

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.05.006

体育馆大跨度预应力次梁楼盖竖向振动模态分析

黄音^{1a,1b}, 彭俊森^{1a}, 李哲刚², 徐诗童³, 姜文杰⁴, 柏隽尧⁵

(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.中机中联工程有限公司,重庆 400039;3.中煤科工集团重庆设计研究院有限公司,重庆 400016;
4.四川省建筑设计研究院,成都 610000;5.中国市政工程中南设计研究总院有限公司四川分院,成都 610000)

摘要:以重庆市铜梁县新城核心区小学建设项目3[#]楼(体育馆)工程为背景,对其大跨度预应力次梁楼盖竖向振动模态进行模拟分析,并与实测结果相比较,评价其控制竖向振动舒适度的效果。根据建模思路精确建立的该大跨楼盖有限元模型,其模态分析结果与模态实测结果接近,相对误差约为5%;模拟分析及工程实测结果表明,该大跨楼盖前三阶振型均以竖向振动为主,结构自振基频满足我国现行相关规范的要求,竖向振动舒适度符合标准;与无底板的大跨次梁楼盖相比,增加底板后,其增幅最小的一阶频率增长了19.9%,表明增加底板可有效地控制大跨度预应力次梁楼盖的竖向振动。

关键词:大跨度楼盖;预应力次梁;振动;舒适度;模态

中图分类号: TU378.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2017)05-043-06

Vertical vibration modal analysis of long-span prestressed secondary beams floor system in gymnasium

HUANG Yin^{1a,1b}, PENG Junsen^{1a}, LI Zhegang², XU Shitong³, JIANG Wenjie⁴, BAI Junyao⁵

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R.China; 2. CMCU Engineering Co. Ltd., Chongqing 400039, P.R.China; 3. CCTEG Chongqing Engineering Co. Ltd., Chongqing 400016, P.R.China; 4. Sichuan Provincial Architectural Design and Research Institute, Chengdu 610000, P.R.China; 5. CSMDI Co. Ltd. Sichuan Branch, Chengdu 610000, P.R.China)

Abstract: The construction project 3[#] (gymnasium) building of Core Area Primary School in Tongliang county in Chongqing was taken as the research subject. The vertical vibration modal of long-span prestressed secondary beams floor system was analyzed on simulation. Then the analysis results were compared with the measured results to evaluate the control effect of vertical vibration comfort, and the main conclusions include: the results of the modal analysis of the established accurate finite element model of the long-span floor on the basis of the modeling method are close to the measured results, and the relative error is about 5%. The simulation analysis and engineering measurement show that the first three

收稿日期: 2016-12-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078370)。

Supported by the National Science Foundation of China(51078370).

作者简介: 黄音(1971-),男,重庆大学副教授,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。

order vibration modes of long-span floor are dominated by vertical vibration. The fundamental frequency of the structure meets the requirements of the current relevant codes in China, and the vertical vibration comfort conforms to the standard. Compared with the long-span floor which has no bottom plate, the first-order frequency has the smallest increase and it increases by 19.9% after adding bottom plate, which shows that the increase of bottom plate can effectively control the vertical vibration of long-span prestressed secondary beams floor system.

Keywords: long-span floor system; prestressed secondary beam; vibration; comfort; modal

随着轻质高强材料的应用,工程结构向大跨、轻柔和低阻尼方向发展。在人致荷载激励下,此类结构可能产生较大的竖向振动,从而引起使用者的不适,甚至心理恐慌。

例如,图 1 所示的重庆市铜梁县新城核心区小学建设项目 3[#]楼(体育馆)2 层楼盖为风雨操场,因建筑功能需要并经结构方案的初步筛选,拟局部采用大跨度预应力次梁楼盖^[1],其结构布置特点是:在大跨方向布置预应力次梁,从而可以有效地减小楼盖的结构高度。但是,根据以往的设计经验,在体育馆楼盖中采用大跨度预应力次梁楼盖,由于楼盖平面外刚度较小、自振频率接近人类活动的频率,使用过程中可能出现竖向振动舒适度问题。为了减小人致荷载激励下可能出现的楼盖振动,经过方案比选后,在该楼盖预应力次梁的 B~E 轴段大跨度预应力次梁设置了与梁整浇的底板。

