

随机行走激励楼盖振动加速度反应谱*

张志强^{1,2}, 周晨^{1,2}, 张晓峰³, 李爱群^{1,4}

(1. 东南大学土木工程学院 南京, 210096)

(2. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室 南京, 210096)

(3. 美国堪萨斯州立大学建筑工程与施工学系 堪萨斯州, 66506)

(4. 北京建筑大学土木与交通工程学院 北京, 100044)

摘要 采用蒙特卡罗法生成大量移动的随机单人步行荷载曲线,在此基础上计算出 1 000 条竖向加速度均方根响应的反应谱曲线,并生成标准反应谱曲线模型。从实际工程入手,通过 3 个现场实测楼盖工程案例,验证标准反应谱曲线计算方法的可靠性,将标准反应谱法计算的理论与现场最不利工况测试的响应结果、有限元方法计算的理论值进行对比,结果吻合。标准反应谱法有助于获悉引起结构响应的主振型以及最大响应处的位置,对结构减振控制起到参考作用。所建议的反应谱方法可用于计算随机步行荷载作用下大跨楼盖的加速度响应。

关键词 随机人群激励; 蒙特卡罗法; 反应谱曲线; 大跨楼盖

中图分类号 TU352.1

引言

随着科学技术的发展,建筑越来越往大跨度低阻尼方向发展,随之产生的振动舒适度问题在工程设计中愈加显著^[1]。作为结构动力分析的主要方法之一,时域分析法主要研究承受复杂荷载作用下结构在时间历程上表现的动力响应。由于激励作用的步行荷载具有随机性,为了准确预测步行荷载作用下楼盖的振动响应,需有足够数量且精确的步行荷载样本曲线对结构人致振动响应进行仿真分析,然后统计并处理样本分析结果。在大量分析数据基础上最终建立楼盖振动加速度反应谱曲线,既可以避免以往单次时程分析产生计算结果误差,也可以提高计算效率。

Brownjohn 等^[2]从理论上提出并完整地建立人行桥人致振动谱分析方法,假设等自重的人群过桥时沿桥长均匀分布,采用抖振分析方法推导人行桥面任意位置处人致振动竖向位移响应谱。Ricciardelli^[3]通过试验研究创建了行人步行力功率谱,在此基础上结合随机振动理论,推导了均布行人步行力作用下的人行桥模态峰值加速度。钱晓斌^[4]大

量计算分析包括简支、多跨和 H 型等多种形式的结构,根据海量计算数据构造了均方根加速度响应谱。宋志刚等^[5]基于实测的有代表性的落步曲线,进行了大量的时程分析计算,分析最大加速度响应谱基于振型阶数、阻尼、跨度和边界条件下结构振动的敏感性,从而得出加速度响应谱的包络曲线。韩小雷等^[6]分析 4~14 Hz 范围的楼盖,定义行人随机开始时间、匀速行走、直线路径、体重服从 $N(0.7, 0.145)$ (kN) 正态分布的随机数据等,假定这些计算参数分布特性,生成随机步行荷载计算了人群行走下楼盖的振动响应,最终拟合了反应谱曲线。陈隽等^[7]基于 61 人次 2 04 条实测的步行荷载曲线,提出了计算单人步行竖向荷载作用下大跨度楼盖加速度均方根响应的反应谱,并基于楼盖频率与振动幅值双控原则,对计算反应谱进行了拟合简化,提出了 1~10 Hz 频率范围的设计使用楼盖均方根加速度响应计算表达式^[8]。

笔者精确模拟单人的随机行走工况,考虑了人行特点^[9],使用移动步行力法激励结构,通过蒙特卡罗法生成海量的考虑步行参数概率分布的随机单人步行荷载曲线,计算试验楼盖的加速度均方根响应的反应谱曲线。在此基础上拟合出了 10 Hz 频率

* 国家自然科学基金资助项目(51278106);国家自然科学基金重点资助项目(51438002);江苏省建设厅资助项目(JS2010JH14)

收稿日期:2019-05-06;修回日期:2019-07-25

范围以内楼盖的标准反应谱公式,形成楼盖振动响应的标准反应谱计算方法,比较计算理论值与实测楼盖响应值差异,联系实际工程验证反应谱计算方法的适用性。

1 随机步行荷载仿真数据生成

1.1 单人步行荷载

单人在正常行走时可用步频、步幅、双脚重叠时间等参数来描述行走特征。崔常慧^[10]从试验的角度出发,研究了单人步行荷载的影响参数及荷载模型,如图 1 布置步行测力板,通过压力测力板测试青年个体行走时产生的步行荷载,总共测试 20 000 余组数据,对自由行走工况下利用复步荷载拓展获得连续步行荷载曲线表示

$$F(t) = G[1 + \sum_{i=1}^{n_1} DLF_i \sin(2\pi i f_p t + \varphi_i) + \sum_{i=1}^{n_2} DLF_{subi} \sin(\frac{2i-1}{2} \pi f_p t + \varphi_{subi})] \quad (1)$$

其中: f_p 为行人步频(Hz); G 为行人的体重(N); DLF 为第 i 阶谐波分量的动载因子(dynamic load factor,简称 DLF); φ_i 为第 i 阶简谐荷载分量的相位角; DLF_{subi} 为竖向第 i 阶次谐波分量的动载因子; φ_{subi} 为第 i 阶次谐波分量的相位角; n_1, n_2 为所选取的主谐波和次谐波的阶数。



