

跳跃荷载下大跨楼盖的振动加速度反应谱

陈 隽^{1,2}, 李 果², 楼佳悦², 王 磊²

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 利用实测 92 人次 506 条跳跃荷载记录, 计算每条记录的单自由度系统加速度峰值及 10 s 和 1 s 移动均方根峰值等反应谱曲线, 并在此基础上提出了面向工程设计的反应谱表达式. 由试验数据的分析获得了不同阻尼比和保证率下的反应谱参数及不同响应代表值间的转换关系. 结合振型分解反应谱思想, 可由建议反应谱计算单人跳跃下楼盖的动力响应. 通过与模型试验和工程实测的对比验证了反应谱方法的可行性, 可用于楼盖的振动舒适度设计.

关键词: 大跨楼盖; 振动舒适度; 跳跃荷载; 分段模型; 设计反应谱

中图分类号: TU311

文献标志码: A

Acceleration Response Spectrum for Predicting Floor Vibration Subjected to Occupants Jumping

CHEN Jun^{1,2}, LI Guo², LOU Jiayue², WANG Lei²

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The acceleration response spectrum for predicting floor vibration subjected to single person's jumping load was investigated. Five hundred and six jumping load records from ninety-two test subjects were collected by experiments. Each record was then applied to single-degree-of-freedom system to calculate the corresponding peak, 10 s and 1 s running root-mean-square (RMS) acceleration responses spectra, on which a design-oriented spectrum was developed. Spectrum parameters were determined by statistical analysis on the experimental records. These parameters can be calculated by given structural damping ratios and confidence levels. Furthermore, conversion rules between different vibration quantities, i. e. peak and RMS, were established. Finally, the applicability and reliability of the proposed design spectrum were validated by comparing its predictions with

experimental and field measurements. The comparison shows that the suggested design spectrum can be used to predict the maximum acceleration response of floors subjected to one person jumping.

Key words: floor; vibration serviceability; jumping loads; piecewise model; root-mean-square (RMS) acceleration response spectrum

伴随着建筑结构“更轻, 更高, 更长”的发展趋势, 行走与跳跃等人致激励作用下大跨楼盖、大型展厅、体育看台、柔性楼梯等结构的振动问题日益突显^[1-4]. 跳跃荷载是重要的人致激励形式, 在体育和娱乐场所, 观众经常会进行有节奏的跳跃活动, 当跳跃频率和结构频率接近时, 过大的共振振幅会使人产生不舒适感, 甚至带来结构破坏、人员受伤等严重后果^[5-6].

对大跨楼盖的人致结构振动问题, 美国 AISC^[7]、英国 CSTR43^[8]、中国 GB 50011—2010^[9]等规范主要采用限制楼盖基频下限和限制振动幅值上限两种方式进行设计. 其中, 振动幅值可更准确地评估振动舒适度, 但在楼盖设计阶段, 面临结构方案频繁变更以及时域法计算楼盖响应时间长、效率低等问题, 如何快速准确地计算楼盖在跳跃荷载作用下的响应峰值, 成为一个亟待解决的问题.

反应谱方法作为工程设计时计算结构动力最大响应的一种高效方法, 已在地震工程中得到广泛应用. 但目前对于人致激励的楼盖反应谱方法研究还比较初步, 现有的部分研究只涉及到步行荷载^[10-14], 但已能够说明反应谱方法的有效性. 对于跳跃荷载反应谱, 尚未有相关的研究. 因此, 本文通过大量实测数据, 建立了跳跃荷载作用下的楼盖加速度设计反应谱.

收稿日期: 2014-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(51178338, 51478346); 土木工程防灾国家重点实验室自主课题(SLDRCE14-B-16)

通讯作者: 陈 隽(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为大跨工程结构的振动分析与控制.

E-mail: cejchen@tongji.edu.cn

1 实测跳跃荷载时程曲线

大量且频谱成分丰富的实测跳跃荷载曲线,是

建立可靠设计反应谱的基本前提. 本文中的数据来自两批共 92 人次的试验. 所有参与试验人员皆为健康成年人,试验前,各测试者都经过运动能力检查,试验者身体特征参数统计值见表 1.

表 1 测试者身体特征参数统计
Tab.1 Statistics on test subjects

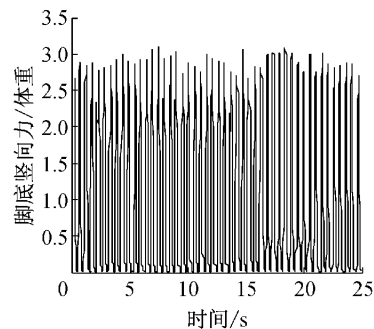
性别	人数	年龄/岁			体重/kg			身高/cm		
		均值	标准差	范围	均值	标准差	范围	均值	标准差	范围
男	52	23.4	1.69	20~29	65.6	10.08	47~88	174.2	5.7	160~185
女	40	24.0	1.97	21~30	52.8	5.56	39~63	160.5	4.5	150~172

已有研究表明,人可以舒适地进行跳跃活动的频率范围主要为 2~3 Hz,此范围之外频率偶有发生. Ji 等^[15]指出跳跃这类节律性运动的频率范围可取为 1.5~3.5 Hz. 本研究的前期预试验也表明 1.5~3.5 Hz 是测试者能够完成跳跃活动的频率范围,因此取为本文试验的测试频率范围.

