

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.03.009



跳跃荷载作用下体育馆大跨预应力次梁楼盖振动模拟分析

黄音^{1a,1b}, 徐嘉敏^{1a}, 徐诗童², 姜文杰³, 柏隽尧⁴

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;
2. 中煤科工集团重庆设计研究院有限公司, 重庆 400016; 3. 四川省建筑设计研究院, 成都 610000;
4. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司成都分院, 成都 610000)

摘要:以某小学体育馆为工程背景,通过 ANSYS 建立有限元模型,考虑不同跳跃频率、跳跃人数和跳跃次数的荷载作用,对大跨度预应力混凝土次梁楼盖结构进行竖向振动模拟分析,并进行现场实测,结果表明:修正半正弦平方荷载模型模拟单人跳跃荷载所得分析结果与实测值相对误差为 12.98%,比较接近;多人同步跳跃所导致的楼盖竖向振动加速度随人数的增加而增加,近似呈正比关系;考虑多人跳跃难以严格同步,引入倍增因子对跳跃荷载模型进行修正,与实测值验证较为接近。

关键词:跳跃荷载;楼盖;振动;模拟分析

中图分类号:TU378.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)03-0061-05

Simulation analysis of long-span prestressed secondary beams floor system in gymnasium under jumping loads

Huang Yin^{1a,1b}, Xu Jiamin^{1a}, Xu Shitong², Jiang Wenjie³, Bai Junyao⁴

(1a. School of Civil Engineering; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. CCTEG Chongqing Engineering Co., Ltd., Chongqing 400016, P. R. China; 3. Sichuan Provincial Architectural Design and Research Institute, Chengdu 610000, P. R. China; 4. CSMDI Co., Ltd., Sichuan Branch, Chengdu 610000, P. R. China)

Abstract: A stadium of primary school was taken as an example, by establishing the finite element model with ANSYS, the vertical vibration of long-span prestressed secondary beams floor system worked with different jumping frequency, number of persons and jumping numbers were analyzed. The results show that, compared with the measured values, the modified half-sine-power model has a relative error of 12.98%, which is closed to the measured values; vertical vibration acceleration caused by different people jumping synchronously increases with number of persons rising; considering the people can't jump synchronously the multiplication factor is introduced to correct the jumping loads model.

Keywords: jumping loads; floor; vibration; simulation analysis

收稿日期:2017-05-19

基金项目:国家自然科学基金(51078370)

作者简介:黄音(1971-),男,副教授,博士,主要从事混凝土及预应力混凝土结构、结构检测与加固研究, E-mail: hzxy20@163.com。

Received: 2017-05-19

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51078370)

Author brief: Huang Yin(1971-), associate professor, PhD, main research interests: concrete and prestressed concrete structure, structure inspection and reinforcement, E-mail: hzxy20@163.com.

为了解决人致荷载所导致的竖向振动问题,可以设置减震器^[1]和阻尼器^[2]等,但这会增加建筑成本,并且由于人群活动的短时随机性,这并不是解决楼盖振动的最佳方法。从结构本身着手优化,在梁下增设底板,既可以增加楼盖刚度、减小振动,又可以节省吊顶,是合适的方案。对于楼盖结构,有节奏跳跃极有可能是其最不利的运动形式^[3-7]。鉴于尚无相关的研究成果,笔者依据实际建造的工程,对带底板的大跨度预应力次梁楼盖在跳跃工况下的振动响应进行分析,并结合实测结果评价模拟分析的准确性。

1 工程概况

研究背景为重庆市铜梁区某小学体育馆,该结构为地上 3 层的混凝土框架结构,每层中部各有一夹层。2 层楼盖采用大跨度预应力混凝土次梁楼盖(如图 1)。其中,3~8 轴×A~F 轴区域为大跨度预应力混凝土次梁楼盖(如图 1 虚线框所示),面积为 33.6 m×36.9 m。预应力次梁沿横向全长布置,横向分 3 跨,跨度分别为 7.8、21.3、7.8 m,预应力次梁截面尺寸分别为梁宽 b ×梁高 $h=250$ mm×700 mm、250 mm×1 000 mm、250 mm×700 mm,纵向以间距 2.1 m 布置于 3~8 轴之间。图 1 阴影区域底部加设与梁整浇的 50 mm 厚混凝土底板,形成箱型楼盖结构形式,面积为 33.6 m×21.3 m,其他非阴影区域未设置现浇底板。

