

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.01.002

不同设计参数下体育馆大跨度预应力 次梁楼盖竖向振动分析

黄音^{1a,1b}, 龙帅^{1a}, 吴金保², 徐嘉敏³

(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.温州设计集团有限公司,浙江温州 325000;3.郑州万科房地产有限公司,郑州 450000)

摘要:针对大跨度楼盖的竖向振动问题,以某小学体育馆大跨度预应力次梁楼盖为研究背景,改变次梁高度、板厚和平梁底板厚度等结构布置,考虑可能出现的3种荷载工况,采用ANSYS模拟计算各方案楼盖的自振频率及各工况下楼盖的竖向振动加速度,对比分析表明:在工程中,增加楼板厚度对楼盖振动特性以及振动加速度改善效果较小甚至起不利作用;次梁高度增大20%(1 000~1 200 mm)、25%(1 200~1 500 mm),楼盖基频增大10.4%、12.5%,非类共振时各工况均方根加速度下降率为20.34%~36.14%;增设50 mm厚平梁底板后,楼盖基频较无底板时增大17.6%,非类共振时各工况均方根加速度降幅最大为60.67%;改变平梁底板厚度对楼盖自振频率及振动加速度影响甚微;综合各工况以增设平梁底板改善楼盖振动舒适度效果最佳。

关键词:大跨度楼盖;预应力次梁;人致荷载;频率;加速度

中图分类号:TU378.1

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2019)01-016-09

Vertical vibration analysis of long-span prestressed secondary beam roof system in gymnasium with different design parameters

HUANG Yin^{1a,1b}, LONG Shuai^{1a}, WU Jinbao², XU Jiamin³

(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. Wenzhou Design Assembly Company Ltd., Wenzhou 325000, Zhejiang, P.R. China; 3. Zhengzhou Vanke Real Estate Co. Ltd., Zhengzhou 450000, P.R. China)

Abstract: In this paper, a research is conducted into vertical vibration problem for large-span floor based on the construction of the long-span prestressed secondary beam roof in the project of a primary school gymnasium, with the structural arrangement of secondary beam height, floor thickness, and the thickness of the flat beam floor changed. Considering the possible load conditions, the natural vibration frequency and peak acceleration of the floor under three load conditions are simulated by ANSYS. After comparing and analyzing the results, the main conclusions are as follow. The increase of floor thickness has little or even negative effect on the vibration characteristics and vibration acceleration of floor; the secondary beam height increases by 20% (1 000~1 200 mm) and 25% (1 200~1 500 mm), the floor frequency of the floor

收稿日期:2018-05-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51078370)。

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

作者简介:黄音(1971—),男,博士,副教授,主要从事结构检测与加固研究,(E-mail)hzxy20@163.com。

increases by 10.4% and 12.5%, and the decrease rate of RMS acceleration of non-resonance is 20.34% to 36.14%. After adding 50mm thick flat beam floor, the floor frequency of the floor increases by 17.6% when compared with no floor, and the RMS acceleration decrement is 60.67% for all conditions during non-resonance; however, the effect of changing the floor thickness of flat beam on the natural frequency and vibration acceleration of the floor is minimal; the best effect of adding flat beam floor slab to improve floor vibration comfort is to synthesize each working condition.

Keywords: long-span floor system; prestressed secondary beam; human-induced load; frequency; acceleration

