

某剧院大跨度楼板振动舒适度分析

孙艳坤，徐珂，田立强

(北京清城华筑建筑设计研究院，北京100083)

摘要: 本文以某剧场的大跨度楼板为分析对象，运用有限元分析软件SAP2000对其进行自振特性与人群荷载作用下的动力时程分析。研究了不同荷载布置形式与人群激励强度对大跨度楼板结构振动响应的影响。同时采用我国规范对其舒适度进行评价。计算结果表明，大跨度楼板能够满足舒适度要求。

关键词: 人群激励荷载；大跨度楼板；舒适度分析

中图分类号: TU375.2 **文献标识码:** A

Vibration Design of Theater's Floor Systems

SUN Yan-kun XU Ke TIAN Li-qiang

(Beijing THCA Architectural Design & Consulting Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper studied the vibration response of the theater's long-span floor under crowd loads. With the help of the FEM software SAP2000, the vibration characteristics analysis and human induced vibration responses were calculated and compared, considering different cases of load arrangement and load strength. At the same time, the vibration for long-span floor referring to CHINA CODE is analyzed. The results show that the long-span floor meets the requirements of comfort.

Key words: crowd load; long-span floor; comfortable degree

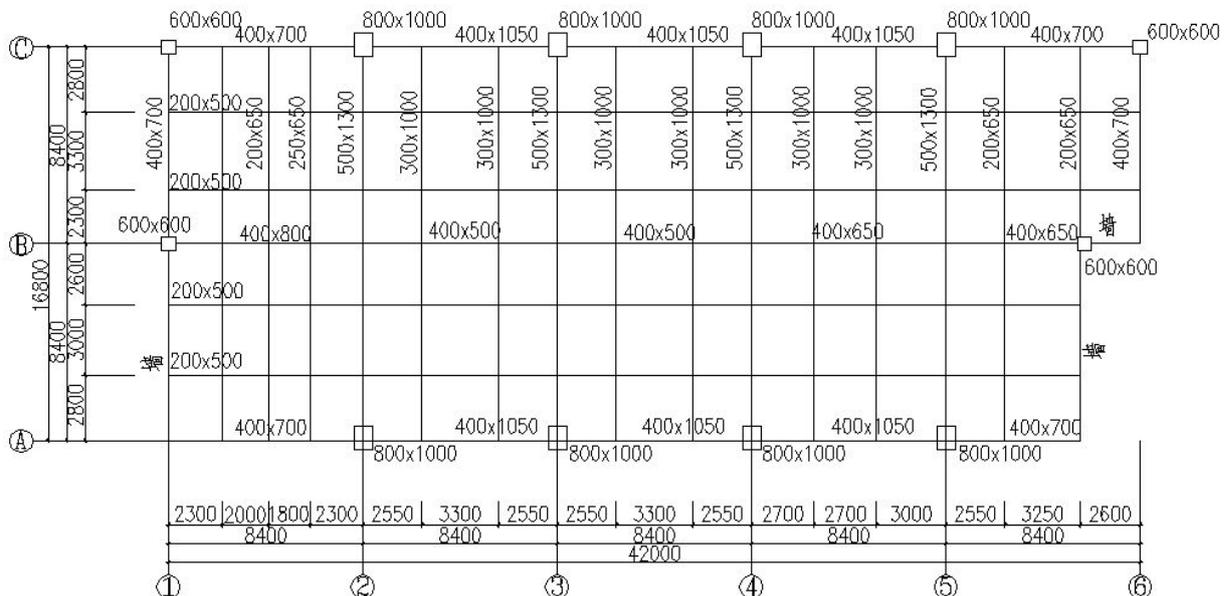


图1 结构布置图

Fig.1 Structure arrangement plans

0 引言

现代剧场等公共建筑中，为了满足空间与使用上的要求局部常设计成大空间结构，从而形成大跨度楼板。而根据不同的使用功能，大跨度楼盖会承受多人规律性运动导致的激励力，从而使得结构产生振动。一旦结构本身及激振力满足一定的条件，结构会出现严重的振动现象。轻者会影响使用的舒适度，重者会破坏结构产生安全隐患。针对上述现象，国内外学者进行了大量相关研究。

对于人行桥舒适度的问题已经取得了大量的研究成果，并且各国规范也有了相应的规定^{[1]-[3]}。针对大跨度楼板，我国相关规范通过自振频率和加速度控制其使用舒适度^[4]；同时，一些学者也做了实际工程的分析研究^{[5]-[7]}，得出了有益的结论。但相对于大面积、有规律的人群荷载对于大跨度楼板影响的研究还相对较少，因此进行相关研究是十分必要的。