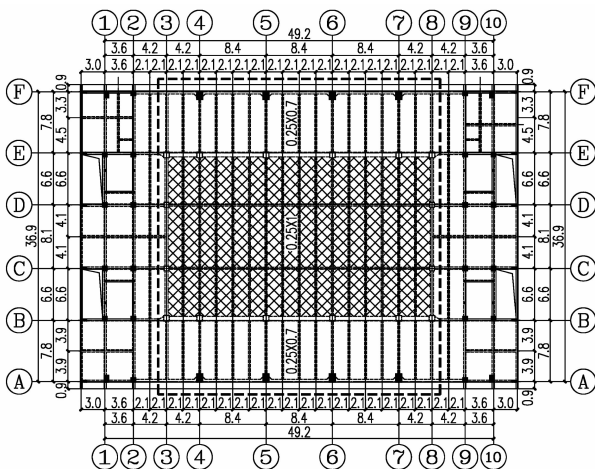


图 1 2 层楼盖平面布置图(单位:m)

Fig. 1 The plane layout of the second floor

2 楼盖有限元模型及模态分析

利用 ANSYS 建立有限元模型^[8],采用 Solid65 单元模拟混凝土梁、板、柱,Link180 单元模拟预应力筋,采用映射网格划分六面体单元,网格划分尺寸

控制为最大不超过 200 mm,取阻尼比 2%,降温法施加预应力,有限元模型见图 2。

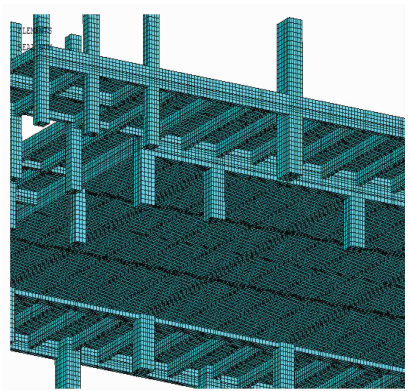


图 2 箱型楼盖有限元模型特写

Fig. 2 Feature of FEM

对该楼盖进行模态分析^[11],结果如表 1 所示。

表 1 大跨楼盖动力特性模拟分析结果

Table 1 Simulation analysis result of long-span floor's dynamic characteristics

振型	自振频率/Hz	振型特性
1	7.59	1 阶竖向振动
2	9.78	2 阶竖向振动
3	12.81	3 阶竖向振动

3 跳跃荷载数学模型

采用陈隽等^[9]、Baumann 等^[10]提出的适用于高频跳跃的“修正半正弦平方荷载模型”,表达式如式(1)所示。

$$F(t) = \begin{cases} K_p G \sin(\pi t/t_p), & 0 \leq t \leq t_p, f_p \leq 1.5 \text{ Hz} \\ K_p G \sin^2(\pi t/t_p), & 0 \leq t \leq t_p, f_p \in (1.5 \text{ Hz}, 3.5 \text{ Hz}] \\ 0, & t_p < t \leq T_p \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_p 为跳跃频率; G 为行人平均体重; $K_p = F_{\max}/G$,为脉冲系数; F_{\max} 为跳跃荷载幅值; t_p 为单个周期内的触地时间; T_p 为跳跃周期; $\alpha = t_p/T_p$ 为接触率,一般有氧跳跃运动取 0.50,剧烈跳跃取 0.40。

4 跳跃工况下楼盖振动响应分析

采用修正半正弦平方荷载模型模拟跳跃荷载。对于加载点、加载人数、人致荷载的频率等因素,考虑模拟分析过程如下:

关于加载点:当荷载频率较低而结构基频较高时,结构振动多以一阶振型为主,选择一阶振型最大振幅点对应的楼盖上表面中心点作为荷载的主要作用点。单人跳跃加载点在中心点,多人跳跃施加在中心点处附近,人员间距 1 m。