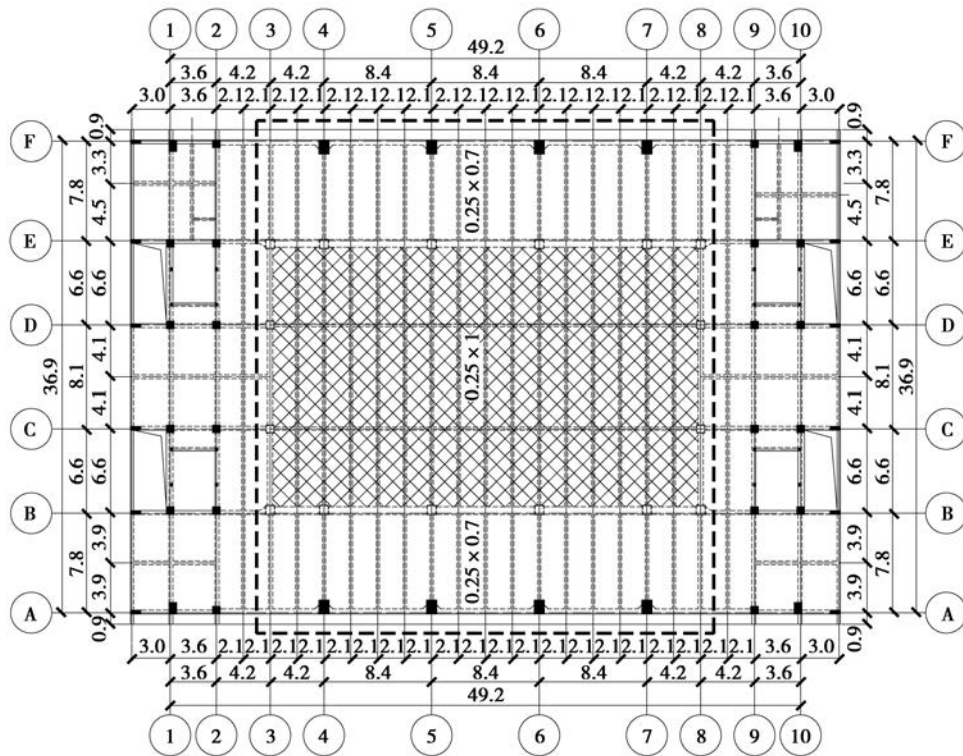
大跨度预应力次梁楼盖结构,即“大跨方向布预应力次梁,小跨方向布主梁”的楼盖结构。此类楼盖的次梁跨高比可达到 18~25,主次梁高度接近,具有节省材料、楼层净高的优势^[1],但同时楼盖也更加轻柔,在人致荷载作用下更容易出现舒适度问题^[2-3]。

虽然国内外对于楼盖竖向振动舒适度的研究已取得了较多成果,但直接针对大跨度预应力次梁楼盖的研究极少。文献[4]对重庆市巴蜀中学校运动场大跨度预应力次梁楼盖进行实测及模拟分析后指出,当该运动场行人以 2.0 Hz 行走且人数超过 250 人时,楼盖将不满足舒适度要求。

目前,国内外规范主要通过控制楼盖结构的频率和加速度以保证楼盖结构满足舒适度要求^[5-8]。文中依托某实际工程,采用 ANSYS 对比分析次梁高度、楼板厚度以及增设平梁底板 3 种不同方案对大跨度预应力次梁楼盖频率及竖向振动加速度的影响,为该工程及类似工程结构设计提供思路。

1 工程概况

文中以某工程二层楼盖为研究对象,其结构平面布置如图 1 所示。A~F 轴×2~9 轴之间为风雨活动场地,进行篮球比赛等体育活动。



注:图中阴影区域为增设平梁底板区域

图 1 二层楼盖结构平面布置图(单位:m)

Fig.1 Structural plane layout of the second floor

2 大跨度楼盖竖向振动舒适度的主要影响因素

根据结构动力学原理^[9],楼盖结构多自由度动力方程为

$$m\ddot{\mathbf{y}} + c\dot{\mathbf{y}} + k\mathbf{y} = F(t), \quad (1)$$

式中: m 、 c 、 k 分别为楼盖结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{y}}$ 、 $\dot{\mathbf{y}}$ 、 \mathbf{y} 分别为楼盖结构的加速度、速度和位移向量; $F(t)$ 为作用于楼盖结构的荷载。

根据动力方程,当作用于楼盖的荷载一定时,楼盖的振动响应与其刚度、质量及阻尼有关。考虑到安装阻尼器的费用、后期维护成本,以及大跨度预应力次梁楼盖结构自身的振动性能等因素,选择改变楼盖平面外刚度以改善其舒适度性能。常用的增大楼盖平面外刚度的方式有增加梁高度和板厚^[10-12],如图 2(a)、图 2(b)所示;此外,对于部分工程(如地下车库)梁高度增加受到限制,考虑到增设平梁底板同样能增大楼盖平面外刚度,提出增设平梁底板的方法,如图 2(c)所示。

