

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.06.010

大跨度楼盖结构在运动荷载下的振动性能

杨维国¹, 马伯涛², 宋毛毛², 王 树², 孙新阳¹, 王 萌¹, 葛家琪²

(1.北京交通大学 土木建筑工程学院, 100044 北京; 2.中国航空规划设计研究总院有限公司, 100120 北京)

摘要:为研究人员运动荷载下大跨度楼盖的振动特性,以内蒙古伊旗全民健身体育中心大跨度张弦梁楼盖体系为背景,采用生物力学测力平台进行人员行走、跑步、跳跃、起立等运动荷载实测和相关分析研究.考虑可能出现的各种运动荷载工况,对大跨度张弦梁楼盖区振动开展有限元分析和现场实测.分析表明:行走、跑步及跳跃荷载工况下,人员动力放大系数分别约为1.2、2.4及4.9,大跨度楼盖在人员运动荷载数值模型激励下,所得有限元分析结果与现场实测竖向加速度峰值及理论计算值吻合较好.

关键词:大跨度钢结构;楼盖;人员运动荷载;振动;有限元分析

中图分类号: TU393.3; TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)06-0064-06

Vibration characteristic of large span floor structure under moving load

YANG Weiguo¹, MA Botao², SONG Maomao², WANG Shu², SUN Xinyang¹, WANG Meng¹, GE Jiaqi²

(1.School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 100044 Beijing, China; 2.China Aviation Planning and Design Institute Co., Ltd., 100120 Beijing, China)

Abstract: To explore vibration characteristic of large span floor structure under moving load, based on the large span beam string floor structure of the National Fitness Center in Ejin Horo Banner, Inner Mongolia, the loading measurement and analysis of walking, running, jumping and standing up were conducted by using biomechanical force measuring platform. Considering all kinds of possible load condition, the finite element analysis (FEA) and field measurement were performed for vibration of large span beam string structure floor area. The results show that the dynamic magnification factor of walking, running and jumping is 1.2, 2.4 and 4.9 respectively. The FEA results of large-span floor vertical acceleration induced by pedestrian load excitation are in good agreement with field measurement results and theoretical calculation values.

Keywords: large span steel structure; floor; pedestrian load; vibration; finite element analysis

近年来,多层大跨度空间结构在工程中得到广泛应用,大跨楼盖结构不断涌现.随着楼盖跨度的增大,其竖向自振频率将会降低,一般大跨度楼层钢结构的竖向自振频率不超过3 Hz.当结构自振频率与人步行或其他运动频率接近时,人员易与楼层结构发生共振^[1-2],致使楼层结构竖向振动超出人能够接受的程度^[3-5].在大跨空间结构楼盖上设置运动比赛场,如果楼盖振动超标,会影响观众的舒适度和运

动员水平的正常发挥.考虑到结构楼盖系统建成后若发生舒适度超标问题,事后修补的技术难度高、成本大.因此大跨度楼盖结构在设计时应充分考虑其在人行荷载作用下的振动舒适度问题^[6].

本文在对人员运动荷载进行现场实测的基础上,得到包括人行走、跑步、跳跃等工况下的建议设计荷载模型.针对内蒙古伊金霍洛旗全民健身体育活动中心工程,对其大跨度楼盖区运动人员激励下的振动进行现场实测;同时利用ANSYS进行有限元分析,对比有限元分析与实测结果,验证人员运动荷载模型和楼盖结构模型的正确性,明确了大跨度楼盖区在人行荷载作用下的动力特性,研究流程见图1.

收稿日期: 2015-05-05.

基金项目: 国家自然科学基金(51578046, 51178041); 中国航空规划设计研究总院有限公司资助项目(技13研-51).

作者简介: 杨维国(1973—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 杨维国, wg_yang@263.net.