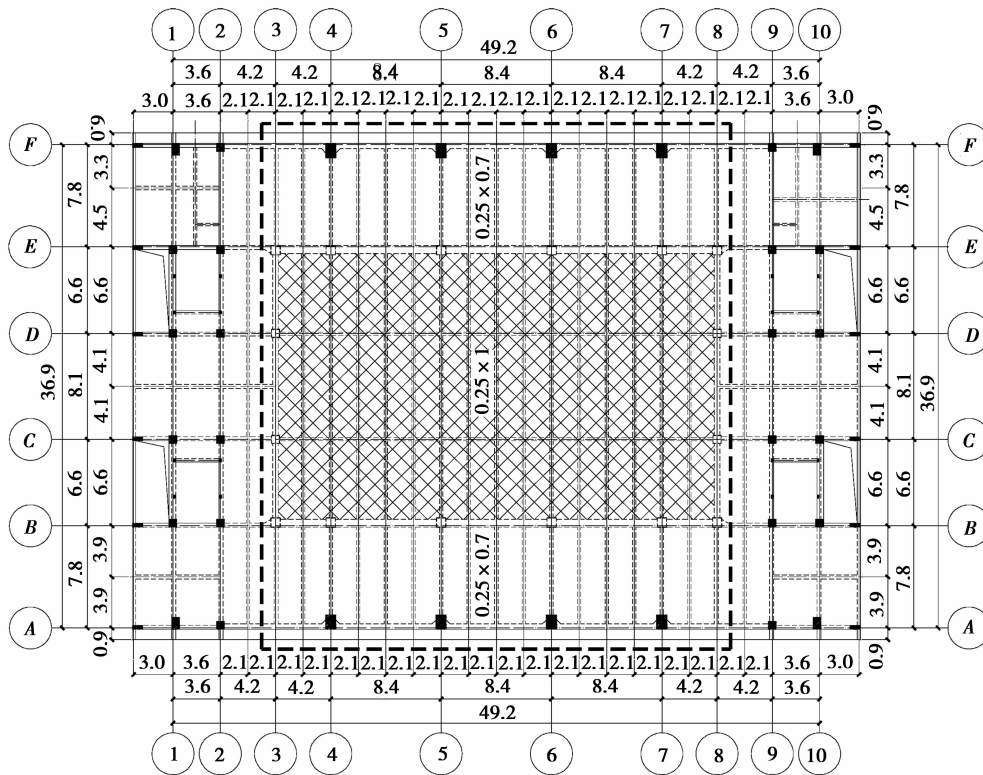


图 1 2 层楼盖结构平面布置图(单位:m)

Fig.1 Structural plane layout of the second floor

目前,国内外关于楼盖竖向振动舒适度问题已取得了部分研究成果^[2-7],但直接针对大跨度预应力次梁楼盖的极少。工程采用增加整浇底板的方法来解决楼盖竖向振动舒适度问题,是对传统大跨度预应力次梁楼盖的发展,也是首次将这一思路创新性的应用于工程实践,并且通过有限元模拟及工程实测检验其实际效果,从而推动大跨楼盖结构竖向振动控制方法的发展。

为此,笔者对该楼盖进行结构建模及模态模拟分析,结合实测评价其控制竖向振动舒适度的效果。

1 楼盖模态分析

1.1 工程简介

重庆市铜梁县新城核心区小学建设项目3#楼(体育馆)为混凝土框架结构,结构总高16.45 m,地上共分为3层。第2层楼盖的结构平面布置如图1所示,其平面尺寸为55.2 m×36.9 m。其中,2~9轴×A~F轴范围内为风雨操场。根据其下第1层竖向构件的布置,风雨操场的3~8轴×A~F轴区域(图1虚线框)内采用了大跨度预应力次梁楼盖,面积为36.9 m×33.6 m。预应力次梁沿房屋横向布置,3跨对应的轴线范围分别为A~B轴段、B~E轴段及E~F轴段,相应跨度分别为7.8、21.3、7.8 m,总跨度36.9 m;A~B轴段、E~F轴段的预应力次梁截面尺寸为梁宽 b ×梁高 $h=250\text{ mm} \times 700\text{ mm}$,B~E轴段的次梁截面尺寸为 $b \times h=250\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm}$,各次梁之间的间距为2.1 m。图1阴影区域的大跨度预应力次梁楼盖底部设置了与梁整浇的50 mm厚底板,其它区域则未设置整浇底板。

1.2 建立有限元模型^[8-9]