图 1 单人行走测试图

Fig. 1 Picture of single human walking test

公式参数选择按照表 1 取值。其中:体重试验分析根据实际体重取值;步频为 1.886 Hz。

1.2 单人步行路线设计

单人行走路径参考社会力模型^[11](social force model,简称 SFM)建模思路。行人基于现实需求,

表 1 单人步行荷载试验参数取值
Tab. 1 Parameters of individual walking test

主谐波 动载因子 (95%保证率)	设计值	相位角	次谐波 动载因子 (95%保证率)	设计值	相位角
DLF_1	$0.3004f_p$ -0.2496	$-\pi/3$	DLF_{sub1}	0.140	$\pi/6$
DLF_2	0.111	0	DLF_{sub2}	0.175	0
DLF_3	0.063	$-\pi/4$	DLF_{sub3}	0.083	0
DLF_4	0.047	0	DLF_{sub4}	0.035	0
DLF_5	0.033	0	DLF_{sub5}	0.022	0

在周围环境和个人目的驱使下,综合判断评估处理信息,选取合适的路径行动。单人行走时受自身驱动力及边界排斥作用力影响,行走的位移可利用微分方程求解,由此得出行走路径。自驱动力源于行人受预期目标吸引,同时又受到在运动过程中偏离本身期望运动方向速度的作用而产生的力。边界排斥力通过计算边界上到行人中心点最短距离的点,再通过公式计算得到^[12]。经计算,单人行走的路径表现为行人基本沿着直线行走,走到边界掉头,根据重新定义的新的行走目标继续行走,如此来回。假设质量为 m_i 的行人受到力的推动,得出行人所受力的微分方程式(2),加速度为位移的两阶导数,结合时间步求解可以得到下一个时间步行人 i 的位置

$$\begin{cases} m_i \frac{d v_i(t)}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t) e_i^0 - v_i(t)}{\tau_i} + \sum_w f_{iw} \\ v_i = dp_i/dt \end{cases} \quad (2)$$

其中: m_i 为行人 i 的体质量; p_i 为行人 i 的位移; e_i^0 为行人在时刻 t 朝运动目标移动的方向; v_i^0 为行人期望的速率; τ_i 为人们的反应时间; $\sum_w f_{iw}$ 为边界对行人的作用力。

计算各个时刻行人的空间位置,分析行人随机行走引起的空间分布随机性对结构振动响应的影响。

1.3 Matlab 编程实现单人随机行走过程

单人随机行走需模拟实际移动行走的形态,不仅是频率、相位,还包括行走位置、行走方向等。笔者采用 Matlab 软件编程生成随机步行荷载加载至结构计算结构响应。

根据 SAP2000 有限元软件划分网格的特点,以及国内相关规范对我国成年人尺寸做的统计,将行人简化长轴约为 0.4 m、短轴约为 0.2 m 的椭圆体^[13],划分成 0.4m×0.4m 的网格。计算的行走路线将行人荷载加载作用位置投射至最近的网格点。单人行走单步作用点都落于于图 2 楼盖各个编点处,行人随机行走整个过程即为楼盖各个编号点的

受力过程,整个随机行走即是楼盖各点不同时间的受力,统计每个编号点在整个行走过程总时间段的时程荷载曲线,形成 $M \times N$ 人行荷载矩阵。程序编程思路^[14-15]如图 3 所示。

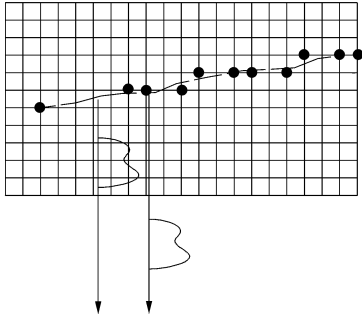


图 2 行人行走路线及楼盖受力点示意图
Fig. 2 Number of floor point

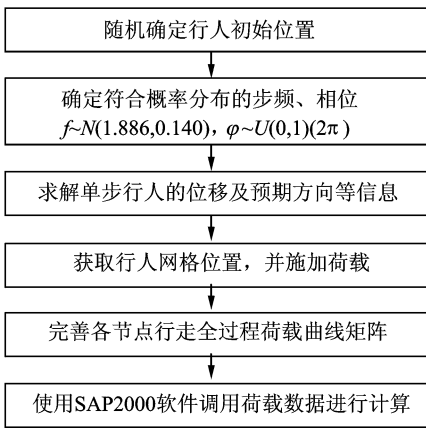


图 3 程序实现随机行走的流程图

Fig. 3 Flow diagram of random walk realized by programs

对于任意频率的结构,模拟楼盖振动响应分析,样本的置信度为 0.95,对于指定误差 $\epsilon = 0.0055$,最终模拟抽样的次数 n 取值为 1 000。

2 随机步行荷载激励下楼盖反应谱曲线生成

人行走作用下的矩形薄板,在沿长度(宽度)方向走动引起的振动微分方程^[16]可以表达为

$$D[\nabla^2 \nabla^2 W(x, y) + \chi \nabla^2 \nabla^2 (\frac{\partial W(x, y)}{\partial t})] + \rho h \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^N \delta[x - (k-1)\Delta L] \times \delta(y - y_0) \bar{f}[t - (k-1)t_s] \quad (3)$$

其中: ∇^2 为二阶微分算子; D 为板的弯曲刚度; $W(x)$ 为板的挠曲面函数; h 为厚度; χ 为黏滞阻尼

系数; ρ 为材料密度; t 为时间; N 为人在结构上开始走动的步数; L 为步幅。

$\delta(\cdot)$ 函数定义为

$$\delta(\cdot) = \begin{cases} 0 & (\bar{x} \neq 0) \\ 1 & (\bar{x} = 0) \end{cases} \quad (4)$$

