsework [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(Suppl 1): 254-259. (in Chinese)
- [16] Peng J L, Pan A D, Chan S L. Simplified models for analysis and design of modular falsework [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 48(3): 189-209.
- [17] 付小辉. 高大模板支架极限承载力的统计特性以及基于可靠性的设计研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
Fu Xiaohui. Statistical characteristics of high formwork support's ultimate bearing capacity and a design method based on reliability [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [18] Ellingwood B R. Toward load and resistance factor design for fiber-reinforced polymer composite structures [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(4): 449-458.
- [19] 赵凯. 考虑人为过失影响的高大模板支架优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
Zhao Kai. Optimization of high falsework considering the effect of human error [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [20] 谢楠. 高大模板支撑体系的安全控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 16-24.
Xie Nan. Safety control for high formwork support systems [M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2012: 16-24. (in Chinese)
- [21] Ellingwood B R. Design and construction error effects on structural reliability [J]. Structure Engineering, ASCE, 1987, 13(2): 409-422.