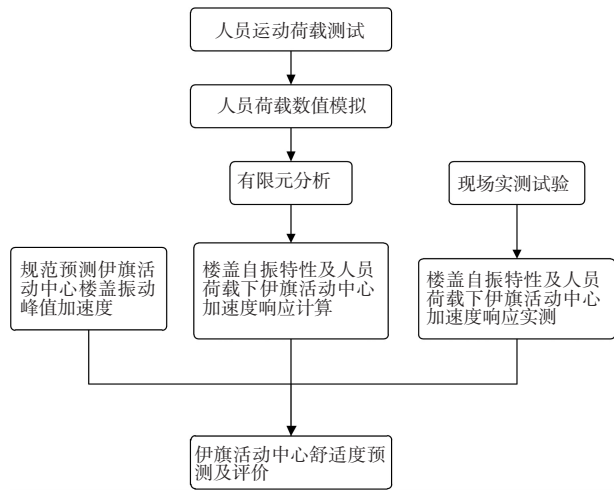


图1 研究流程图

1 工程概况

内蒙古伊金霍洛旗全民健身体育活动中心工程总高度约30 m,结构外形总体呈下部楼层收进、上部大悬挑形状,地下设置游泳池,游泳池正上方为运动场,用于篮球比赛和羽毛球比赛等;该层选择了大跨度张弦梁体系作为楼盖体系,短向跨度约40 m;本层平面形状为正八边形,最大尺寸为89 m×89 m,结构内部设置运动场及看台,室内篮球场在张弦梁楼盖正上方.设计人员需充分考虑张悬梁楼盖在人员运动激励下的振动舒适度问题.

2 人员运动荷载实测

人员运动荷载是建筑物设计尤其是建筑物动力分析的主要荷载输入.为明确人员运动荷载的特征参数,进行了单人运动室内测试,以测定各种运动下典型的荷载特征.在国家体育总局体育科学研究所进行了人员运动荷载实测和相关分析研究,主要有行走、跑步、跳跃及起立等动作下的荷载测试.试验采用德国KISTLER公司生产的9281C型多分量生物力学测力平台,见图2.

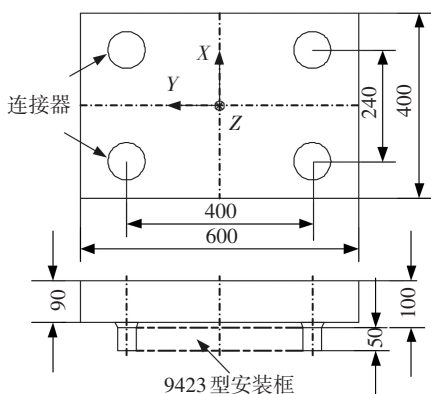


图2 9281C型多分量生物力学测力平台尺寸(mm)

2.1 测试参数及工况

由于试验主要关注受试人员对地板的竖向力,

故只分析各测次中的竖向数据.同时,为避免受试者体重对测试结果的影响,分析中以竖向力与其体重的比值这一无量纲数作为研究对象.测试中,慢走、中速走、快走、慢跑、中速跑、快跑工况的采样频率设为500 Hz;全力跳起、持续跳起、跳远、正常站起、快速站起、60 cm高跳下工况的采样频率设为1 000 Hz.将上述12种工况归纳为4类进行研究:

- 1) 行走工况:慢走(步频1.87 Hz;速度1.35 m/s)、中速走(步频2.13 Hz;速度1.65 m/s)及快走(步频2.43 Hz;速度2.0 m/s);
- 2) 跑步工况:慢跑(步频2.80 Hz;速度2.5 m/s)、中速跑(步频3.10 Hz;速度3.5 m/s)及快跑(步频3.52 Hz;速度4.5 m/s);
- 3) 跳跃工况:全力跳起、持续跳跃及跳远;
- 4) 站起及跳下工况:正常站、快速站起及60 cm高跳下.

2.2 实测结论与建议

参与测试的人员包括来自北京交通大学、中国航空规划设计研究总院有限公司和国家体育总局体育科学研究所的工作人员,共8人,基本情况见表1.

表1 受试人员基本情况

序号	性别	年龄	身高/cm	体重/kg
1	男	40	181	118.5
2	男	53	175	92.9
3	男	39	178	80.0
4	男	30	172	76.2
5	男	26	173	65.8
6	男	30	173	62.7
7	女	24	163	55.4
8	女	32	160	54.5

经测试,各种工况下人员运动荷载特征参数为:

1) 行走工况下荷载模式及参数建议见图3和表2.其中 k 为作用力与体重的比值^[7];A点为单脚落地时间,即时间起点;B、C、D点为作用力极值点,B、D点为极大值点,C点为极小值点;E点为单脚离地时间,即时间终点.

2) 跑步工况荷载模式及参数建议见图4和表3.其中 k 为作用力与体重的比值;A点为单脚落地时间,即时间起点;B点为作用力极值点;C点为单脚离地时间,即时间终点.