本文以某剧场中的大跨度楼板为研究对象，依据我国规范的相关条文对其使用舒适度进行分析验算。并采用有限元分析软件SAP2000对楼板进行自振特性研究，并进行不同荷载布置与强度作用下的楼板动力响应分析，研究其使用舒适度。

1 有限元模型

计算模型选取某剧场中一跨楼板，其左部为舞台，右部为观众席，周边柱子支撑，局部墙支撑。楼板跨度为16.8m×42m，楼板厚度为120mm，墙厚为300mm，层高为3.6m，混凝土强度等级C30，结构布置及梁柱截面见图1所示。

根据结构使用情况和建筑做法，在不考虑自重的情况下，1到3轴间的板面承受4kN/m²的恒载，3到4轴与5到6轴之间的板面承受3kN/m²的恒载，4到5轴间的板面承受3.5kN/m²的恒载。同时，1到3轴间的板面承受4kN/m²的活载，3到6轴之间的板面承受3.5kN/m²的活载。部分梁的隔墙荷载也按线荷载考虑施加。

采用SAP2000程序进行自振特性分析与动力时程分析。楼板采用薄壳单元模拟其受力特性。每个板格剖分为16个单元，并产生节点。为了使得受力协调合理，墙面与板相交的边划分为4份，另一个方向不划分。柱子和墙底节点固定支撑。结构有限元计算模型见图2所示：

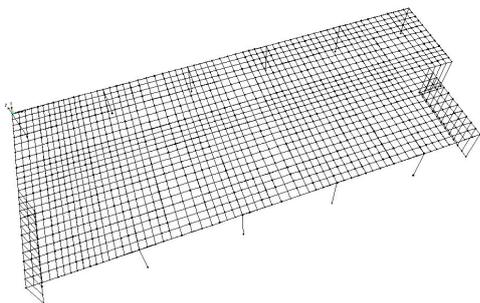


图2 有限元计算模型

Fig.2 Finite element model

2 大跨度楼板自振特性分析

进行自振特性分析时，质量源按规范重力荷载代表值的规定选取，为1倍恒载+0.5倍活载。通过分析之后，

楼板的自振特性见表1所示：

其前四阶自振模态见图3所示，其中第一阶与第二阶为局部竖向振动，第三阶与第四阶为竖向扭转振动。

表1 自振特性

Tab.1 Vibration characteristics

阶数	周期 (s)	自振频率 (Hz)	阶数	周期 (s)	自振频率 (Hz)
1	0.218	4.593	7	0.133	7.541
2	0.213	4.693	8	0.117	8.526
3	0.190	5.269	9	0.109	9.157
4	0.175	5.709	10	0.107	9.305
5	0.152	6.593	11	0.102	9.763
6	0.140	7.142	12	0.098	10.202

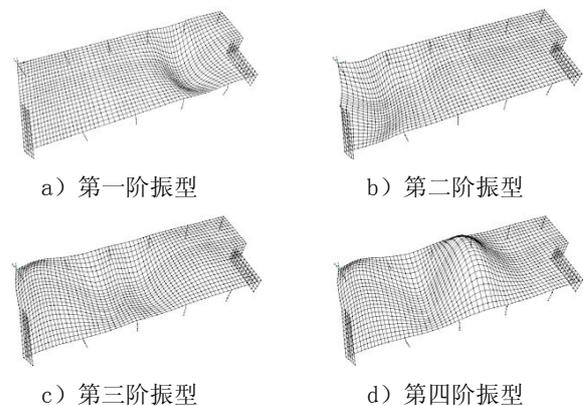


图3 楼板自振模态

Fig.3 Floor vibration modal

3 基于我国规范的舒适度分析

《高层建筑混凝土结构技术规程》^[4]第3.7.7条规定楼盖结构应具有适宜的舒适度，其竖向振动频率不宜小于3Hz，竖向振动加速度峰值不应超过相关限值。

由上表可以看出，楼板第一阶竖向振动自振频率为4.593Hz>3Hz，满足规范要求。

楼板振动峰值加速的按式(1)、式(2)计算。

$$\alpha_p = \frac{F_p}{2\beta\omega} g \quad (1)$$

$$F_p = P_0 e^{-0.35f_n} \quad (2)$$

式中： α_p —楼盖振动峰值加速度(m/s²)；

F_p —接近楼盖自振频率时人行走产生的作用力(kN)；

p_0 —人行走产生的作用力(kN)；

f_n —楼盖结构竖向自振频率(Hz)；

β ——楼盖结构阻尼比;

ω ——楼盖结构阻抗有效重量(kN);

g ——重力加速度。

通过上式计算得 $F_p=0.0601(\text{kN})$, $\alpha_p=0.126\text{m/s}^2$ 。由于结构的自振频率大于 4Hz, 而且剧场的使用情况与商场、连廊的性质相近, 因此楼盖竖向振动加速度限值可取 0.15 m/s^2 , 与计算结果比较, 满足规范要求。