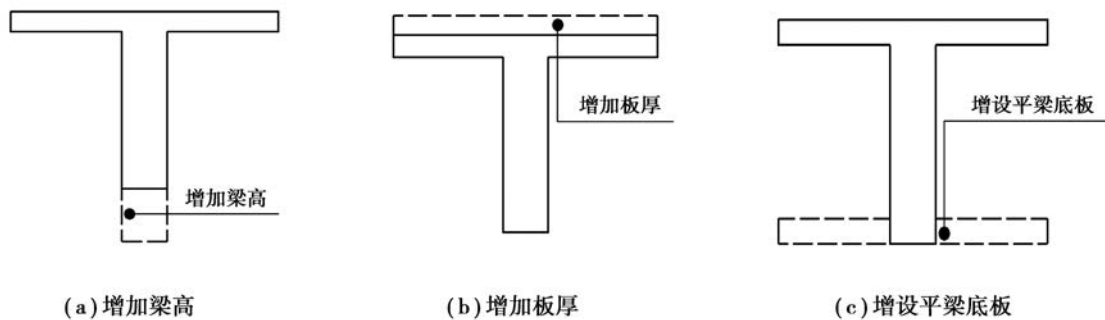


图 2 增大楼盖平面外刚度示意图

Fig.2 The layout of increasing the floor stiffness

为合理评估楼盖舒适度,选取次梁高度、楼板厚度、平梁底板厚度作为变参数进行分析,所选 7 个方案如表 1 所示。

表 1 各方案模型参数

Table 1 Parameters of each scheme model

方案编号	板厚/mm	平梁底板厚/mm	梁高 h /mm	形心位置/mm	惯性矩/ $\times 10^{10}$ mm ⁴
1	100	—	1 000	691.38	4.25
2	100	—	1 200	809.79	7.08
3	100	—	1 500	981.25	13.10
4	120	—	1 000	706.95	4.39
5	150	—	1 000	723.58	4.51
6	100	50	1 000	574.53	7.64
7	100	80	1 000	526.02	8.95

注:表中形心位置为距梁底的高度

3 有限元建模及模态分析

在 ANSYS 建立模型时,将柱子上下各延伸 1 个楼层高度,再约束其端部;采用 solid65 模拟梁、板、柱, link180 模拟预应力筋,降温法施加预应力^[13-14],对表 1 中 7 个方案进行模态分析,结果见表 2。二层楼盖有限元模型如图 3 所示。

表 2 各方案模态分析结果

Table 2 Modal analysis results of various schemes

模型方案编号	1	2	3	4	5	6	7
基频/Hz	6.51	7.20	8.10	6.32	6.09	7.73	7.80

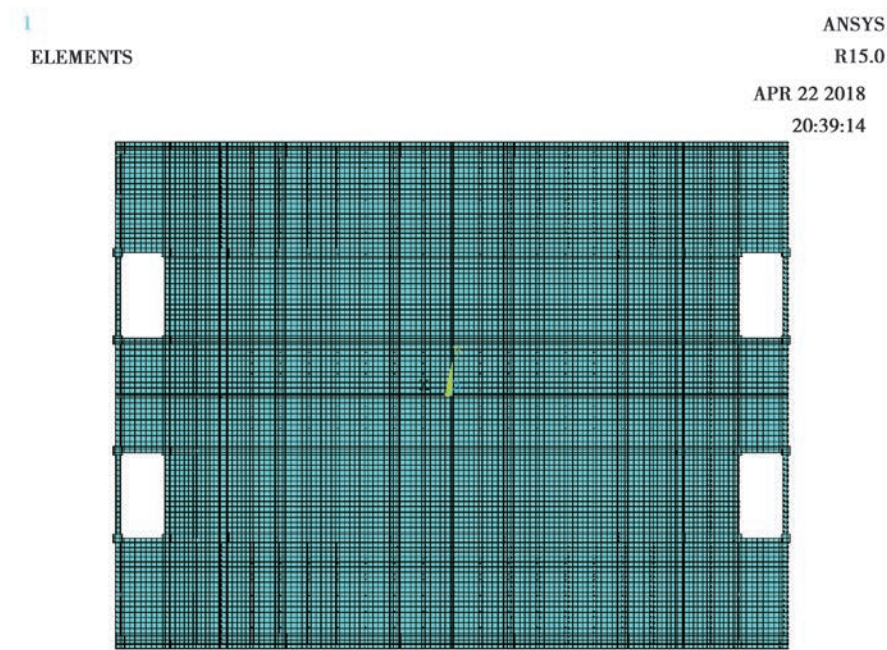


图 3 二层楼盖有限元模型

Fig.3 The second floor finite element model

从表 2 的模态分析结果可以得到:

1)表 1 中 7 个方案大跨度预应力次梁楼盖的基频在 6.09~8.10 Hz 之间。

2)改变次梁高度的效果:相比于方案 1(次梁高度 1 000 mm),方案 2(次梁高度 1 200 mm)、方案 3(次梁高度 1 500 mm)楼盖基频增幅分别为 10.4%、24.4%;方案 3 相比于方案 2,楼盖基频增幅为 12.5%。由此可知,增加次梁高度能够有效提高楼盖的自振频率。

3)改变板厚的效果:相比于方案 1(板厚 100 mm),方案 4(板厚 120 mm)、方案 5(板厚 150 mm)的楼盖基频增幅分别为-2.9%、-6.45%;方案 5 相比于方案 4,楼盖基频增幅为-3.64%。这说明,随着楼板厚度的增加,楼盖的基频不增反降。这是由于随着板厚增加,其刚度增幅小于质量的增幅。

4)设置平梁底板的效果:方案 1 未设置平梁底板,方案 6、方案 7 设有平梁底板。相比较于方案 1,方案 6 和方案 7 楼盖基频增幅分别为 17.6%、18.7%,楼盖基频明显提高;但是,方案 7(平梁底板 80 mm)与方案 6(平梁底板 50 mm)的基频增幅仅为 0.91%。由此可见,是否设置平梁底板对楼盖基频影响较大,但在设置平梁底板后进一步增大平梁底板厚度对提高楼盖基频的效果并不明显。

4 楼盖竖向振动加速度分析

楼盖在人致荷载作用下的竖向振动加速度可通过 ANSYS 动力分析得到。根据文献[11],动力分析时荷载子步长取 0.003 s,阻尼比取 0.02。

4.1 激励模型及荷载工况

建筑结构中常用的人致荷载形式有步行、屈伸、起立、踏步、跳跃、跑步等,其中以行走和跳跃两类荷载较为典型^[15]。行走荷载常用表达式为

$$F_z(t) = G + \sum_{i=1}^n G\alpha_i \sin(2\pi i f_p t - \varphi_i), \quad (2)$$

式中: G 为行人自重; α_i 为傅里叶级数展开第 i 步频处的系数即动力荷载系数; f_p 为行人步频; φ_i 为傅里叶级数第 i 步频分量的相位角; n 为所考虑的步频谱分量总数。 α_i 及 φ_i 的取值参考文献[16]。

陈隽等^[17]提出的“修正半正弦平方跳跃荷载模型”,其表达式为

$$F(T) = \begin{cases} K_p G \sin(\pi t / t_p), & 0 \leq t \leq t_p, f_p \leq 1.5, \\ K_p G \sin^2\left(\frac{\pi t}{t_p}\right), & 0 \leq t \leq t_p, f_p \in (1.5, 3.5], \\ 0, & t_p < t \leq T_p, \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_p 为跳跃频率,Hz; G 为跳跃者平均体重; $K_p = F_{\max}/G$ 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。

人运动频率范围一般为 1.5~3.5 Hz^[15],结合该工程为体育馆场馆,可能出现剧烈运动,文中考虑篮球比赛、篮球训练、集体活动 3 种荷载工况^[10],各工况信息见表 3。

表 3 荷载工况

Table 3 The summary of load information

工况编号	工况类型	体重/kg	频率/Hz	激励模型	加载点
1	篮球比赛	70	3	行走	图 4 中 15 个加载点
2	篮球训练	70	2.7	跳跃	篮球场区域内 1 人/9 m ² (共 35 个)
3	集体活动	50	2	跳跃	篮球场区域内 1 人/4 m ² (共 91 个)