关于跳跃人数:随着人数的增加,实现多人同步跳跃的难度增大。考虑单人、5 人及 20 人同步跳跃的情况。

关于跳跃频率:通过大量的实测数据,可得到跳舞、有氧健身操和体育活动等的荷载频率^[12-13]。当荷载频率与楼板竖向自振频率 7.592 5 Hz 相同或者整数倍时,楼板振动能量最大,结合实际跳跃荷载频率范围,根据模态分析所得的第一阶跳跃荷载频率选取 2.5、3.1、3.8 Hz 进行模拟分析。

模拟分析结果如表 2 所示。

表 2 模拟分析结果汇总

Table 2 Summary of analysis results of jumping load cases

工况	跳跃人数	跳跃次数	跳跃频率/Hz	峰值加速度/ (m·s ⁻²)
1	1	3	2.5	0.045 9
2	1	3	3.1	0.031 1
3	1	3	3.8	0.060 1
4	1	12	3.8	0.069 0
5	5	12	2.5	0.241
6	5	12	3.8	0.347
7	20	12	2.5	0.939

注:参照 AISC 规定,行人平均体重取为 700 N。

通过分析上述各工况下的振动响应可以发现:

1)对比单人跳跃以及跳跃次数相同的情况可知,工况 1 的荷载 3 阶谐分量频率为 7.5 Hz,工况 2 的荷载 3 阶谐分量频率为 9.3 Hz,工况 3 的荷载 2 阶谐分量频率为 7.6 Hz,分别与结构 1 阶频率、2 阶频率和 1 阶频率相接近,根据共振模型可判断工况 3>工况 1>工况 2 的峰值加速度,与模拟分析结果一致。由于荷载的谐分量幅值随阶数的增加而迅速降低,可推出上述结论^[14]。

2)对比单人跳跃在荷载频率相同而次数不同时的工况 3 和 4 可以发现,激励持时长,加速度频谱(如图 3、图 4 所示)体现出按荷载各阶谐分量频率出现峰值的明显规律,2 阶谐分量激起了结构共振,验证模拟准确性。