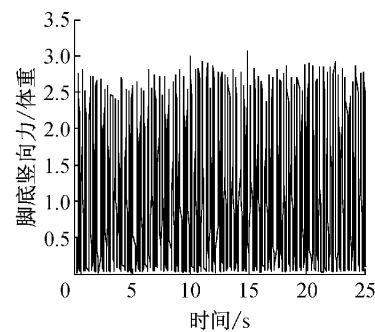
第 1 批共 67 人次参加了跳跃荷载试验,每位测试者在固定于地面的测力板上进行了五种工况的连续跳跃试验,分别为 1.50, 2.00, 2.67 和 3.50 Hz 的固定频率跳跃(由节拍器引导)和一次自由跳跃,详细试验描述见文献^[4]. 在第 1 批试验基础上,进一步采用新颖的无线足底压力分布测量系统,完成了第 2 批 25 人次的试验. 试验中,测试者穿上装有 Novel Pedar 压力感应鞋垫的鞋子(见图 1a),在刚性地板上原地进行跳跃活动,测力鞋垫的采样频率为 100 Hz. 每位测试者进行了七种工况试验,分别为 1.5, 1.9, 2.3, 2.7, 3.1 和 3.5 Hz 的固定频率跳跃和一次自由跳跃. 进行每个工况试验前,测试者先跟随节拍器节奏进行适应性跳跃,然后完成持续时间 25 s 以上的跳跃. 为保证试验数据质量,每完成一个工况,测试者都休息至无疲惫感后再进行下一工况试验. 图 1 为某测试者试验情况以及在 1.9, 3.5 Hz 跳跃工况时的实测脚底竖向力曲线.



a 试验情况



b 跳跃频率 1.9 Hz



c 跳跃频率 3.5 Hz

图 1 试验情况及典型实测跳跃荷载时程曲线

Fig.1 Experiment and typical jumping load curves

尼比、速度和位移.

由计算获得的量纲一 $\ddot{u}(t)$ 时程可分别获得量纲一加速度峰值 a_m 、均方根值 a_{ms} 、10 s 移动均方根峰值 $a_{ms,m}^{(10s)}$ 和 1 s 移动均方根峰值 $a_{ms,m}^{(1s)}$ 等振动响应代表值. 将单自由度系统的频率和阻尼比分别在

2 设计反应谱形式的确定

2.1 单条跳跃荷载的反应谱计算

两批次试验共获得了 92 人次 506 条有效跳跃数据曲线. 分析表明,两批试验数据的荷载峰值与动载因子相近,数据间具有相容性. 将每条曲线脚底竖向力 $F(t)$ 除以对应测试者体重 G 标准化后施加到相对质量为 1 的单自由度体系中(标准激励系统),可获得加速度响应 $\ddot{u}(t)$,即

$$\ddot{u} + 2\omega\zeta\dot{u} + \omega^2 u = F(t)/G \quad (1)$$

式中: ω , ζ , \dot{u} 和 u 分别为标准激励系统的圆频率、阻

0.05~15.00 Hz以及0.01~0.05范围内变化,可获得每条荷载曲线对应的反应谱曲线.图2为一条1.9 Hz的跳跃荷载实测曲线对应的 $a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})}$ 反应谱曲线(0.01阻尼比),同理可以获得 $a_{\text{rms},m}^{(1\text{ s})}$, a_{rms} , a_m 所对应的反应谱曲线,本文不再赘述.

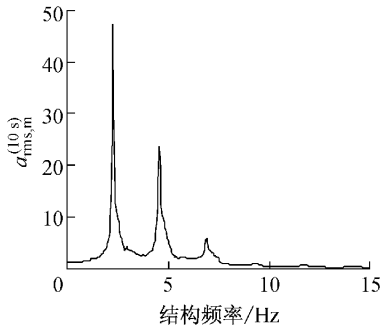


图2 实测某1.9 Hz跳跃荷载反应谱曲线(0.01阻尼比)

Fig.2 Response spectrum curve for a 1.9 Hz recorded jumping load (damping ratio 0.01)

2.2 每位测试者的代表性反应谱曲线

由于每位测试者按不同频率进行了多次跳跃试验,因而有多条反应谱曲线.跳跃荷载的随机性主要来自于个体内差异和个体间差异,前者指相同频率时同一个人的每一次跳跃都有差异,后者指不同人相同跳跃频率的荷载不同.对此,本文取同一测试者所有反应谱曲线的包络线作为测试者代表曲线,用于反映个体内差异.同时,取所有测试者代表曲线的某个分位数曲线作为设计反应谱,反映个体间差异.图3为0.01阻尼比时,某测试者(身高154 cm,体重53.6 kg)的代表性反应谱曲线.图4为0.01阻尼比时92位测试者的全部代表性反应谱曲线(图中散点),图中两条线是各频率处95%和75%分位数值相连接的反应谱曲线.