注:1.各工况加载时长均为 5 s;2.篮球运动中出现剧烈运动的机率较高,因此,行走荷载频率取 3 Hz

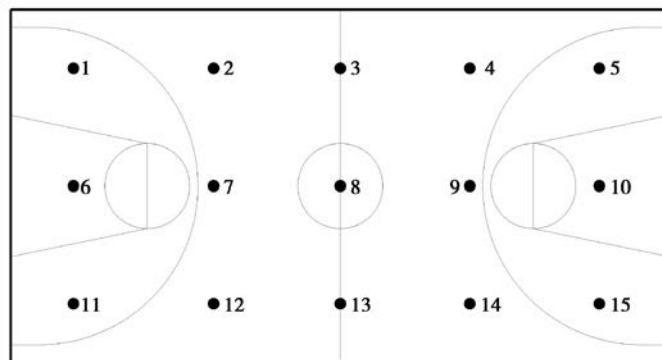


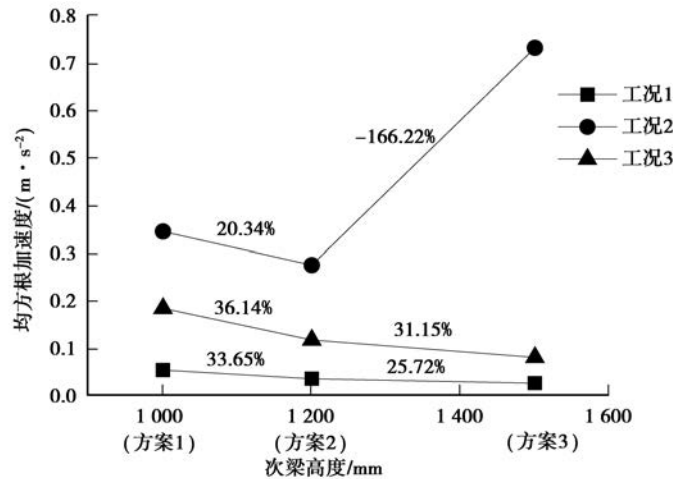
图 4 二层大跨度楼盖层篮球比赛荷载点分布

Fig.4 Distribution of load points in the second-level large-span regional basketball games

4.2 加速度时程分析

4.2.1 梁高变化分析

利用 ANSYS 对 3 种工况 3 种次梁高度方案进行动力分析,得到相应的均方根加速度和下降率见图 5。



注:图中均方根加速度下降率为方案 2 相对于方案 1、方案 3 相对于方案 2

图 5 均方根加速度与次梁高度关系曲线

Fig.5 The relationship between RMS acceleration and the height of the secondary beam

方案 1、方案 2、方案 3 的次梁高度分别为 1 000、1 200、1 500 mm。方案 2 相比于方案 1 的次梁高度增加了 20%，方案 3 相比于方案 2 的次梁高度增加了 25%。由图 5 可知：

1)除工况 2 时方案 2 和方案 3 的对比这一特殊情况以外,其余各工况楼盖的均方根加速度均随次梁高度的增大而有较大幅度的减小,其中以工况 3 梁高由 1 000 mm 增大至 1 200 mm 时下降幅度最大,下降率为 36.14%。

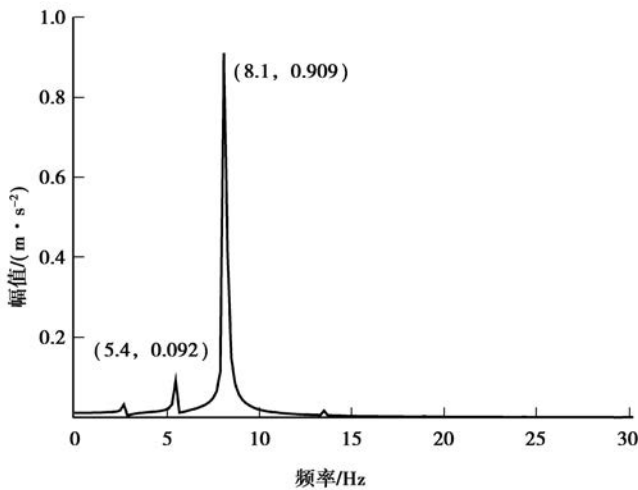


图 6 类共振楼盖(方案 3、工况 2)加速度频谱图

Fig.6 Resonant floor acceleration spectrum diagram (scheme 2, working condition 2)