3) 跳跃、站立及跳下工况中,仅在特定瞬时发生,且控制因素为跃起后落下时力的最大值,即瞬时作用荷载^[8],故文中只分析以上3种工况作用力的最大值,人对地面作用力最大值与其体重比值最大值见表4.

表 4 人员跳跃、起立等动作的动力放大系数 k

全力跳起	持续跳跃	跳远	正常站起	快速站起	60 cm 高跳下
5.285	4.538	4.905	1.318	1.695	6.743

3 楼盖区现场实测及有限元分析

针对内蒙古伊金霍洛旗全民健身活动中心工程,对大跨度张弦梁楼盖运动场装修前进行振动加速度实测,目的是通过实测本底振动、振动传递和动力响应明确大跨度楼盖区的动力特性,通过对实测结果的计算和分析,为该建筑结构实际使用舒适性作出预测评价,测试主要包括:

- 1) 人及重物对大跨度结构的瞬时激励效应测试,即人为激励大跨度结构地面一点,测量相应测点的振动及频谱成份;
- 2) 人行激励对体育馆主场地振动效应测试,由测试者在大跨度结构地面上走、跑激励,测量附近测点的振动及频谱成份。

现场测试点位置见图 5。

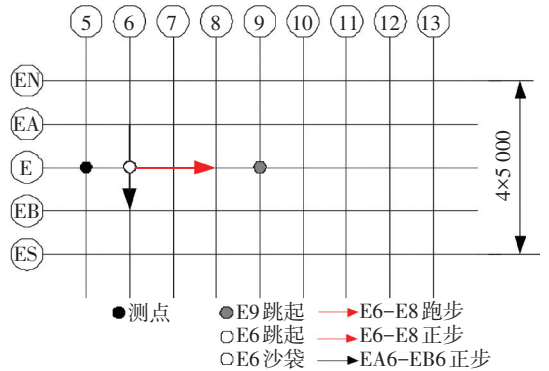


图 5 现场测点布置示意

在对现场实测结果进行分析的同时,利用 ANSYS 建立大跨度主体结构有限元模型,主体结构模型混凝土板厚为 150 mm,混凝土楼板采用 C30,钢材主要采用 Q345 及 Q420,张拉索采用高强预应力钢索,主体结构有限元模型见图 6。荷载以移动荷载列的形式在有限元模型中加载^[9],根据现场实测工况对有限元模型进行相应振动激励分析,对比现场实测和有限元分析结果,得到大跨度楼盖在人行激励下的动力振动特性。

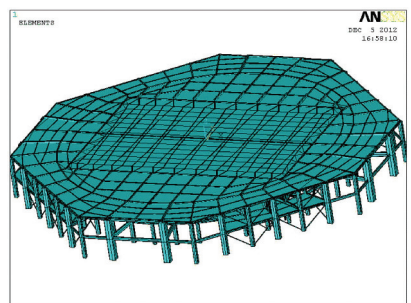
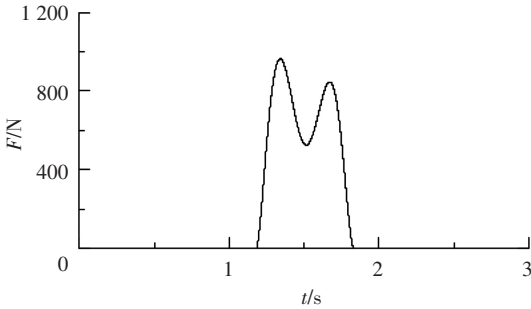
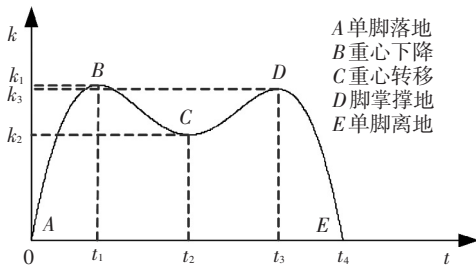