$\bar{f}[t - (k-1)t_s]$ 是第 k 步的作用力

$$\bar{f}[t - (k-1)t_s] = \begin{cases} f(\tau) & (0 \leq \tau = t - (k-1)t_s \leq t_e) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (5)$$

其中: t_e 为人的脚部跟楼地面接触的时间; t_s 为步频的倒数; $f(\tau)$ 为单步落足曲线。

由板壳振动理论公式得出,第 j 振型可表达为

$$\varphi_j(x, y) = p_j(x) g_j(y) \quad (6)$$

其中: $p_j(x), g_j(y)$ 分别为 $[0, a], [0, b]$ 这两个区间内 x 与 y 方向的振型,在其定义范围内这两个方向的振型的最大值为 1。

考虑在其中的一个方向上走动,薄板的强迫振动方程如式(3)所示,进行振型分解,得到

$$\begin{aligned} \ddot{Y}_j(t) + 2\omega_j \xi_j \dot{Y}_j(t) + \omega_j^2 Y_j(t) = & \frac{1}{M_j} \int_0^a \int_0^b \sum_{k=1}^N \delta[x - (k-1)\Delta L] \delta(y - y_0) \times \\ & \bar{f}[t - (k-1)t_s] \varphi_j(x, y) dx dy = \\ & \frac{1}{M_j} \sum_{k=1}^N \bar{f}[t - (k-1)t_s] p[(k-1)\Delta L] = \frac{1}{M_j} F_j \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $F_j = \sum_{k=1}^N \bar{f}[t - (k-1)t_s] p[(k-1)\Delta L]$ 。

F_{jr} 为 $F_j(t)$ 的最大绝对值,即 $F_{jr} = \max |F_j(t)|$ 。

式(7)可以表示为

$$\ddot{Y}_j(t) + 2\omega_j \xi_j \dot{Y}_j(t) + \omega_j^2 Y_j(t) = \frac{F_{jr}}{M_j} \bar{F}_j(t) = a_{jref} \bar{F}_j(t) \quad (8)$$

其中: $\bar{F}_j(t) = F_j(t)/F_{jr}$, 为第 j 振型的激励曲线; $a_{jref} = F_{jr}/M_j$, 为第 j 振型参考加速度。

将微分方程定义的振动系统转化为标准激励系统

$$\ddot{z}_j(t) + 2\omega_j \xi_j \dot{z}_j(t) + \omega_j^2 z_j(t) = \bar{F}_j(t) \quad (9)$$

将 $S_{jmax}(\omega)$ 定义为标准激励系统下的加速度响应的最大绝对值

$$S_{jmax}(\omega) = \max(|\dot{Y}_j(t)|) \quad (10)$$

$$\max(|\dot{Y}_j(t)|) = a_{jref} S_{jmax}(\omega_j) \quad (11)$$

由式(9,10)求出的 $S_{max}(\omega)$ 随 ω 变化,生成第 j 振型的最大加速度响应谱曲线。通过 $S_{jmax}(\omega)$ 曲线可求解边长为 $a \times b$ 的所有简支矩形楼盖的第 j 振型加速度响应最大绝对值 $\max(|\dot{Y}_j(t)|)$, 连

续改变 ω 的值生成一组 $S_{j\max}(\omega)$ 曲线,最终得出曲线的外包络图。

分析式(9)给出的标准激励系统,该系统的响应结果只和步行荷载曲线的表达形式有关,而与行人的体重、结构振型质量无关,因此可基于式(9)计算出加速度反应谱。笔者给出的步骤为:a. 使用蒙特卡罗法^[17]随机生成基于单人行走模型及行走特点的步行荷载曲线;b. 计算加速度响应时程 $\ddot{z}_j(t)$; c. 得出楼盖频率与 10 s 加速度均方根值反应谱曲线;d. 研究反应谱曲线与阻尼比的相关关系。

3 标准反应谱生成

3.1 反应谱曲线计算

使用 SAP2000 建立四边简支的广义单自由度试验楼盖。建立楼盖模型,楼盖的主振型频率范围为 1~10 Hz,不同振型的楼盖以 0.1 Hz 为增量依次递增。在楼盖上施加随机单人步行荷载仿真曲线,计算主振型从 1~10 Hz 楼盖结构的加速度响应值,得出 1 条反应谱曲线。图 4 为某次单人随机行走的反应谱曲线,频率为 2.2 Hz,阻尼比为 0.01,图中标出步频及其倍频的位置。分析阻尼比为 0.01 的结构在 1 000 次随机步行荷载时的加速度时程响应。由于人在结构上的耐受极限与时长有关,持续时间越长相应的耐受极限也会降低,因此考虑采用均方根(root mean square,简称 RMS)加速度作为代表值可以兼顾时间这一变量,最终确定将 10s 的均方根值作为结构响应分析的代表值。图 5 为某测试者 2.2 Hz 随机步行荷载得到的 0.01~0.05 阻尼比下 10 s 加速度均方根值反应谱曲线。1 000 次随机单人步行荷载 10s 加速度均方根值的反应谱曲线如图 6 所示,图 7 为其外包络曲线。

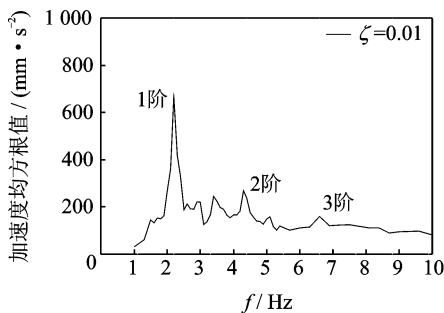


图 4 2.2 Hz 随机行走激励楼盖加速度均方根反应谱曲线
Fig. 4 RMS response spectrum curve of acceleration under 2.2 Hz stochastic crowd load