通过上述分析可以知道, 大跨度楼盖结构的使用舒适度满足规范要求。

4 楼板动力响应分析及舒适度分析

人致荷载模型采用瑞典 Bro2004^[8]验算人行桥振动舒适性的计算模型, 考虑人群荷载的影响, 其计算公式见式 (3) 所示:

$$F = k_1 k_2 \sin(2\pi ft) \quad (3)$$

式中, $k_1 = \sqrt{0.1BL}$; B 、 L 为桥面的宽度和跨径,

本文取楼板的宽度与长度。0.1 人/ m^2 为行人密度, 采用根号是考虑人群荷载按随机步行情况考虑。由于舞台上舞者的荷载随着音乐节拍有节奏变化的, 因此本文采用 $k_1 = 0.1BL$ 的参数计算方法; $K_2=150\text{N}$, 表示单人竖向

力幅值。 f 为人跳舞时的步频, 根据 Aikaterini 测试统计得出人跳舞时的步频约为 1.0~2.8Hz 并取决于音乐的节拍^[6], 步频越高结构的振动响应越大, 因此本文采用 2.8Hz 作为步频取值。由于舞台上的人群密度可能很大, 本文计算人群密度分别取 1.0 人/ m^2 、1.5 人/ m^2 和 2.0 人/ m^2 三种情况, 动力荷载值见表 2 所示。考虑到观众有可能情绪高涨随着节拍与演员同时跳动, 因此荷载布置形式有 1~3 轴半跨布置与全跨布置两种形式。

表 2: 动力荷载值

Tab.2 Dynamic load value

人群密度	动力荷载值 (kN/ m^2)
1.0 人/ m^2	$0.150\sin(17.584t)$
1.5 人/ m^2	$0.225\sin(17.584t)$
2.0 人/ m^2	$0.300\sin(17.584t)$

通过计算, 获取每种计算模型情况下, 楼盖竖向响应峰值加速度的最大值与节点号。其分析结果见表 3 所示, 相应节点加速度时程曲线见图 4 所示:

其中 1969 号节点处于 2 轴左侧 3.2m、B 轴上侧 1.725m 处; 1969 号节点处于 5 轴左侧 3.675m、B 轴下侧 0.65m 处。由上表可以看出相同的荷载布置形式下, 结构竖向峰值加速度出现的位置相同, 不会随着荷载幅

值的增加而改变。在相同荷载布置情况下, 荷载幅值越大, 竖向峰值加速度越大。在相同荷载幅值情况下, 满跨布置形式的峰值加速度比半跨布置形式的峰值加速度大。

由图 4 可以看出, 结构只在激励的前 3s 有较大的响应, 且峰值出现时间均为 0.271s, 为激励加载的早期, 之后振动趋于有规律的递减平缓振动。说明在文章所选激励作用下对于结构的长期影响较小。

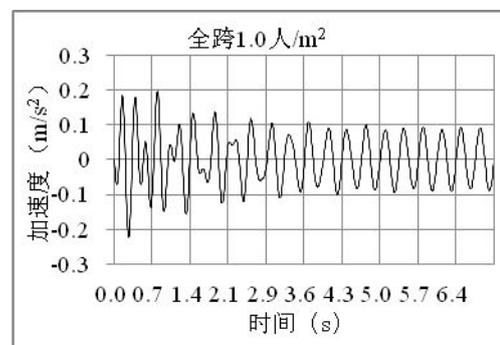
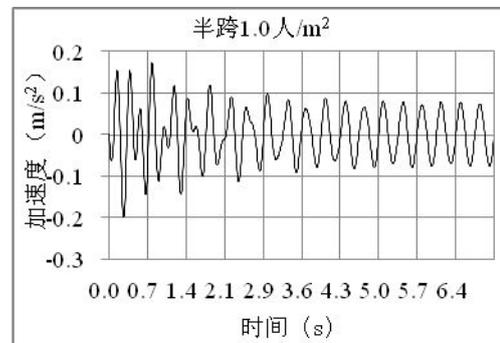
本文大跨度楼板舒适度的评价准则采用 ATC 户外天桥标准, 竖向峰值加速度限值为 0.5m/s^2 ^[9]。