图 6 大跨度主体结构有限元模型



(a) 行走作用力时程

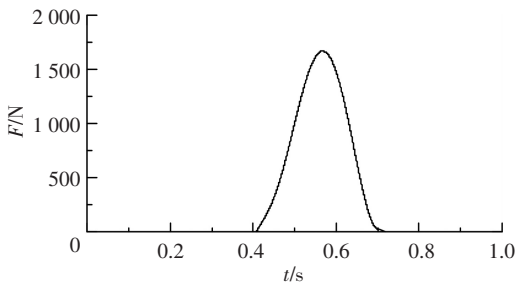


(b) 行走建议荷载模型

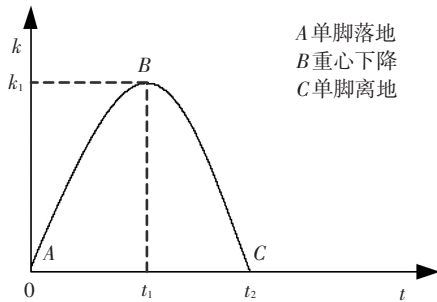
图 3 实测人员行走作用力时程及建议荷载模型

表 2 人员行走动力放大系数及单步时间

参数	k_1	k_2	k_3	t_1/s	t_2/s	t_3/s	t_4/s
慢走	1.221	0.678	1.105	0.148	0.309	0.527	0.690
正常走	1.313	0.569	1.088	0.121	0.289	0.450	0.599
快走	1.162	0.323	1.062	0.087	0.248	0.387	0.506



(a) 跑步作用力时程



(b) 跑步建议荷载模型

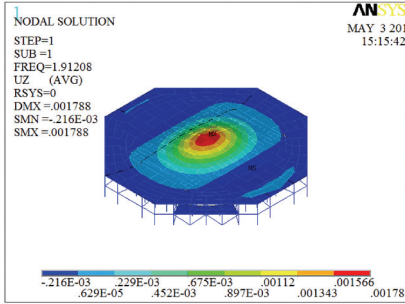
图 4 实测人员跑步作用力时程及建议荷载模型

表 3 人员跑步动力放大系数及单步时间

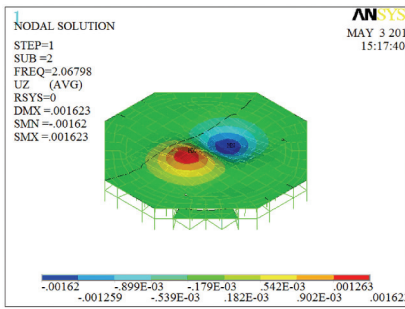
参数	k_1	t_1/s	t_2/s
慢跑	2.329	0.108	0.178
正常跑	2.515	0.095	0.148
快跑	2.481	0.080	0.139

3.1 楼盖自振频率计算及实测

利用 ANSYS 对上述大跨度主体结构有限元模型进行模态分析, 得到模型前 2 阶竖向自振频率为 1.91 Hz 和 2.07 Hz, 结构前两阶振型见图 7. 利用脉动法对主体结构进行动力特性测试, 分析主体结构在无显著激励条件下的频谱成分, 测得竣工前主场地自振频率为 2~3 Hz(图 8), 实测结果与有限元分析结果比较吻合, 验证了有限元计算模型的正确性.



(a) 第一阶振型



(b) 第二阶振型

图 7 结构前两阶振型

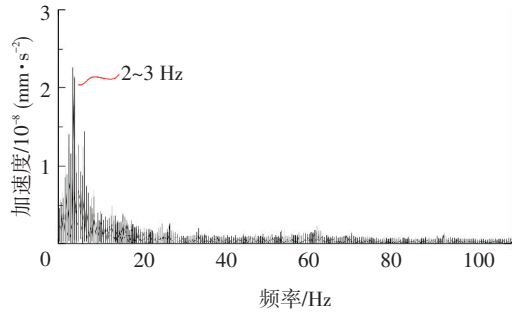


图 8 实测结构竖向加速度频谱

3.2 人及重物瞬时激励

试验采用人为激励大跨度结构地面一点, 测量其邻近点振动幅值及频谱成份, 试验中, 测点位于 E5 点, 采取 3 种激励方式: 1) 一人(体重 119 kg)在 E9 点跳起激励; 2) 一人(体重 119 kg)在 E6 点跳起激励; 3) 在 E6 点 50 kg 沙袋自 60 cm 高自由落下. 为确保各次测量之间具有可比性, 前两种激励方式中, 人跳起高度尽量保持一致, 第 3 种激励方式中, 沙袋落下高度亦尽量保持一致.