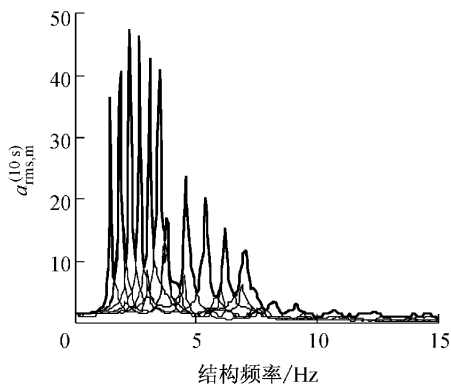


图3 某位测试者代表性反应谱曲线的确定(0.01阻尼比)

Fig.3 Envelope spectrum curve of a test subject (damping ratio 0.01)

2.3 设计反应谱形式

观察图4可见,代表性反应谱的分位数曲线可以分为三个主要区段:第1区段, $>0.5\sim4.0$ Hz,对应于跳跃荷载的1倍频率段;第2区段, $>4.0\sim7.0$ Hz,对应于跳跃荷载的2倍频率段;第3区段, $>7.0\sim15.0$ Hz,对应于跳跃荷载的高频段.基于以上观察,本文提出了如图5所示的设计反应谱分段表达形式,主要包括两个平台段和一个曲线下降段.显然,该形式与抗震设计的反应谱类似,便于理解和应用,同时谱的分段形式又合理地反映了跳跃荷载频率分布的物理特征.

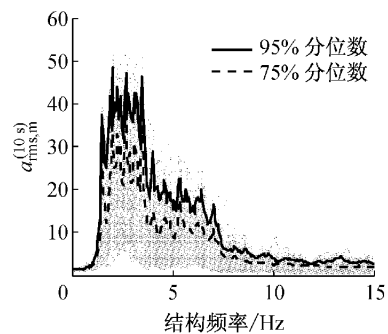


图4 92位测试者代表性反应谱曲线

Fig.4 Representative spectrum curves for 92 subjects

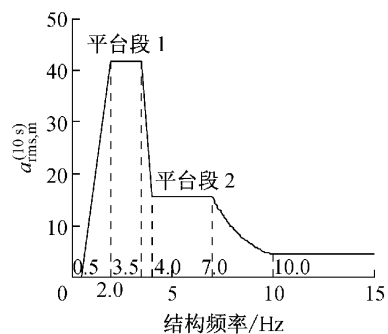


图5 设计反应谱形式

Fig.5 Main parts of design spectrum

3 设计反应谱参数

本节以 $a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})}$ 反应谱为例说明利用试验数据统计确定谱参数的方法, a_m 和 $a_{\text{rms},m}^{(1\text{ s})}$ 等谱参数的确定方法与之完全相同.

3.1 平台1和2的谱值确定

分别对图5中平台段1(2.0~3.5 Hz)和平台段2(4.0~7.0 Hz)的谱值分布作统计.分析表明,各平台段内谱值大体服从韦伯分布.图6和7分别给出了平台段1和2在五种阻尼比下谱值分布的统计结果以及与韦伯分布的对比.