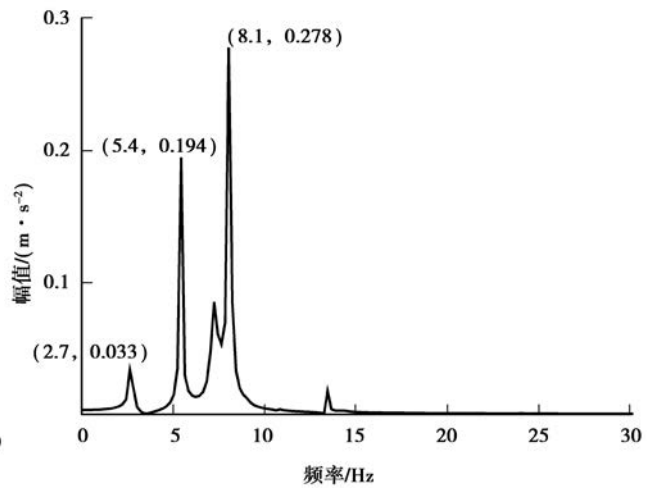


图 7 非类共振楼盖(方案 2、工况 2)加速度频谱图

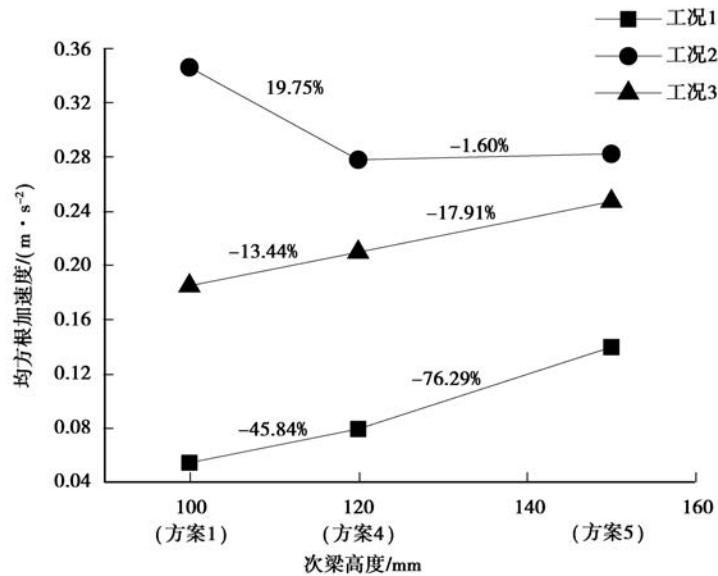
Fig.7 Nonresonant floor acceleration spectrum diagram (scheme 2, working condition 2)

2)工况 2 时方案 2 和方案 3 的对比这一情况,次梁高度由 1 200 mm 增大至 1 500 mm(幅度 25%),楼盖均方根加速度上升了 166.22%,即楼盖振动响应反而增大。这是由于工况 2 中的人致荷载频率为 2.7 Hz,是楼盖基频 8.1 Hz 的 1/3,导致类共振。结合两类振动的频谱图(见图 6、图 7)可以看出,类共振时其频谱密度集中在 8.1 Hz 处,幅值为 0.909 m/s²,而非类共振时其频谱密度集中在 5.4 Hz 与 8.1 Hz(幅值为 0.278 m/s²)

处,其幅值仅为类共振幅值的 $1/3.27$ 。因此,工况 2 条件下方案 3 相对于方案 2,随着次梁高度的增大,均方根加速度不仅没有减小,反而显著增加,避免楼盖与人致荷载之间的类共振是楼盖竖向振动设计中的关键。

4.2.2 板厚变化分析

利用 ANSYS 对 3 种工况 3 种板厚方案进行动力分析,得到相应的均方根加速度和下降率见图 8。



注:图中均方根加速度下降率为方案 4 相对于方案 1、方案 5 相对于方案 4

图 8 均方根加速度与板厚关系曲线

Fig.8 The relationship between RMS acceleration and the thickness of floor

方案 1、方案 4、方案 5 的板厚分别为 100、120、150 mm。由图 8 可知:

1) 工况 1 和工况 3 条件下,随着板厚的增加 20%(方案 4 相比于方案 1)、25%(方案 5 相比于方案 4),均方根加速度均有明显幅度增大,其原因为:楼盖基频随板厚增大而减小,并与工况 1 和工况 3 的频率 3 Hz、2 Hz 呈倍频关系,类共振现象更明显,因此,均方根加速度反而增大。

2) 工况 2 条件下,板厚由 100 mm 增大至 120 mm 时,均方根加速度减小了 19.75%。这表明在不出现类共振现象时,增大板厚能够适当地降低楼盖的振动响应。但是,在本工程中,即使是工况 2 条件下,前文的模态分析结果表明,增大板厚将使楼盖基频降低,有可能导致人致荷载频率与楼盖基频或是其分频相接近,从而加剧振动响应。因此,该工程不建议采用增大板厚的方式来改善楼盖的舒适度性能。