有限元分析时, 由人员运动荷载实测所得动力放大系数及人和沙袋的重力, 得到人跳跃及沙袋下落对测试点的冲击力 $F=kG$, 其中 k 分别为表 4 中全力跳起及 60 cm 高跳下放大系数, G 为上述 3 种工况瞬时激励人及沙袋重力, 得出 3 个工况作用力分别为 6 163.7、6 163.7、3 304.1 N, 作为冲击荷载施加在相应的激励点(E6 及 E9), 对结构进行瞬态分析, 得测点 E5 的加速度时程曲线, 试验与有限元分析结果对比见表 5.

表 5 人及重物瞬时激励下测点 E5 振动加速度试验与有限元对比

$\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$

激励方式	径向			切向			竖向		
	试验	有限元	平均偏差/%	试验	有限元	平均偏差/%	试验	有限元	平均偏差/%
E9 跳起 1	9.14	11.31		8.64	9.27		40.54	52.30	
E9 跳起 2	8.60	11.31	26.08	15.04	9.27	-12.98	55.65	52.30	2.40
E9 跳起 3	9.17	11.31		8.28	9.27		57.03	52.30	
E6 跳起 1	19.34	20.45		11.30	11.72		79.91	102.20	
E6 跳起 2	24.05	20.45	6.19	17.11	11.72	-8.15	111.59	102.20	14.88
E6 跳起 3	14.38	20.45		9.87	11.72		75.34	102.20	
E6 沙袋	10.55	12.45	18.01	6.59	7.54	14.40	48.21	52.58	9.06

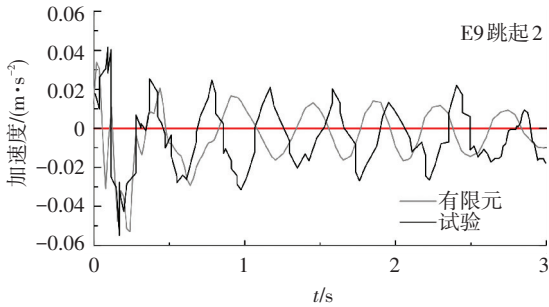
由现场实测与有限元分析对比可知, 主场地在人跳跃及重物下落激励下, 有限元分析结果与现场实测竖向加速度峰值能较好吻合, 偏差可控制在 15% 以内, 径向与切向加速度峰值存在一定的偏差, E9 跳起激励时径向加速度偏差为 26.08%. 3 种瞬时激励下, 加速度反应均不断衰减, E6 跳起激励产生的竖向加速度响应较大, 测点处三方向最大加速度响应依次为 24.05、17.11 及 111.59 mm/s^2 . 试验与有限元计算所得竖向加速度时程曲线对比见图 9.

3.3 人行激励振动特性

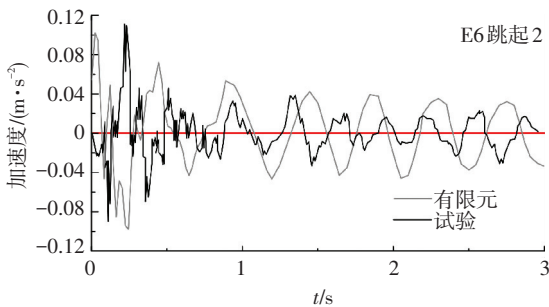
该部分测试中, 测试者在体育馆地面上走、跑激励, 测量附近测点的振动, 试验测点位于 E5 点, 采取 3 种激励方式: 1) 3 人同步在 E6-E8 之间跑步行进; 2) 3 人同步在 E6-E8 间正步行进; 3) 3 人同步在 EA6-EB6 间正步行进.

人行荷载作用下进行有限元分析时, 先进行主体结构模态分析, 由一、二阶频率计算得瑞利阻尼, 由图 3、4 中人员运动荷载实测所得跑步及走路等工

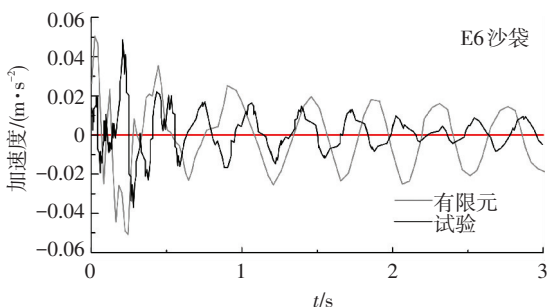
况的建议荷载模式,得激励荷载 $F = kG$, k 取表 2、3 中正常走及正常跑中放大系数,测试人员为表 1 中序号 1、5、6 人员,即 G 分别为 1 161.3、644.8、542.9 N,由 MATLAB 拟合得到各测试点的人行荷载时程曲线,作为激励荷载施加在相应的激励点(图 5),对结构进行瞬态分析,得测点 E5 的加速度时程曲线,试验与有限元分析结果见表 6,表 5、6 中径向为垂直于张弦梁方向,切向为张弦梁方向.试验与计算所得测点 E5 的竖向加速度时程曲线见图 10.