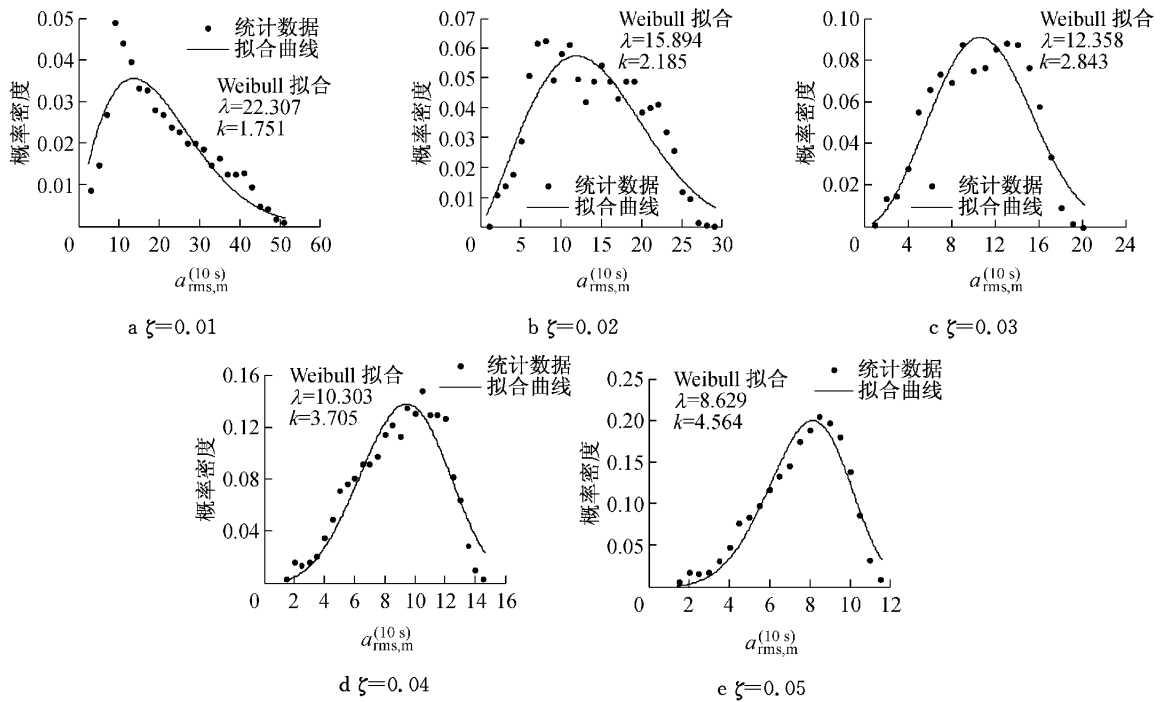


图6 平台段1对应的反应谱数值统计特性

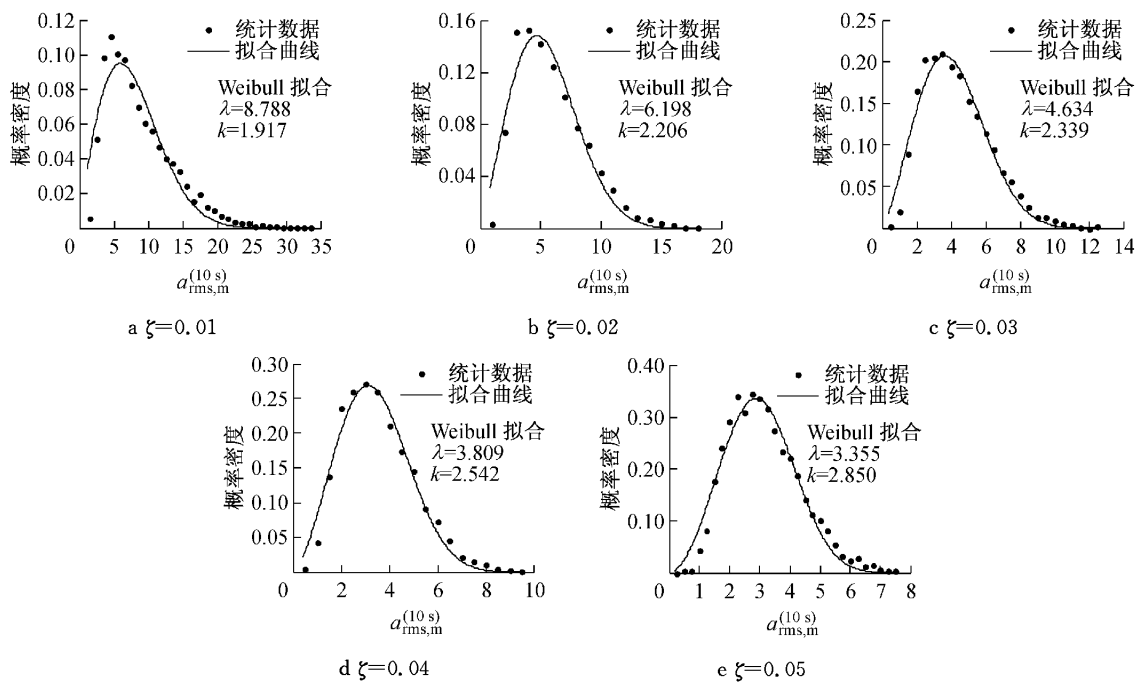
Fig.6 Comparison of Weibull distributions with the probability distribution of $a_{rms,m}^{(10s)}$ in the frequency range from 2.0 Hz to 3.5 Hz

图7 平台段2对应的反应谱数值统计特性

Fig.7 Comparison of Weibull distributions with the probability distribution of $a_{rms,m}^{(10s)}$ in the frequency range from 4.0 Hz to 7.0 Hz

由韦伯分布的分布函数可获得如下表达式:

$$P = 1 - \exp\left(-\left(\frac{a_{rms,m}^{(10s)}}{\lambda}\right)^k\right) \quad (2)$$

式中: P 为随机变量 $a_{rms,m}^{(10s)}$ 所对应的保证率; λ 为形状参数; k 为比例参数. 进一步由式(2)可推得给定保证

率 P 时 $a_{rms,m}^{(10s)}$ 的表达式为

$$a_{rms,m}^{(10s)} = \lambda(-\ln(1-P))^{1/k} \quad (3)$$

由图6和7中 λ 和 $1/k$ 的结果, 可拟合获得如下两系数与阻尼比的关系:

$$\begin{cases} \lambda = 16.85\zeta^{-0.22} - 23.82, & f \in (2.0, 3.5] \text{ Hz} \\ 1/k = -2.64\zeta^{0.44} + 0.93, & f \in (2.0, 3.5] \text{ Hz} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \lambda = 3.35\zeta^{-0.31} - 5.25, & f \in (4.0, 7.0] \text{ Hz} \\ 1/k = -1.24\zeta^{0.46} + 0.66, & f \in (4.0, 7.0] \text{ Hz} \end{cases} \quad (5)$$