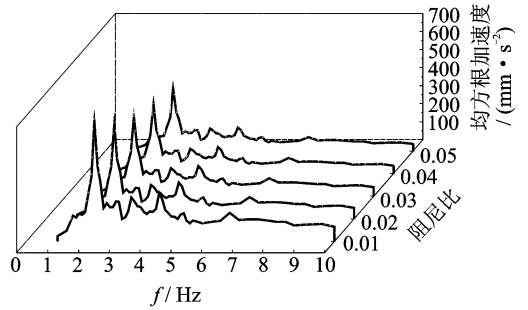


图 5 2.2 Hz 随机行走激励不同阻尼比反应谱曲线
Fig. 5 Spectrum curve of floors with different damping ratio under 2.2 Hz stochastic crowd load

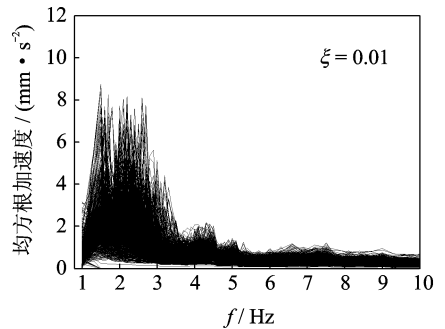


图 6 10 s 均方根加速度反应谱图
Fig. 6 RMS response spectrum curve of 10 s

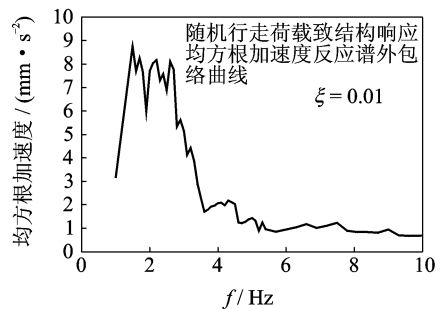


图 7 10 s 均方根加速度反应谱外包络曲线
Fig. 7 RMS response spectrum envelope curve of 10 s

3.2 反应谱曲线形式的确定

由于每个人行走的频率、相位与路线均有差异,因此每一个测试样本的加速度反应谱曲线均不同,而取所有样本的加速度反应谱曲线的外包络线可以反映出结构针对测试者施加所有工况的最大响应。

笔者研究的随机步行荷载考虑频率、相位、路线的随机性生成大量移动的随机步行荷载曲线。本研究计算 1 000 条响应谱曲线的包络曲线见图 7,考虑到计算方便以及曲线模型的直观性,采用反应谱的模型包含上升段、水平平台段以及下降段。从 1 000 条均方根响应谱曲线可看出:结构自振主频率在 0.7~1.5 Hz 区间内,曲线为直线上升段;1.5~2.5 Hz 区间,均方根加速度曲线在平台附近上下波动,整体趋于平稳;2.5~3 Hz 为直线下降段;3~10 Hz 曲线是

一个下降至平稳的趋势。笔者计算得出的基于随机步行荷载下结构的加速度反应谱如图 8 所示。

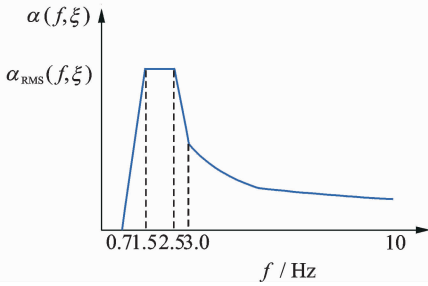


图 8 单人随机行走激励的 10 s 均方根加速度反应谱曲线模型

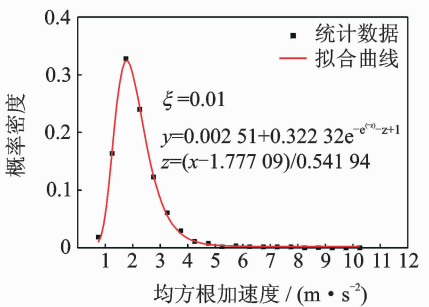
Fig. 8 A 10s RMS acceleration response spectrum model under single random walking excitation

3.3 反应谱曲线计算

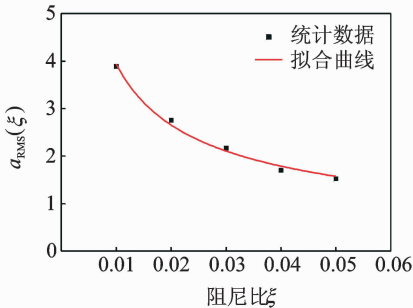
根据式(8),对计算的均方根响应值进行归一化模拟时,根据归一化的均方根加速度响应谱曲线按照图 8 的 3 段曲线形式反应谱模型确定参数取值。

3.3.1 平台参数的确定

根据已经计算得出的平台段内加速度幅值的概率分布特性,可以求解并确定平台段的设计值。统计 1.5~2.5 Hz 区间内 10s 均方根加速度的概率分布,按从小到大分为若干区间,对每个区间频数进行统计,对统计结果进行概率密度曲线的拟合。图 9



(a) $\xi=0.01$



(b) $a_{RMS}(\xi)$ 与阻尼比 ξ 的拟合曲线

(b) Fitted curve between $a_{RMS}(\xi)$ with ξ

图 9 基于极值概率分布的平台段 $a_{RMS}(\xi)$ 取值统计特性

Fig. 9 Statistical properties of $a_{RMS}(\xi)$ at platform based on extreme probability distribution