(a) 一人(体重 119 kg)在 E9 点跳起



(b) 一人(体重 119 kg)在 E6 点跳起



(c) 沙袋(重 50 kg)在 E6 点自由下落

图 9 人跳跃及重物下落时 E5 测点竖向加速度曲线

由表 5、6 中实测与有限元分析对比结果可知,主场地在人行荷载激励下,所得有限元分析结果与现场实测竖向加速度峰值能够较好吻合,E6-E8 间跑步及正步走时,偏差较小,EA6-EB6 正步走时径向加速度峰值偏差最大为 26.4%.3 种激励方式下,激励刚开始时反应较大,后期开始衰减,跑步激励产生的竖向加速度响应比正步响应大,而正步激励产生的横向加速度响应大于跑步响应,测点处正步激励时三方向最大加速度响应分别为 21、23 及 87 mm/s².

参考中国《建筑楼盖结构振动舒适度技术规范》^[10]中关于楼盖舒适度的有关规定,根据体育馆

使用要求选取商场舒适度标准,行走激励时楼盖峰值加速度限值为 150 mm/s²,人行走引起的楼盖振动峰值加速度可近似计算:

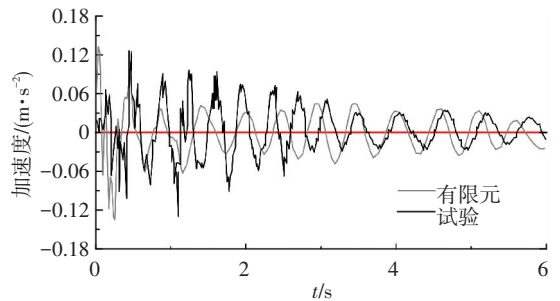
$$a_p = \frac{F_p}{\xi W} g, \quad (1)$$

$$F_p = p_0 e^{-0.35f_1}, \quad (2)$$

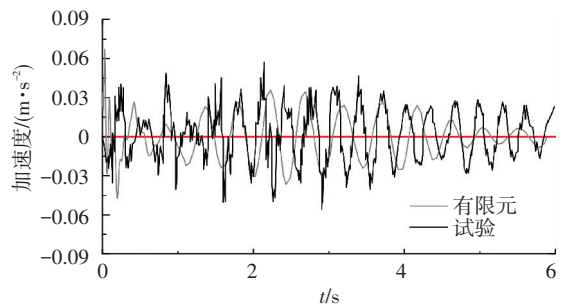
$$W = \delta F_{jk} B_j L_j, \quad (3)$$

$$B_j = C_j \left(\frac{D_s}{D_j} \right)^{0.25}, L_j \leq \frac{2}{3} B_w. \quad (4)$$

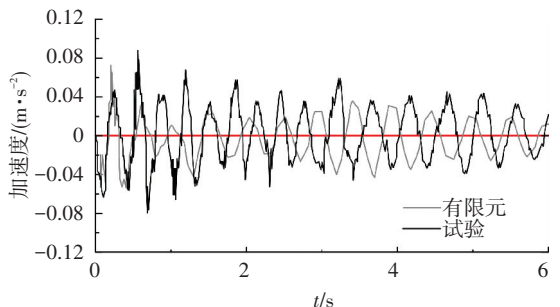
式中: a_p 为楼盖振动峰值加速度, F_p 为接近楼盖结构自振频率时人行走产生的作用力, p_0 为人行走产生的作用力, f_1 为结构第一阶竖向自振频率, ξ 为楼盖结构阻尼比, W 为楼盖结构振动有效重量, g 为重力加速度, δ 为连续性系数, F_{jk} 为次梁分担的均布荷载标准值, L_j 为次梁的跨度, B_j 为次梁的有效宽度, C_j 为次梁的边界条件影响系数, D_s 与 D_j 分别为垂直于与平行于次梁跨度方向单位宽度的惯性矩, B_w 为垂直于次梁跨度方向的楼板宽度.