考虑到楼盖在人致荷载激励下的微振动难以传递到相邻楼层,因此在几何建模时,仅将柱子上下各延伸1个楼层高度,然后在端部采用固定约束^[10],这种边界条件的取法已被模态实测所验证^[11-12]。

为研究该大跨楼盖的结构振动响应,采用大型通用有限元分析软件ANSYS15.0精确建立该大跨楼盖的有限元模型:钢筋混凝土梁、板、柱均采用solid65单元,能够较为真实的模拟由于梁、板、柱在节点处相互整浇而使现浇柱对楼盖边界条件产生的影响,其包含的由弥散钢筋单元组成的整体式钢筋模型可以近似考虑普通钢筋对结构振动特性的影响,便于大型整体结构的建模;采用映射网格划分六面体单元,获得的计算结果的精度及收敛性较好,同时,考虑人群作用与时程数据输入的匹配,楼盖网格大小应小于步距,为保证模拟分析结果的精度,减少单元数目以加快求解速度,经试算初步设定单元尺寸不大于200 mm;采用计算精度较高的Link180单元模拟预应力筋,并利用降温法施加预应力。

利用该楼盖结构的双轴对称性质,建立其1/4几何模型,并在体切分之后执行体搭接、镜像对称及粘结等命令,完成其几何模型的建模。同时建立梁中预应力筋,生成有限元模型并施加预应力,此建模思路既可保证足够的建模精度,又可节约大量建模时间。

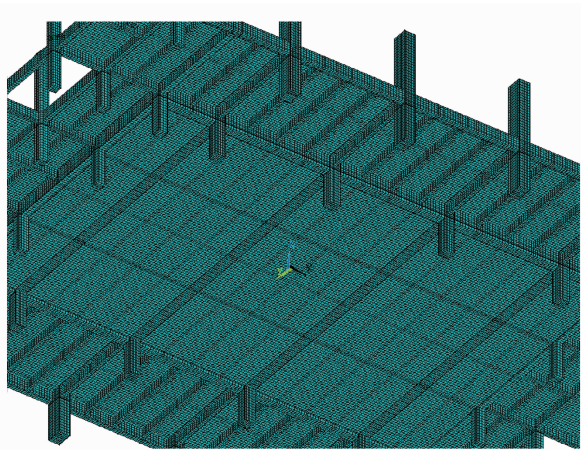


图2 大跨区域楼盖有限元模型特写

Fig.2 The FEM features of the long-span floor area

1.3 模态分析

有预应力模态分析专门用于计算有预应力结构的固有频率和模态。与非预应力楼盖模态分析有所不同,文中的大跨度预应力次梁楼盖在模态分析时,需要首先通过一定的静力分析试算将预应力效果施加到结构上。这样,在后续的模态分析过程中,程序才能在计算结构刚度时考虑计入预应力的影响。在此基础上,可参照非预应力楼盖的方法进行文中大跨度预应力楼盖的模态分析。

同时,为了考察加底板对控制其竖向振动舒适度的效果,在保持该大跨楼盖其余结构形式不变的情况

下,进行了无底板楼盖的模态分析,所得的两者前 3 阶动力特性如表 1 所示。

表 1 大跨楼盖结构动力特性模拟分析结果

Table1 Simulation analysis result of long-span floor's dynamic characteristics

振型	自振频率/Hz		振型特性
	加底板	无底板	
1	7.572 1	6.315 7	大跨区域一阶竖向振动
2	9.975 5	7.007 5	大跨区域二阶竖向振动
3	13.248 1	8.346 0	大跨区域三阶竖向振动

相较于无底板的大跨次梁楼盖,增设底板后,其前三阶自振频率分别增长了 19.9%、42.4%、58.7%。同时,从表 1 模拟分析结果可知,对于研究中主要关心的该大跨楼盖的竖向振动,前三阶振型均以竖向振动为主,相应前 3 阶振型的竖向位移云图见图 3。