为阻尼比 0.01~0.05 结构平台段的统计特性,其幅值符合最大 I 型极值分布,通过数值求解法计算出 95% 和 75% 保证率下的加速度均方根值分位点。

分析不同结构阻尼比 ξ 与均方根分位点的关系,最终得到 a_{RMS} 的计算式及 $a_{RMS}(\xi)$ 与阻尼比 ξ 的拟合曲线,如表 2 所示。

3.3.2 下降段参数的确定

曲线下下降段基于平台段的数值 $a_{RMS}(\xi)$,采用的函数形式为

$$\alpha(f, \xi) = a_{RMS}(\xi) \alpha f^\beta \quad (12)$$

其中: f 为结构频率。

各阻尼比的结构统一取值如下

$$a_{RMS} = 0.6 a_{RMS}(\xi) (3/f)^{1.226} \quad (13)$$

表 2 基于保证率加速度均方根值的的分位点取值及 $a_{RMS}(\xi)$ 拟合曲线

阻尼比	95% 保证率加速度均方根值分位点	75% 保证率加速度均方根值分位点
0.01	3.89	2.53
0.02	2.76	1.93
0.03	2.17	1.58
0.04	1.70	1.35
0.05	1.53	1.22
拟合曲线	$a_{RMS}(\xi) = 0.286 2\xi^{-0.569 1}$	$a_{RMS}(\xi) = 0.326 9\xi^{-0.446 4}$

3.4 标准反应谱曲线表达式

给出基于保证率的设计反应谱见式(14),对应如图 10 所示,平台段取值按表 2 计算。其中:95% 保证率下的 $a_{RMS}(\xi) = 0.286 2\xi^{-0.569 1}$;75% 保证率下的 $a_{RMS}(\xi) = 0.326 9\xi^{-0.446 4}$ 。

$$\alpha(f, \xi) = \begin{cases} 0 & (f \in (0, 0.7 \text{ Hz}]) \\ \frac{f - 0.7}{0.8} a_{RMS}(\xi) & (f \in (0.7, 1.5 \text{ Hz}]) \\ a_{RMS}(\xi) & (f \in (1.5, 2.5 \text{ Hz}]) \\ a_{RMS}(\xi) (3 - 0.8f) & (f \in (2.5, 3 \text{ Hz}]) \\ 0.6 a_{RMS}(\xi) \left(\frac{3}{f}\right)^{1.226} & (f \in (3, 10 \text{ Hz}]) \end{cases} \quad (14)$$

3.5 基于保证率的反应谱曲线

笔者通过模拟出大量随机人群行走的结构响应反应谱曲线,分别基于 95% 和 75% 的保证率求得平台段参数 a_{RMS} 的取值。基于模型曲线的假设与研究方法,所给出的反应谱曲线模型在 95% 保证率下与一些工程楼盖实测结果相吻合,能较好地预测楼

盖响应。图 10 中实心点为一些实际工程的实测结果。笔者将 95% 的保证率计算得出的平台参数应用于标准反应谱曲线模型。

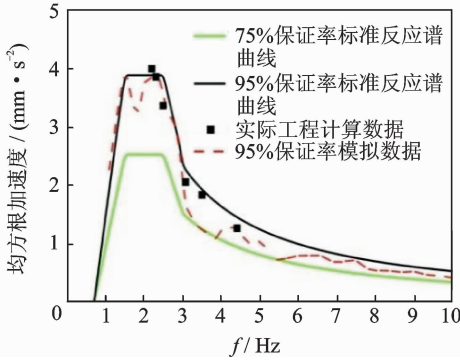


图 10 反应谱曲线模型与实测值的比较

Fig. 10 Comparison between response spectrum curve model values with measured values

3.6 标准反应谱曲线影响参数

反应谱曲线影响参数取值,笔者总结相关研究的结论^[4-8]列出如下:a.不同边界条件反应谱曲线数值影响程度较小,采用四边简支边界的结构计算所得的标准反应谱,可以简化结构计算;b.跨度对结构响应的影 响通过跨度调整系数,经计算,对于阻尼比 0.01 结构, $\eta = 1 + 0.06(L - 8)$,对于阻尼比 0.05 结构, $\eta = 1 + 0.024(L - 8)$, L 为楼盖长边跨度,其他阻尼比按照插值计算;c.阻尼比的影响在反应谱曲线公式中进行调整。

3.7 标准反应谱法计算步骤

笔者运用反应谱方法计算楼盖竖向加速度响应,其步骤如下。

1) 采用有限元方法或者实测方法计算得出楼盖的竖向主频率 f_i 及竖向主振型参与质量 M_i ,其中下标 i 表示楼盖第 i 阶振型。

2) 确定结构阻尼比后按照式(14)计算每阶竖向主振型对应的单人随机行走作用下 10s 均方根加速度反应谱值。

3) 按下式计算第 i 阶振型对应的 10 s 均方根加速度响应

$$a_{i,RMS} = \eta \varphi_{i,1} \varphi_{i,2} a(f_i, \xi_i) \frac{G}{M_i} \quad (15)$$

其中: $\varphi_{i,1}$ 为响应验算点第 i 阶振型值; $\varphi_{i,2}$ 为行走路线上对应的第 i 阶振型值; G 为行人体重; M_i 为对应主振型模态质量; η 为楼盖跨度调整系数。