将式(4)和(5)代入式(3),则可获得在给定阻尼比 ζ 和保证率 P 时两平台值 $a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})}$ 的表达式为

$$\begin{cases} a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s},1\text{th})} = (16.85\zeta^{-0.22} - 23.82)(-\ln(1-P))^{-2.64\zeta^{0.44}+0.93}, & f \in (2.0, 3.5] \text{ Hz} \\ a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s},2\text{th})} = (3.35\zeta^{-0.31} - 5.25)(-\ln(1-P))^{-1.24\zeta^{0.46}+0.66}, & f \in (4.0, 7.0] \text{ Hz} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s},1\text{th})}$ 和 $a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s},2\text{th})}$ 分别指平台段 1 和 2 的 10 s 均方根加速度峰值; f 为结构频率。

3.2 曲线下降段参数

分析表明,曲线下降段(7.0~10.0 Hz)可以采用式(7)的表达形式,即

$$a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})}(f, \zeta, P) = \begin{cases} 0, & f \in (0, 0.5] \text{ Hz} \\ \frac{2}{3}(f-0.5)a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s},1\text{th})}(\zeta, P), & f \in (0.5, 2.0] \text{ Hz} \\ a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s},1\text{th})}(\zeta, P), & f \in (2.0, 3.5] \text{ Hz} \\ 2(f-3.5)(a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s},2\text{th})}(\zeta, P) - a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s},1\text{th})}(\zeta, P)) + a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s},1\text{th})}(\zeta, P), & f \in (3.5, 4.0] \text{ Hz} \\ a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s},2\text{th})}(\zeta, P), & f \in (4.0, 7.0] \text{ Hz} \\ (7/f)^{3.65}a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s},2\text{th})}(\zeta, P), & f \in (7.0, 10.0] \text{ Hz} \\ 0.7^{3.65}a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s},2\text{th})}(\zeta, P), & f \in (10.0, 15.0] \text{ Hz} \end{cases} \quad (9)$$

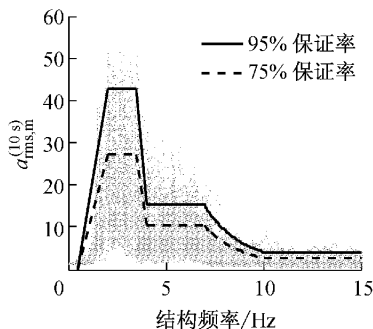


图 8 0.01 阻尼比时设计反应谱曲线与试验数据的对比
Fig. 8 Comparison of the proposed response spectrum curves with experimental data (damping ratio 0.01)

$$a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})} = a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s},2\text{th})} \left(\frac{7}{f} \right)^\gamma, \quad f \in (7.0, 10.0] \text{ Hz} \quad (7)$$

式中: γ 为曲线衰减指数. 经过对不同保证率和阻尼比的大量计算分析后发现, γ 不随保证率 P 和阻尼比 ζ 显著变化, 为计算方便, 可统一取为常数 3.65. 所以, 曲线下降段 $a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})}$ 表达式为

$$a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})} = (3.35\zeta^{-0.31} - 5.25)(-\ln(1-P))^{-1.24\zeta^{0.46}+0.66} \left(\frac{7}{f} \right)^{3.65}, \quad f \in (7.0, 10.0] \text{ Hz} \quad (8)$$

3.3 $a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})}$ 反应谱的完整表达式

至此, 跳跃荷载作用下楼盖 10 s 加速度均方根值设计反应谱曲线的所有参数已经确定, 式(9)给出了 $a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})}$ 设计反应谱的完整表达式. 图 8 为 0.01 阻尼比时具有 95% 和 75% 保证率的反应谱曲线和实测数据的对比. 图 9 给出了 95% 保证率不同阻尼比时 $a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})}$ 设计反应谱曲线. $a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})}$ 反应谱的完整表达式如下所示:

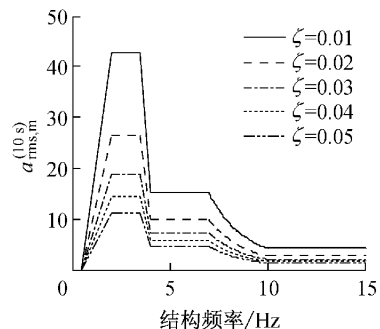


图 9 95% 保证率不同阻尼比时 $a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})}$ 设计反应谱
Fig. 9 The proposed acceleration spectrum with different damping ratios (confidence 95%)

3.4 $a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})}$ 与 $a_{\text{rms},m}^{(1\text{ s})}$ 和 a_m 反应谱的转换关系

$a_{\text{rms},m}^{(1\text{ s})}$ 和 a_m 也是评价楼盖动力响应的常用指标^[14]. 与建立 $a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})}$ 反应谱曲线的方法相同, 可以获得 $a_{\text{rms},m}^{(1\text{ s})}$ 和 a_m 的反应谱曲线. 经大量计算对比发现, $a_{\text{rms},m}^{(1\text{ s})}$, a_m 与 $a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})}$ 反应谱大致成倍数关系. 为了设计反应谱形式的简单化, 统一以倍数关系给出.