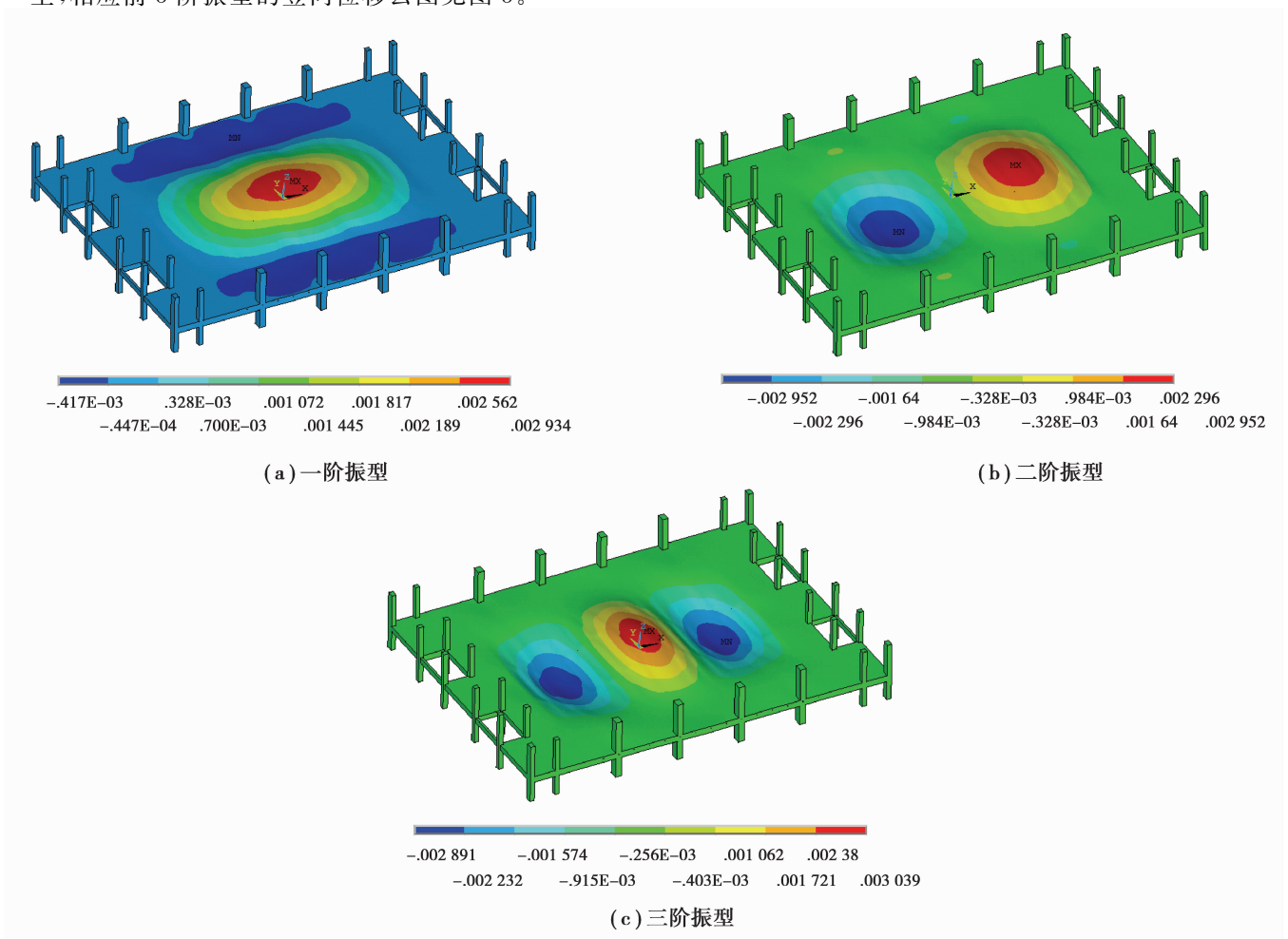


图 3 前三阶振型竖向位移云图

Fig.3 Vertical displacement contour of three lowest order vibration modes

2 楼盖模态实测

修建过程中,在楼盖浇筑及预应力梁张拉后,进行了楼盖振动模态的现场实测^[13]。实测时,该楼盖仅周边砌筑了少量的轻质填充墙,楼面层及下部吊顶均未施工。

对实测所得数据,采用模态识别的方法进行处理,获得了该楼盖的前 3 阶自振频率,并与文中有限元模态分析的结果进行对比,如表 2 所示。

表2 自振频率有限元分析结果与实测结果对比
Table 2 Comparison of natural frequencies between analysis and measurement Hz

自振频率/Hz	模拟分析	现场实测	相对误差/%
f_1	7.572 1	8.000	5.35
f_2	9.975 5	10.563	5.56
f_3	13.248 1	14.000	5.37