4) 第 i 阶振型对应的峰值加速度^[7]为

$$a_{i,max} = 2a_{i,RMS} \quad (16)$$

5) 峰值加速度响应按下式进行计算

$$a_{max} = \sqrt{\sum a_{i,max}^2} \quad (17)$$

4 工程应用评估

4.1 现浇试验楼盖实测案例 1

试验楼盖平面尺寸为 5 000 mm × 8 000 mm,混凝土等级为 C30。相应前 3 阶模态数值如表 3 所示。结构阻尼比无人时为 0.01。将有限元模型与楼盖结构实测的主振型频率对比,数据契合,说明有限元模型模拟可靠,可做进一步研究分析。

表 3 Sap2000 模态分析结果

Tab. 3 Modal analysis results of Sap2000

阶数	振型频率/Hz	实测频率/Hz	误差/%
第 1 阶	4.54	4.63	-1.83
第 2 阶	8.98	8.60	4.12
第 3 阶	11.07	11.89	-6.78

经研究,1 阶主振型为 4.6 Hz。跨中最大响应只由第 1 阶主振型控制,采用式(15)给定公式计算,楼盖主振型的模态质量经有限元计算为 6 551 kg,修正计算跨度,最大响应处振型值 $\varphi_{i,1}$ 为 1,行走路线经过结构最大响应处,行走路线上对应的第 i 阶振型值 $\varphi_{i,2}$ 最大也为 1。单人行走,结构阻尼比取 0.01。

采用传统有限元方法数值模拟,在结构主振型最大响应区域布置移动的固定频率荷载,行走工况包括 1.5 Hz(引起结构 3 阶共振)、2.0 Hz(对照工况)、2.3 Hz(引起结构 2 阶共振)。

楼盖试验测试时,单人按照 1.5、2.0 和 2.3 Hz 的节拍器在楼盖上行走,测试中发现楼盖跨中的振动响应最大。测试人员体重约为 620 N,在试验楼盖纵向来回行走,1 次测试时间为 1 min,总共测试 20 次。每次数据取最大响应值,最终测试值取 20 次最大响应值的平均值。

计算结果如表 4 所示,有限元模拟时,1.5 和 2.3 Hz 分别引起结构的 3 阶与 2 阶共振,结构响应计算值均比较大,其中 2.3 Hz 荷载工况下,跨中最大响应值达到 293.5 mm/s²。测试行走时,行人按照 2.3 Hz 节拍行走的结构响应测试在跨中处响应值最大,达到 245.0 mm/s²,不过 1.5 Hz 行走的行人并未激发结构的 3 阶共振,1.5 Hz 行走有限元模拟值与实测误差较大。使用反应谱法求解由于已经考虑最不利,最大响应值为 268.7 mm/s²,与测试值

误差仅为 9.6%。从试验楼盖的实测数据显示,笔者给出的反应谱曲线能较好地反映楼盖的振动响应,也说明本研究给出的响应谱曲线模型有效可靠。

表 4 各工况下不同计算方法与试验结果对比

Tab. 4 Comparison between the theoretical values of different calculation methods with test results under different working conditions

工况	1.5 Hz	2.0 Hz	2.3 Hz	最大响应	对比实测误差值/%
有限元模拟值/($m \cdot s^{-2}$)	281.4	160.9	293.5	293.5	19.80
测试响应值/($mm \cdot s^{-2}$)	167.7	172.3	245.0	245.0	—
反应谱计算值/($m \cdot s^{-2}$)	268.7	268.7	268.7	268.7	9.67

误差 = (计算值 - 实测值) / 实测值

4.2 大跨楼盖现场实测案例 2

以闵行生态博物馆大跨悬挑楼盖为例,将现场最不利工况测试的响应结果与有限元模拟的数值结果、反应谱方法计算的理论值进行对比,分析反应谱法与实际工程结果的契合程度。

钢梁组合楼盖承担楼面荷载,楼盖悬挑长度为 16 m,经计算,楼面竖向主振型分别为 3.4 和 4.4 Hz。楼盖主振型实测与理论数值及相应楼盖阻尼比如表 5 所示。图 11 中有限元模拟的前 2 阶振型与实测结果十分接近,振型形状十分吻合,楼盖计算阻尼比取 0.025。

表 5 2 楼楼盖前 2 阶竖向频率计算理论值与实测值对比

Tab. 5 Comparison between calculated value and measured value of the second floor's vertical frequency of the first 2 orders

竖向振型阶数	竖向频率/Hz		误差/%	实测阻尼比/%
	理论值	实测值		
1	3.38	3.37	0.30	2.50
2	4.30	4.45	3.49	2.47

现场实测是单人来回行走,行走区域集中在楼盖的跨中部位,即图 11 中 2 处部位。楼盖的前 2 阶主振型分别为 3.4 与 4.5 Hz。经理论计算与实测发现,行人以 1.7 与 2.2 Hz 行走时,楼盖的振动响应较大,行走激励激发楼盖前 2 阶振型的 2 阶共振。经测试,最大响应主要集中在第 1、第 2 阶振型的最大振幅处,即图 11 中的 1 和 2 处。测试时行人听从节拍器的拍声行走,在楼盖上布置传感器测试结构响应值。采用传统有限元方法数值模拟,在楼盖的

跨中区域布置移动的固定频率荷载,荷载频率与测试工况相同。表 6 中分别给出楼盖结构 1 和 2 处 1 阶、2 阶振型的加速度反应谱值,由式(17)可得结构峰值加速度响应与各个竖向主振型反应谱值相关。计算显示 2 处结构反应谱值要高于 1 处。