由表 3 可以看出, 最大的竖向加速度为 $0.445\text{m/s}^2 < 0.5\text{m/s}^2$, 满足舒适度要求。

表 3: 竖向响应峰值加速度

Tab.3 Vertical response acceleration

荷载布置形式	荷载幅值	节点编号	峰值加速度 (m/s^2)	出现时间 (s)
半跨布置形式	1.0 人/ m^2	1969	-0.199	0.271
	1.5 人/ m^2	1969	-0.299	0.271
	2.0 人/ m^2	1969	-0.398	0.271
全跨布置形式	1.0 人/ m^2	1315	-0.227	0.271
	1.5 人/ m^2	1315	-0.334	0.271
	2.0 人/ m^2	1315	-0.445	0.271



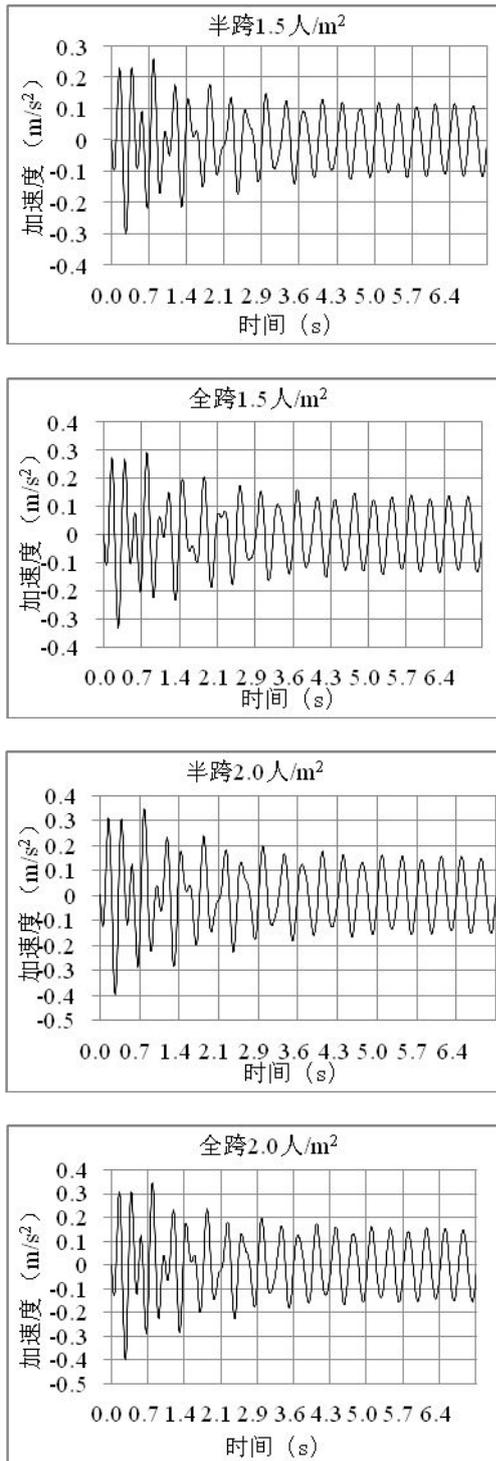


图4 节点竖向加速时程曲线

Fig.4 nodes vertical acceleration time history curve

5 结论

通过上述研究，可以得出如下结论

(1) 本文所研究的大跨度楼板结构符合我国规范对于舒适度的要求；

(2) 大跨度楼板结构在人至荷载作用下，只在激励的前3s有较大的响应，之后趋于有规律的递减平缓

振动。因此，在一般情况下，人至荷载对大跨度楼板的影响较小。

(3) 依据 ATC 舒适度准则，本文研究模型满足舒适度要求，符合使用要求。

参考文献

- [1] America Institute of Steel Construction .AISC 811-97 Steel design guide series II: floor vibrations due to human activity[S]. Chicago IL, 1978.
- [2] Applied Technology Council. ATC design guide 1: minimizing floo vibration[S]. Redwood City CA,1999.
- [3] GJJ 69-1995. 城市人行天桥与人行地道技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- [4] JGJ 3-2010. 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [5] 张家华,高承勇,秦卫红等. 大跨度楼面人群荷载作用响应分析[J]. 建筑结构学报, 2011(7): 177-182.
- [6] 黄瑞. 大跨度升降舞台的动力分析及其舒适度评价[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.
- [7] 吕佐超,韩合军,黄健等. 北京银泰中心楼盖体系舒适度设[J]. 建筑结构, 2007(11): 19-22.
- [8] 陈宇. 步行荷载激励下大跨度人行桥的振动研究和减振研究 [D]. 北京: 清华大学, 2007.
- [9] 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控制[J]. 土木工程学报, 2011(10): 74-80.

徐珂：一个普通的结构工程师，参与计算、画图 20 年，关注结构新技术及精细化设计，目前就职北京清华城市规划设计研究院。从 2006 年开始写个人博客（<http://www.jiegoublog.cn/>），记录工作中的想法和解决方案，希望通过不断地积累与更新，为下一个满意的结构作品做准备。