结果表明,该大跨楼盖的实测自振频率均略高于模拟分析的同阶频率,相对误差约为5%。

有研究指出,在基于舒适度评价的动力计算中,非结构构件(如填充墙)及其与主体结构的连接通常不会发生破坏,其对整体结构的刚度和质量分布将产生一定影响^[8]。在楼盖模态实测时,由于现场配合条件的限制,在大跨区域四周砌筑了少量的轻质填充墙,并有少量木模板散放于大跨楼盖之上,从而造成大跨楼盖的实测自振频率均略高于模拟分析的同阶频率;而在模拟分析时,为简化建模过程,提高分析求解效率,并未考虑上述因素的影响,但2种方法所得结果的相对误差仍在允许范围之内。

3 基于频率的振动舒适度评价

我国《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010^[14]第3.4.6条规定,大跨度公共建筑混凝土楼盖结构竖向自振频率不宜低于3 Hz。文中的大跨度预应力混凝土次梁楼盖在设置了整浇底板后,模拟分析及现场实测所得的第一阶自振频率分别为7.572 1 Hz、8.000 Hz,满足规范的相关规定。

4 结 论

以重庆市铜梁县新城核心区小学建设项目3#楼(体育馆)大跨度预应力混凝土次梁楼盖为研究背景,采用ANSYS对其进行结构建模及模态分析,结合实测模态评价其舒适度,得出主要结论如下:

- 1) 根据建模思路精确建立的该大跨楼盖有限元模型,其模态分析结果与模态实测结果接近,相对误差约为5%;
- 2) 模拟分析及工程实测结果表明,该大跨楼盖前三阶振型均以竖向振动为主,结构自振基频满足我国现行相关规范的要求,竖向振动舒适度符合标准;
- 3) 与无底板的大跨次梁楼盖相比,增加底板后,其增幅最小的一阶频率增长了19.9%,表明增加底板可有效地控制大跨度预应力次梁楼盖的竖向振动。

参考文献:

- [1] 黄音,贺振坤,白绍良,等.大跨度预应力次梁楼盖边梁协调扭转模拟分析[J].重庆大学学报,2009,32(1):55-60.
HUANG Yin, HE Zhenkun, BAI Shaoliang, et al. Simulation of compatibility torsion experiments of a spandrel beam in a long-span prestressed concrete secondary beams floor system[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(1): 55-60. (in Chinese)
- [2] Pavic A, Reynolds P. Vibration serviceability of long-span concrete building floors. Part 1: review of background information[J]. Shock & Vibration Digest, 2002, 34: 191-211.
- [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(330): 431-444.

- [5] 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 Jiixin, 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)
- [6] 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 Lilin, LI Aiqun, ZHANG Zhiqiang, et al. Human-induced vibration analysis and measurement of long-span composite floors[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(6): 922-928. (in Chinese)
- [7] 娄宇, 黄健, 吕佐超. 楼板体系振动舒适度设计[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
LOU Yu, HUANG Jian, LYU Zuochao. The design of vibration service ability for floors[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [8] 何卫, 谢伟平. 基于舒适度评价的大跨度车站结构精细化模型研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(1): 13-23.
HE Wei, XIE Weiping. Study on sophisticated calculation model of large-span railway station structures based on vibration serviceability evaluation[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(1): 13-23. (in Chinese)
- [9] 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.
JIANG Wenjie. Human-induced vibration analysis and serviceability research of long-span prestressed secondary-beam floor in gymnasium[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [10] 李泉, 樊健生, 聂鑫. 人行荷载作用下大跨楼盖多模态振动控制方法研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(9): 42-49.
LI Quan, FAN Jiansheng, NIE Xin. Integrated control for multi-modal floor vibration under human walking[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(9): 42-49. (in Chinese)
- [11] Pavic A, Reynolds P, Waldron P, et al. Dynamic modelling of post-tensioned concrete floors using finite element analysis[J]. Finite Elements in Analysis & Design, 2001, 37(4): 305-323.
- [12] El-Dardiry E, Wahyuni E, Ji T, et al. Improving FE models of a long-span flat concrete floor using natural frequency measurements[J]. Computers & Structures, 2002, 80(27/28/29/30): 2145-2156.
- [13] 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: 70-81.
BAI Junyao. 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. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures(GB 50010-2010)[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)