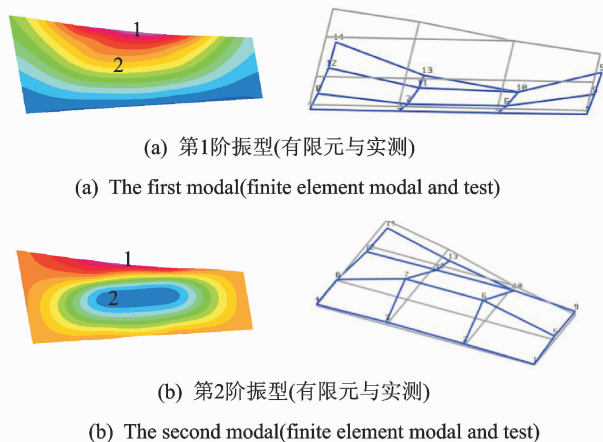


图 11 楼盖动力特性测试测点编号图

Fig. 11 Measuring points for dynamic characteristics of floor

在实测中,当行人以 1.7 Hz 节拍行走时 1 处响应最大,当行人以 2.2 Hz 节拍行走时 2 处响应最大,这个测试结果与有限元计算出来的模拟结果吻合。2.2 Hz 行走时 2 处的响应值略高于 1.7 Hz 行走时 1 处,测试结果、有限元模拟、反应谱计算都能得出这个结论。考虑 2 处位于结构跨中,而 1 处位于边缘,因此工程分析中尤其需要考虑 2.2 Hz 行走产生的舒适度问题。这说明反应谱分析有助于得出引起结构较大响应的主振型以及最大响应处的位置,这对结构减振控制起到参考作用。两种不同方法计算最大响应值与实测峰值之间的误差分别为 14.57% 和 5.98%,误差均很小,这也说明反应谱曲线法计算结构响应具有重要且可靠的参考价值。

表 6 大跨楼盖反应谱法计算与有限元法及实测数值对比
Tab. 6 Comparison between response spectrum method values with finite element method values and measured data

项目	试验最不利工况测试值	有限元最不利工况计算值	反应谱峰值加速度响应
1 处结构响应值/($mm \cdot s^{-2}$)	14.95 (1.7 Hz 工况)	18.79 (1.7 Hz 工况)	19.85
2 处结构响应值/($mm \cdot s^{-2}$)	21.40 (2.2 Hz 工况)	24.52 (2.2 Hz 工况)	22.68
最大响应与实测误差/%	—	14.57	5.98

4.3 大跨楼盖现场实测案例 3

武汉大学万林艺术博物馆建筑北侧为悬挑结构,最大悬挑长度约为 41 m。建筑物东西外表面内侧各设置一榀悬挑钢桁架,桁架支承在 1.2 m 厚的型钢混凝土墙上。楼盖结构竖向 1 阶主振型(图 12)理论值为 3.01 Hz,实测振型为 3 Hz,结构实测阻尼比为 2.6%。

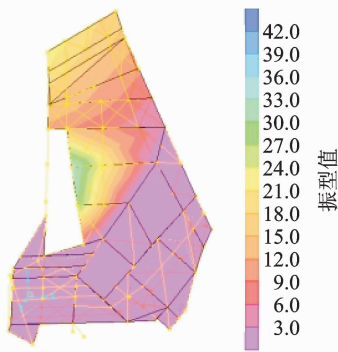


图 12 楼盖结构主振型

Fig. 12 Main mode of the floor

行走范围布置在楼盖振动响应最大区域,如图 13 所示。荷载频率采用 1.5 Hz(激发结构主振型)和 2.0 Hz(参考工况),行人听从节拍器的拍声行走,在楼盖上布置传感器测试结构响应值。采用传统有限元方法数值模拟,在楼盖的跨中区域布置移动的固定频率荷载,荷载频率与测试工况相同,在主振型最大振幅处布置拾振器测量加速度,同时采用反应谱法计算该点加速度响应值。

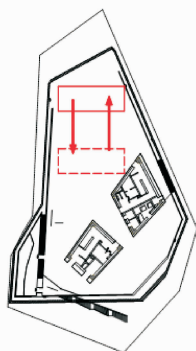


图 13 楼盖上行人行走区域

Fig. 13 Pedestrian walking area on the floor

从表 7 中可以看出,1.5 Hz 步频荷载下结构响应高于 2.0 Hz,行走激发结构的 2 阶共振,有限元模拟值与测试响应值吻合,同时有限元模拟与反应谱计算的结果均接近实测响应,反应谱方法计算有一定的可靠性。

表 7 各工况下不同计算方法与试验结果对比

Tab. 7 Comparison between theoretical values of different calculation methods with test results under different working conditions

工况	1.5 Hz	2.0 Hz	最大响应	对比实测误差值/%
有限元模拟值/ (mm · s ⁻²)	18.96	13.49	18.96	25.3
测试响应值/ (mm · s ⁻²)	15.13	10.26	15.13	—
反应谱计算值/ (mm · s ⁻²)	19.48	19.48	19.48	28.7

总结 3 个现场实测的工程案例,将单人行走的实测最大响应值与有限元模拟的行人荷载响应值、反应谱计算的振幅最大处响应值进行对比,结果见图 14。采用反应谱计算的公式与有限元分析大致吻合,与实测响应误差基本在 20% 左右。加速度反应谱方法可以作为工程结构振动响应计算的参考方法。