3)对比工况 3 和工况 4 的加速度时程曲线(如图 5、图 6 所示)可知,在连续跳跃次数达到一定值以后,振动峰值加速度基本不再增长,保持稳定,即

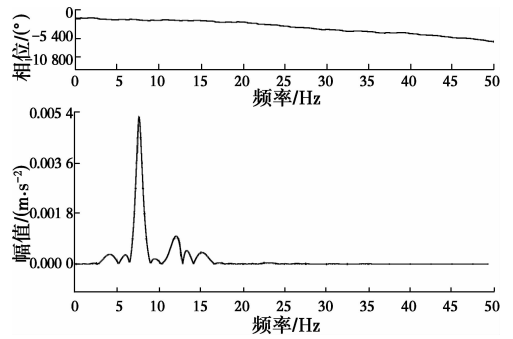


图 3 工况 3 振动加速度频谱

Fig. 3 Vibration acceleration spectrum of load case3

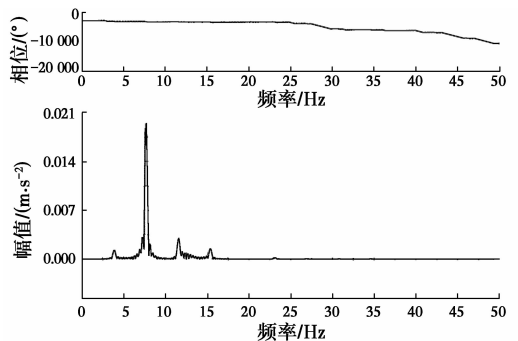


图 4 工况 4 振动加速度频谱

Fig. 4 Vibration acceleration spectrum of load case4

跳跃一定次数后可得到结构稳态动力响应。

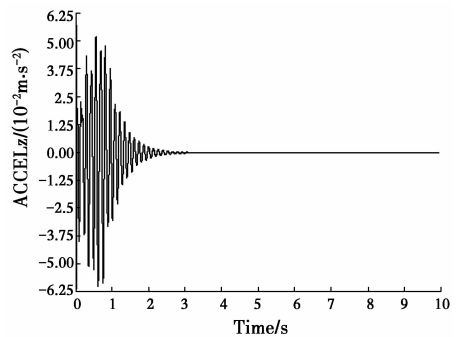


图 5 工况 3 振动加速度时程曲线

Fig. 5 Vibration acceleration time-history of load case3

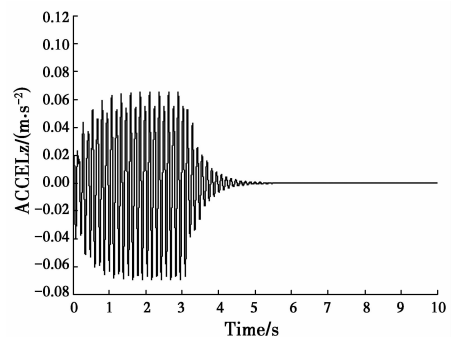


图 6 工况 4 振动加速度时程曲线

Fig. 6 Vibration acceleration time-history of load case4

4)对比工况 4 和 6 以及工况 5 和 7 的模拟分析结果可知,结构的动力响应随人数的增加而增大,近

似呈正比关系。当人群分布较为集中时,按照人数进行估算带来的误差较小(见表 3)。

表 3 人数正比关系估算峰值加速度

Table 3 Summary of peak accelerations according positive relationship between people

工况	峰值加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	工况	峰值加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
工况 4	0.069 02	工况 5	0.240 9
工况 4 估算工况 6	0.345 1	工况 5 估算工况 7	0.963 6
工况 6	0.347 0	工况 7	0.938 8
相对误差	0.55%	相对误差	2.64%

5) 单人跳跃工况现场实测的条件与模拟工况 4 较为接近,由表 4 可知^[15],将上述模拟分析结果换算至与现场实测时的相同体重后,分析结果与实测值的相对误差为 12.98%,两者较为接近。

表 4 实测与模拟分析对比

Table 4 Comparison of analysis and measurement

研究方法	跳跃频率/Hz	体重/N	人数	峰值加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
模拟分析	3.8	700	1	0.069 02
模拟并换算体重	3.8	650	1	0.064 09
现场实测	3.8	650	1	0.055 769
相对误差	0	0	0	12.98%

6) 多人跳跃的模拟分析与现场实测结果见表 5。由表 5 可见,两者差距比较大,主要是由于多人难以实现完全同步跳跃,需要引入倍增因子 N_e 来考虑实测时同步性较差带来的影响。参考 Matsumoto 等学者提出的研究成果,倍增因子 N_e 的取值范围为 $[\sqrt{n}, n]$ ^[16],笔者取 $N_e = 4.5$,按 4.5 人分析结果得峰值加速度 $0.087 5 \text{ m/s}^2 > 0.065 1 \text{ m/s}^2$,模拟分析结果与实测值的相对误差为 25%,比较接近且偏安全。

表 5 20 人同步跳跃工况实测与分析对比

Table 5 Comparison of synchronous jumping results of 20 people

研究方法	跳跃频率/Hz	体重/N	峰值加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
实测	2.0	500~700	0.065 1
模拟	2.0	700	0.393 8

5 结论

通过 ANSYS 进行三维实体建模,采用修正半

正弦平方荷载模型进行人致荷载(跳跃工况)下的竖向振动模拟分析,并与现场实测结果进行比较,得到以下主要结论:

1) 对于单人跳跃荷载,得到的分析结果与实测值较接近,相对误差为 12.98%。

2) 多人同步跳跃所导致的楼盖竖向振动加速度随人数的增加而增加,近似呈正比关系。

3) 由于多人跳跃难以严格同步,模拟分析结果与实测结果之间出现偏离。对荷载模型考虑引入倍增因子 N_e 进行修正,与实测值对比验证较为接近。

参考文献:

- [1] 李爱群,陈鑫,张志强. 大跨楼盖结构减振设计与分析[J]. 建筑结构学报,2010,31(6):160-170.
LI A Q, CHEN X, ZHANG Z Q. Design and analysis on vibration control of long-span floor structures [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6):160-170. (in Chinese)
- [2] DALLARD P, FITZPATRICK T, FLINT A, et al. The Millennium Bridge, London: Problem and solutions [J]. Structural Engineer, 2001, 79(8):15-17.
- [3] JONES C A, REYNOLDS P, PAVIC A. Vibration serviceability of stadia structures subjected to dynamic crowd loads: A literature review [J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(8):1531-1566.
- [4] AGU E, KASPERSKI M. Influence of the random dynamic parameters of the human body on the dynamic characteristics of the coupled system of structure - crowd [J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(3):431-444.
- [5] 操礼林,李爱群,张志强,等. 大跨度组合楼盖人致振动分析与实测研究[J]. 西南交通大学学报,2012,47(6):922-928.
CAO L L, LI A Q, ZHANG Z Q, et al. The simulation analysis and the measured research under human-induced load of long-span composite floor [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(6):922-928. (in Chinese)
- [6] 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):16-24.
CHEN J, WANG L, CHEN B, et al. The dynamic characteristics and load model experiment research of jumping loads [J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(1):16-24. (in Chinese)
- [7] 陈隽,李果,楼佳悦,等. 跳跃荷载下大跨楼盖的振动加速度反应谱[J]. 同济大学学报,2015,43(7):972-979.
CHEN J, LI G, LOU J Y, et al. The vibration

- acceleration response spectrum of the long-span floor under jumping loads [J]. Journal of Tongji University, 2015, 43(7): 972-979. (in Chinese)
- [8] 黄音,彭俊森,李哲刚,等. 体育馆大跨度预应力次梁楼盖竖向振动模拟分析[J]. 重庆大学学报,2017,40(5): 43-48.
HUANG Y, PENG J S, LI Z G, et al. Vertical vibration modal analysis of long-span prestressed secondary beams floor system in gymnasium [J]. Journal of Chongqing University, 2017, 40(5): 43-48. (in Chinese)
- [9] 陈隽,王玲,王浩祺. 单人跳跃荷载模型及其参数取值[J]. 同济大学学报,2014,42(6):859-866.
CHEN J, WANG L, WANG H Q. Experimental investigation on single person's jumping load model and its parameters [J]. Journal of Tongji University, 2014, 42(6): 859-866. (in Chinese)
- [10] BAUMANN K, BACHMANN H. Durch menschen verursachte dynamische Lasten und deren Auswirkungen auf Balkentragwerke: Report 7501-3 [R], 1988.
- [11] 姜文杰. 体育场馆大跨度预应力次梁楼盖人致振动分析与舒适度研究[D]. 重庆:重庆大学,2016:49-65.
JIANG W J. Human-induced vibration analysis and serviceability research of long-span prestressed secondary-beam floor in gymnasium [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016: 49-65. (in Chinese)
- [12] Floor vibrations due to human activity: AISC/CISC steel design series No. 11 [S]. American Institute of Steel Construction, Inc., USA, 1997.
- [13] Minimizing floor vibration: ATC design guide 1 [S]. Applied Technology Council, USA, 1999.
- [14] 黄健,王庆扬,娄宇. 基于国内外不同标准的人行天桥舒适度设计研究[J]. 建筑结构,2008(8):106-110.
HUANG J, WANG Q Y, LOU Y. Comfortable degree design for footbridges based on the criterions of domestic and overseas [J]. Building Structure, 2008 (8): 106-110. (in Chinese)
- [15] 柏隽尧. 人致作用下体育馆大跨度预应力次梁楼盖舒适度实测研究[D]. 重庆:重庆大学,2016:68-70.
BAI J Y. Field research on comfort level of a gymnasium equipped with long-span prestressed girders floor system under human-induced load [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016: 68-70. (in Chinese)
- [16] MATSUMOTO Y, GRIFFIN M J. Mathematical models for the apparent masses of standing subjects exposed to vertical whole-body vibration [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 260(3): 431-451.

(编辑 胡英奎)