(a) 3 人同步在 E6-E8 之间跑步



(b) 3 人同步在 E6-E8 之间正步走



(c) 3 人同步在 EA6-EB6 之间正步走

图 10 人行激励时 E5 测点竖向加速度曲线

根据上式代入相关参数后得到楼盖振动峰值加速度为 46.3 mm/s²,行走工况有限元计算结果

53.0 mm/s², 与规范计算值相差在 15% 以内, 且小于规范中行走激励时建筑楼盖峰值加速度限制, 进一

步说明了所建立的荷载模型及有限元模型的有效性。

表 6 测点 E6-E8 及 EA6-EB6 振动加速度试验与有限元对比

mm · s⁻²

激励	径向			切向			竖向		
	试验	有限元	偏差/%	试验	有限元	偏差/%	试验	有限元	偏差/%
E6-E8 间跑步	14.57	17.13	17.50	8.51	7.06	-17.03	134.14	153.80	14.65
E6-E8 正步走	17.36	21.24	22.30	12.91	9.57	-25.80	59.89	68.90	15.04
EA6-EB6 正步走	21.09	26.67	26.40	22.67	18.32	-19.10	86.79	76.41	-11.90

4 结 论

1) 针对建立的人员荷载模型: 行走工况下, 人员荷载放大系数约为 1.2, 正常走最大; 跑步工况下, 人员荷载放大系数约为 2.4, 正常跑最大; 跳跃工况下, 人员荷载放大系数约为 4.9, 全力跳起最大; 其他动作中, 60 cm 高跳下动力放大系数达 6.7, 动力放大效应显著。

2) 行走工况下, 楼盖振动峰值加速度理论计算值与有限元计算结果吻合较好, 两者相差在 15% 以内; 其他测点处有限元计算值与现场实测值相差在 30% 内。对于工程中其他人员运动荷载工况下的楼盖振动响应, 可根据相应的荷载模式, 建立有限元模型进行振动分析。

3) 主场地在人跑步、跳跃及重物下落激励下, 所得有限元分析结果与现场实测竖向加速度峰值吻合较好, 两者相差在 30% 以内, 偏差在可接受的范围内, 可验证人员运动荷载的数值模拟的有效性 & 楼盖有限元模型的正确性。

4) 根据大跨度楼盖现场实测和有限元分析, 楼盖区张弦梁结构在激励施加时加速度反应较大, 后期不断衰减, 但衰减较慢; 在人行荷载激励时, 后续激励与前期激励反应会有部分叠加, 振动响应呈现先减小再增大然后再减小的特征。

参 考 文 献

[1] 操礼林, 李爱群, 陈鑫, 等. 人群荷载下大型火车站房大跨度楼盖振动舒适度控制研究 [C] // 第五届全国防震减灾工

程学术研讨会论文集. 武汉: 中国土木工程学会, 2010: 334-340.

[2] 李泉, 樊健生, 聂建国. 人群节律性运动下大跨楼盖的随机振动问题研究 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(24): 9-15.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程容许振动标准: GB 50868—2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.

[4] 何浩祥, 闫维明, 张爱林, 等. 竖向环境振动下人与结构相互作用及舒适度研究 [J]. 振动工程学报, 2008, 21(5): 446-451.

[5] 董霜, 朱元清. 环境振动对人体的影响 [J]. 噪声与振动控制, 2004, 24(3): 22-25.

[6] 马伯涛, 杨国莉, 庞玉涛, 等. 大跨度及长悬挑楼层钢结构运动场人员舒适度分析研究 [J]. 建筑结构学报, 2012, 33(4): 95-103.

[7] KERR S C, BISHOP N W. Human induced loading on flexible staircases [J]. Engineering Structures, 2001, 23(1): 37-45.

[8] YAO S, WRIGHT J R, PAVIC A, et al. Forces generated when bouncing or jumping on a flexible structure [C] // Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration. Leuven, Belgium: [s. n.], 2002, 2(1): 563-572.

[9] ELLIS B. Floor vibration induced by dance-type loads: verification [J]. Structural Engineer, 1994, 72(3): 45-54.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑楼盖结构振动舒适度技术规范 (征求意见稿) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

(编辑 赵丽莹)