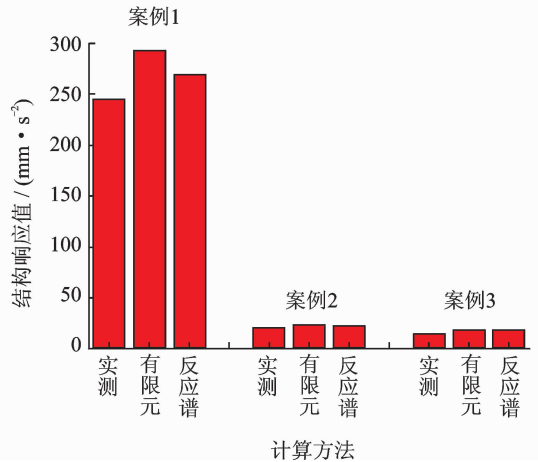


图 14 3 个工程案例不同计算方法结构响应值对比

Fig. 14 Comparison of structural response values of three engineering cases using different calculation methods

5 结束语

当实际工程中研究步行荷载下楼盖的振动响应时,反应谱计算方法可以较快及较精确地计算得出结构的最大响应位置及响应值,用于结构减振分析。笔者模拟行人随机行走时,采用蒙特卡罗法生成大量基于概率分布的移动随机步行荷载曲线,在此基础上计算得出楼盖标准加速度反应谱曲线模型。通过 3 个楼盖结构现场的实测案例,将研究的反应谱模型计算与有限元模拟计算、现场实测之间的结果进行对比,数值基本吻合,验证了反应谱计算方法的

可靠有效。该反应谱计算方法应用于实际工程中,有助于获得引起结构较大响应的主振型以及最大响应的位置,对结构减振控制起到参考作用。同时反应谱方法计算值与实测数据误差较小,可供大跨混凝土楼盖振动舒适度的设计和结构振动评估应用。

参 考 文 献

- [1] 马斐,张志强,李爱群. 大跨钢楼盖人群荷载激励下减振控制分析[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(3): 514-520.
Ma Fei, Zhang Zhiqiang, Li Aiqun. Vibration control analysis of large-span steel structure floor under crowd load[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(3): 514-520. (in Chinese)
- [2] Brownjohn J M W, Pavic A, Omenzetter P. A spectral density approach for modeling continuous vertical forces on pedestrian structures due to walking[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2004, 31(1): 65-77.
- [3] Ricciardelli F. Lateral loading of footbridges by walkers [C] // In Footbridge 2005-Second International Conference. Venice: [s. n.], 2005: 1-10.
- [4] 钱晓斌. 行走作用下结构振动的响应谱分析方法及人群作用分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [5] 宋志刚, 金伟良. 行走作用下梁板结构振动舒适度的烦恼率分析[J]. 振动工程学报, 2005(3): 288-292.
Song Zhigang, Jin Weiliang. Vibration serviceability analysis for a footbridge under stochastic pedestrian and a new method for conform evaluation[J]. Journal of Vibration Engineering, 2005(3): 288-292. (in Chinese)
- [6] 韩小雷, 陈学伟, 毛贵牛, 等. 基于人群行走仿真的楼板振动分析方法及反应谱公式推导[J]. 建筑科学, 2009, 25(5): 4-9.
Han Xiaolei, Chen Xuewei, Mao Guiniu, et al. Research on analysis method for floor vibration and formula derivation of response spectra based on simulation of crowd walking[J]. Building Science, 2009, 25(5): 4-9. (in Chinese)
- [7] 陈隽, 叶艇, 彭怡欣. 行走激励下楼盖振动加速度反应谱研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(24): 1-7.
Chen Jun, Ye Ting, Peng Yixin. Acceleration response spectrum of a long span floor under human walking load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(24): 1-7. (in Chinese)
- [8] 徐若天, 陈隽, 叶艇, 等. 大跨度楼盖步行荷载作用的加

速度反应谱研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(4): 133-140.

Xu Ruotian, Chen Jun, Ye Ting, et al. Acceleration response spectrum for predicting floor vibration due to occupant walking [J]. Journal of Building Structure, 2015, 36(4): 133-140. (in Chinese)

- [9] 孙广俊, 李爱群, 黄镇, 等. 首都机场 AMECO-A380 机库动力特性测试与分析[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(2): 158-162.
Sun Guangjun, Li Aiqun, Huang Zhen, et al. Test and analysis of dynamic characteristic of AMECO-A380 maintenance hangar in Beijing Capital Airport [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(2): 158-162. (in Chinese)
- [10] 崔常慧. 随机人群荷载的模拟及大跨楼盖人致振动响应分析 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [11] 史贺旺. 基于社会力模型的穿越瓶颈行人流行为与策略研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2014.
- [12] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic [J]. Nature, 2000(407): 487-490.
- [13] GB/T 10000—1988 中国成年人人体尺寸[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [14] 周晨. 随机人群荷载下大跨楼盖振动响应分析 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [15] 周晨, 张志强, 张晓峰, 等. 人群荷载下楼盖结构随机振动分析方法与试验研究[J]. 振动工程学报, 2019, 32(1): 37-48.
Zhou Chen, Zhang Zhiqiang, Zhang Xiaofeng, et al. Analysis and experimental research of floor structure random vibration under crowd load [J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(1): 37-48. (in Chinese)
- [16] 曹志远. 板壳振动理论[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989: 36-38.
- [17] 徐钟济. 蒙特卡罗方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985: 15-20.



第一作者简介: 张志强, 男, 1969年7月生, 博士、副教授。主要研究方向为振动控制和结构抗震(风)设计与分析、大跨结构设计与理论、健康监测等。曾发表《大跨度钢桁架—压型钢板混凝土组合楼盖实测及舒适度参数分析》(《建筑结构学报》2016年第37卷第6期)等论文。
E-mail: zzzq1969@seu.edu.cn