4.2.3 平梁底板厚度变化分析

利用 ANSYS 对 3 种工况 3 种板厚方案进行动力分析,得到相应的均方根加速度及下降率,如图 9 所示。

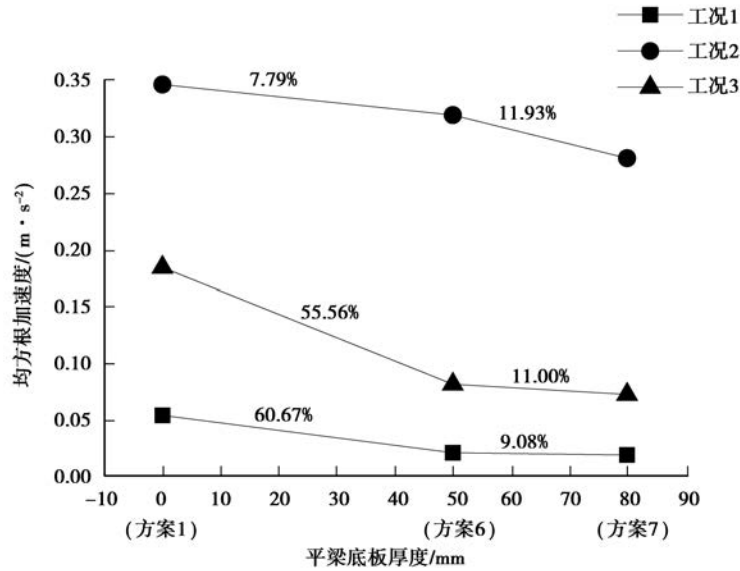
方案 1 未设平梁底板,方案 6 和方案 7 的平梁底板厚度分别为 50、80 mm。由图 9 可知:

1) 方案 6 与方案 1 相比,工况 1、工况 2、工况 3 时的均方根加速度分别下降了 60.67%、7.79%、55.56%;方案 7 与方案 1 相比,工况 1、工况 2、工况 3 时的均方根加速度分别下降了 64.24%、18.79%、60.51%。即是否设置平梁底板对于楼盖的振动响应有较为明显的影响。

2) 方案 6 与方案 7 相比,工况 1、工况 2、工况 3 时的均方根加速度下降率分别为 9.08%、11.93%、11.00%,降幅相对较小。即在设置平梁底板的情况下,增加平梁底板厚度对控制楼盖振动响应的效果并不太显著。

3) 导致上述结果的原因为:是否设置平梁底板将导致截面形心位置及惯性矩的显著变化,而在已设置底板的基础上进一步改变底板厚度的影响则大为降低。

为了对比各工况下的均方根加速度,将工况 3 时人员体重为 50 kg 所致的振动响应线性放大至体重 70 kg 后,可知工况 2 为最不利荷载工况,其均方根加速度为工况 1 的 2.02~27.40 倍、工况 3 的 0.95~6.46 倍,将直接影响楼盖的舒适度评价结果,因此,合理的工况选择对楼盖舒适度评价至关重要。



注:图中均方根加速度下降率为方案6相对于方案1、方案7相对于方案6

图9 均方根加速度与平梁底板厚关系曲线

Fig.9 The relationship between RMS acceleration and the thickness of the bottom slab

5 结 论

对某工程大跨度预应力次梁楼盖运动场大跨度区域进行了7种方案、3种工况的模拟分析,针对该工程得出主要结论和建议:

1)次梁高度增加能够有效增加楼盖自振频率及降低振动响应,次梁高增加20%(1 000~1 200 mm)、25%(1 200~1 500 mm),楼盖基频增幅为10.4%、12.5%,非类共振时各工况其均方根加速度下降率为20.34%~36.14%。

2)在不改变次梁高度情况下,是否增设平梁底板对楼盖自振频率及均方根加速度有显著影响,增设50 mm厚平梁底板,楼盖基频增大17.6%,非类共振时各工况均方根加速度下降率最大为60.67%。

3)在设置了平梁底板的情况下,进一步改变底板厚度对楼盖振动响应影响小,底板厚度为50、80 mm的方案,基频仅相差0.07 Hz,各工况均方根加速度下降率最大为11.93%。