定义 $\beta_{(10\text{ s})}^{(1\text{ s})}$ 和 $\beta_{(10\text{ s})}^{(m)}$ 分别为 $a_{\text{rms},m}^{(1\text{ s})}$ 和 a_m 反应谱曲线与 $a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})}$ 反应谱曲线的比值, 即 $\beta_{(10\text{ s})}^{(1\text{ s})} = a_{\text{rms},m}^{(1\text{ s})}/a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})}$, $\beta_{(10\text{ s})}^{(m)} = a_m/a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})}$. 各种阻尼比与保证率下的计算表明, $\beta_{(10\text{ s})}^{(1\text{ s})}$ 和 $\beta_{(10\text{ s})}^{(m)}$ 与跳跃频率相关, 表示为

$$\beta_{(10\text{ s})}^{(1\text{ s})}(f) = \begin{cases} 1.60, & f \in (0, 7.0] \text{ Hz} \\ 1.60(f/7)^{0.52}, & f \in (7.0, 15.0] \text{ Hz} \end{cases} \quad (10)$$

$$\beta_{(10\text{ s})}^{(m)}(f) = \begin{cases} 2.71, & f \in (0, 7.0] \text{ Hz} \\ 2.71(f/7)^{1.42}, & f \in (7.0, 15.0] \text{ Hz} \end{cases} \quad (11)$$

4 基于设计反应谱的楼盖最大响应计算步骤

基于振型分解的思想, 可由本文提出的设计反应谱计算大跨楼盖在跳跃荷载作用下的加速度反应, 用于振动舒适度评估, 具体应用步骤如下:

(1) 建立目标楼盖的有限元模型, 计算得到楼盖的前若干阶竖向振型的自振频率 f_i 、振型质量 M_i 和归一化振型 ϕ_i , 其中 i 为振型编号. 实际应用时, 可取截止频率 $f_i \leq 15 \text{ Hz}$.

(2) 对于第 i 阶振型, 按式(9)计算给定阻尼比 ζ_i 和保证率 P 下的 10 s 加速度均方根反应谱值 $a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})}(f_i, \zeta_i, P)$.

(3) 如果需要使用 $a_{\text{rms},m}^{(1\text{ s})}$ 和 a_m , 可按下式计算:

$$a_{\text{rms},m}^{(1\text{ s})}(f_i, \zeta_i, P) = \beta_{(10\text{ s})}^{(1\text{ s})} a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})}(f_i, \zeta_i, P) \quad (12)$$

$$a_m(f_i, \zeta_i, P) = \beta_{(10\text{ s})}^{(m)} a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})}(f_i, \zeta_i, P) \quad (13)$$

并在以下计算步骤中替换 $a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})}(f_i, \zeta_i, P)$.

(4) 计算楼盖在第 i 阶振型时的 10 s 加速度均方根值响应, 表达式如下所示:

$$a_{i,\text{rms},m}^{(10\text{ s})} = \phi_{i,j} \phi_{i,\text{ch}} a_{i,\text{ref}} a_{\text{rms},m}^{(10\text{ s})}(f_i, \zeta_i, P) \quad (14)$$

式中: $\phi_{i,j}$ 为楼盖第 i 阶振型时跳跃荷载作用点处的振型值, 用于反映跳跃位置不同的影响; $\phi_{i,\text{ch}}$ 为验算点处的振型值, 反映验算位置不同的影响; $a_{i,\text{ref}} = G/M_i$ 为参考加速度, 其中 G 为测试者体重 (若无设计值, 建议可取为 700 N).

(5) 对所有需要考虑的振型, 按式(14)计算其

$a_{i,\text{rms},m}^{(10\text{ s})}$, 然后按平方和开平方法对 $a_{i,\text{rms},m}^{(10\text{ s})}$ 进行组合, 如下所示:

$$a_{\Sigma,\text{rms},m}^{(10\text{ s})} = \sqrt{\sum (a_{i,\text{rms},m}^{(10\text{ s})})^2} \quad (15)$$

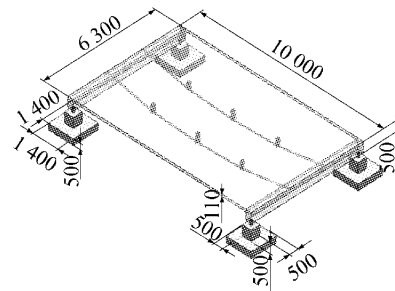
同理, 可得 $a_{\text{rms},m}^{(1\text{ s})}$ 和 a_m 对应的响应组合 $a_{\Sigma,\text{rms},m}^{(1\text{ s})}$ 和 $a_{\Sigma,m}$.

(6) 对于人群随机跳跃的情况, 可将前述反应谱值放大 \sqrt{N} 倍作为人群跳跃下的响应, 其中 N 为群体的人数. 对于人群协同跳跃的情况, 应根据协同性分析在 $\sqrt{N} \sim N$ 范围内选择合适的群体效应放大系数.