4)对该工程,增加楼板厚度对楼盖振动特性改善效果不明显甚至有不利影响。

5)综合各方案模态及动力分析结果,该工程以设置平梁底板方案最优。

参考文献:

- [1] 李唐宁,秦士洪,周晓雪,等.大跨度预应力次梁楼盖结构体系设计[J].工业建筑,1999,29(10):22-26.
LI Tangning, QIN Shihong, ZHOU Xiaoxue, et al. Structural design of a long-span prestressed concrete secondary beam floor system[J]. Industrial Architecture, 1999, 29(10): 22-26. (in Chinese)
- [2] Aleksandar P, Paul R. Vibration serviceability of long-span concrete building floors. Part 1: review of background information [J]. Shock & Vibration Digest, 2002, 34(3): 191.
- [3] Zhou Xuhong, Liu Jiepeng, Cao Liang, et al. Vibration serviceability of pre-stressed concrete floor system under human activity [J]. Structure & Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design & Performance, 2017, 13 (8): 967-977.
- [4] 叶龙,秦士洪,王耀伟,等.大跨度预应力混凝土次梁楼盖振动舒适度分析[C]//中国土木工程学会.第十六届全国混凝土及预应力混凝土学术会议暨第十二届预应力学术交流会论文集.北京:中国土木工程学会学术委员会,2013,70-76.

- YE Long, QIN Shihong, WANG Yaowei, et al. Vibration comfort analysis of long-span prestressed secondary beams floor system[C]// China Civil Engineering Society. Papers of the The Sixteenth National Symposium on Concrete and Prestressed Concrete and the Twelfth Symposium on Prestressed Concrete. Beijing: Academic Committee of China Civil Engineering Society, 2013, 70-76. (in Chinese)
- [5] Murray, T M, Allen, D E, Ungar E E. Floor vibrations due to human activity[M]. Chicago, Ill. : American Institute of Steel Construction, 1997.
- [6] ATC design guide 1: minimizing floor vibration [S]. Applied Technology Council, California, USA ,1999.
- [7] 中华人民共和国行业标准.《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3—2010)[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
People's Republic of China industry standard. Technical specification for concrete structure of tall building (JGJ3-2010) [S].Beijing: China Architecture & Building Press,2010. (in Chinese)
- [8] 马斐,张志强,张晓峰,等.高铁站房大跨钢楼盖行车和人群荷载激励下振动响应实测与分析[J].建筑结构学报,2018,39(1):109-119.
MA Fei, ZHANG Zhiqiang, ZHANG Xiaofeng, et al. Vibration response measurement and analysis of large-span steel floor structure at high-speed rail station under moving train and crowd excitations [J]. Journal of Building Structures, 2018,39(1): 109-119. (in Chinese)
- [9] R.克拉夫, J.彭津.结构动力学[M].王光远,等译.2rd.北京:高等教育出版社,2006.
Clough R, Penzien J. Dynamics of structures [M]. WANG Guangyuan, et al. 2rd. Beijing: Higher Education Press, 2006.(in Chinese)
- [10] 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.
MA Botao, YANG Guoli, PANG Yutao, et al. Study on comfort analysis of sport field structure with large-span and cantilevered steel floor [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(4): 95-103. (in Chinese)
- [11] 姜文杰.体育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)
- [12] 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,2012:119-122.
LOU Yu, HUANG Jian, LV Zuochao. The design of vibration service ability for floors[M].Science Press, 2012: 119-122. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 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态分析[J].重庆大学学报,2017,40(5):43-48.
HUANG Yin, PENG Junsen, LI Zhegang, 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)
- [15] 陈隽.人致荷载研究综述[J].振动与冲击,2017,36(23):1-9.
CHEN Jun. A review of human-induced loads study [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(23): 1-9. (in Chinese)
- [16] 陈隽,王浩祺,彭怡欣.行走激励的傅里叶级数模型及其参数的实验研究[J].振动与冲击,2014,33(8):11-15.
CHEN Jun, WANG Haoqi, PENG Yixin. Experimental investigation on Fourier-series model of walking load and its coefficients[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(8): 11-15. (in Chinese)
- [17] 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 Jun, WANG Ling, WANG Haoqi. Experimental investigation on single person's jumping load model and its parameters [J]. Journal of Tongji University, 2014, 42(6): 859-866. (in Chinese)