5 试验与实例验证

5.1 试验验证

为验证前述反应谱设计方法, 设计并建造了一个 10 m × 6 m 矩形体外预应力混凝土楼盖, 如图 10 所示. 楼盖实测前四阶竖向自振频率分别为 3.5, 6.2, 8.9, 13.2 Hz, 模态质量分别为 8 583, 2 587, 9 625, 2 423 kg, 阻尼比为 0.05. 在跨中点对该楼盖施加跳跃荷载 (见图 10), 采用加速度传感器同步记录楼盖不同位置的加速度响应用于比较, 详细试验情况及参数见文献[16].



a 楼盖模型



b 试验情况

图 10 楼盖模型及试验情况 (单位: mm)

Fig. 10 Model of floor and the experiment (unit: mm)

某测试者体重为 592 N, 分别在该楼盖中心点处完成了跳跃频率为 1.50, 1.75, 2.00, 2.25, 2.67, 3.00, 3.50 和 3.80 Hz 的试验, 试验中记录了楼盖中

心点处的加速度响应,经处理得到了该楼盖跨中点处 $a_{\Sigma,ms,m}^{(10\ s)}$ 实测值,见表 2.

表 2 楼盖 $a_{\Sigma,ms,m}^{(10\ s)}$ 实测值

Tab.2 Measured 10 s RMS acceleration response of the floor

项目	频率/Hz							
	1.50	1.75	2.00	2.25	2.67	3.00	3.50	3.80
$a_{\Sigma,ms,m}^{(10\ s)}$	1.76	4.73	1.75	1.28	1.13	2.10	5.89	3.27

按设计反应谱计算方法,分别计算了具有 95% 和 75% 保证率时楼盖的 10 s 加速度均方根值 $a_{\Sigma,ms,m}^{(10\ s)}$. 详细计算过程见表 3.

表 3 反应谱法计算楼盖 $a_{\Sigma,ms,m}^{(10\ s)}$ 的步骤

Tab.3 Procedures for calculating 10 s RMS acceleration response for the floor at mid-span

项目	楼盖模态			
	1	2	3	4
频率/Hz	3.52	6.16	8.97	13.19
模态质量/(10 ³ kg)	8.583	2.587	9.625	2.423
跨中模态	0.97	0	0	-0.22
95%保证率反应谱值	10.9	4.7	1.9	1.3
95%保证率反应谱模态响应/(%)g	7.5	0	0	0.7
95%保证率反应谱组合响应/(%)g	7.5	7.5	7.5	7.5
75%保证率反应谱值	9.2	3.6	1.5	1.0
75%保证率反应谱模态响应/(%)g	6.3	0	0	0.5
75%保证率反应谱组合响应/(%)g	6.3	6.3	6.3	6.3

图 11 对比了实测值和本文建议的反应谱方法计算值,结果表明试验楼盖在各跳跃频率下的实测响应均小于反应谱 75% 保证率时的预测值,对于其他不同体重测试者的对比结论相同,所建议的反应谱方法可以很好地预测楼盖在共振情况时的最大加速度反应,可用于跳跃荷载作用下楼盖振动舒适度评估问题,并建议保证率取为 75% 进行设计.

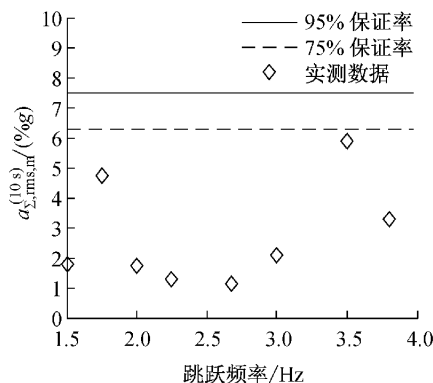


图 11 不同跳跃频率下楼盖实测响应与反应谱计算结果对比
Fig.11 Comparison of measured acceleration responses and predicted results for the floor

5.2 实例验证

为了进一步对设计反应谱进行验证,从文献中选取了另外三个楼盖 A^[17], B^[18], C^[19], 这些楼盖都

有单人连续跳跃荷载下的实测响应值. 表 4 给出了各楼盖的详细参数.

表 4 所选择的三块楼盖的详细参数

Tab.4 Structural parameters of the three selected floors

编号	楼盖类型	自振频率/Hz	阻尼比/%	模态质量/(10 ³ kg)	实测响应/(%)g
A	预应力混凝土楼盖	2.22, 2.82, 3.23, 4.13	3.00	891.00, 992.00, 898.00, 1 024.00 ($a_{\Sigma,ms,m}^{(10\ s)}$)	0.18
B	混凝土楼盖	4.40	0.59	6.50	55.1 ($a_{\Sigma,m}$)
C	试验筒易楼盖	4.00	4.00	0.18	210 ($a_{\Sigma,m}$)

将所选择的三个楼盖实测值和设计值绘于图 12. 由图可见,95% 保证率的反应谱设计值均大于实测值. 由于跳跃荷载的冲击效应以及响应峰值实测的偶然性,因此尽管楼盖 B 中的实测值大于 75% 保证率的反应谱计算值,考虑舒适度设计不同于承载力设计的特性,仍然可以采用 75% 保证率的标准,利用设计反应谱预测楼盖在单人跳跃荷载作用下的动力响应.

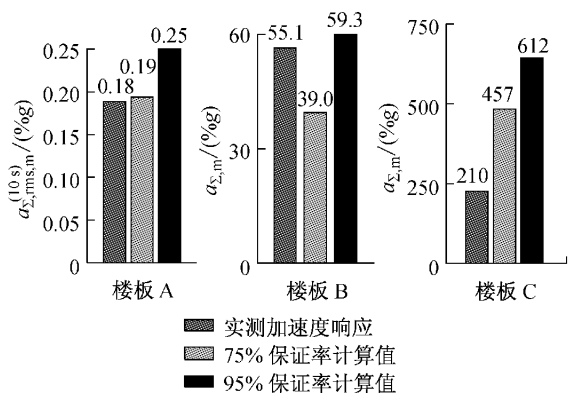


图 12 三个楼盖的实测响应与反应谱计算所得响应对比
Fig.12 Measured accelerations and calculated acceleration responses for all selected floors

6 结语

本文研究了单人跳跃激励下的大跨楼盖加速度响应的反应谱方法. 利用大量实测的单人连续跳跃荷载数据,计算每条荷载对应的加速度反应谱并在其基础上提出了设计反应谱的分段表达式,反应谱参数可根据给定的保证率和阻尼比确定. 进一步结合振型分解思想,给出了利用文中建议的反应谱公式计算楼盖动力响应的步骤,并实际用于预测一个试验楼板模型以及三个实际楼板结构的响应. 反应谱计算结果与实测结果的对比发现,共振条件下反

应谱方法 75%保证率时的预测值与实测响应接近,该反应谱方法可用于单人跳跃作用下的大跨楼盖动力响应计算。

参考文献:

- [1] Fujino Y, Pacheco B M, Nakamura S I, *et al.* Synchronization of human walking observed during lateral vibration of a congested pedestrian bridge [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1993, 22(9): 741.
- [2] Dallard P, Fitzpatrick T, Flint A, *et al.* London Millennium Bridge: pedestrian-induced lateral vibration [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2001, 6(6): 412.
- [3] Blekherman A N. Swaying of pedestrian Bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2005, 10(2): 142.
- [4] 陈隽,王玲,陈博,等. 跳跃荷载动力特性与荷载模型实验研究[J]. *振动工程学报*, 2014, 27(1): 16.
CHEN Jun, WANG Ling, CHEN Bo, *et al.* Dynamic properties of human jumping load and its modeling: experimental study [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2014, 27(1): 16.
- [5] Rogers D. Two more 'wobbly' stands [N]. *Construction News*, 2000-08-17.
- [6] Parker D. Rock fans uncover town hall floor faults [J]. *New Civil Engineer*, 2003, 20: 1531.
- [7] Murray T M, Allen D E, Ungar E E. Floor vibration due to human activity [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 1997.
- [8] Concrete Society. Post-tensioned concrete floors: design handbook [S]. Surrey: Concrete Society, 2005.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50010—2010 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [10] Willford M, Young P, Field C. Improved methodologies for the prediction of footfall-induced vibration[C]//Proceedings of the SPIE. San Diego: SPIE, 2005.
- [11] Ungar E E, Zapfe J A, Kemp J D. Prediction footfall-induced vibrations of floors[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 38(11): 16.
- [12] 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.
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.
- [13] 宋志刚,金伟良. 行走激励下大跨度楼盖振动的最大加速度响应谱方法[J]. *土木工程学报*, 2004, 25(2): 57.
SONG Zhigang, JIN Weiliang. Peak acceleration response spectrum of long span floor vibration by pedestrian excitation [J]. *Journal of Building Structures*, 2004, 25(2): 57.
- [14] Chen J, Xu R T, Zhang M S. Acceleration response spectrum for predicting floor vibration due to occupant walking [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2014, 333: 3564.
- [15] Ji T, Ellis B R. Floor vibration induced by dance-type loads: theory [J]. *The Structural Engineer*, 1994, 72(3): 37.
- [16] 刘伟. 大跨度张弦梁混凝土楼盖振动舒适度研究[D]. 上海: 同济大学, 2014.
LIU Wei. Vibration serviceability of long-span concrete floor using beam string structural system [D]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [17] 陆余年,任源. 甬台温铁路温州站结构设计[J]. *建筑结构*, 2011, 41: 532.
LU Yunian, REN Yuan. Structural design of Yong Tai Wen Railway Wenzhou station [J]. *Building Structure*, 2011, 41: 532.
- [18] Racic V, Brownjohn J M W, Pavic A. Reproduction and application of human bouncing and jumping forces from visual marker data [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329: 3397.
- [19] Yao S, Wright J R, Pavic A, *et al.* Experimental study of human-induced dynamic forces due to jumping on a perceptibly moving structure [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 296: 150.