



贵州大学学报(自然科学版)
Journal of Guizhou University(Natural Sciences)
ISSN 1000-5269,CN 52-5002/N

《贵州大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目: 不同人致激励下空腹夹层板楼盖振动舒适度研究
作者: 钟永力, 晏致涛, 陈靖, 罗杰
收稿日期: 2022-07-13
网络首发日期: 2023-03-20
引用格式: 钟永力, 晏致涛, 陈靖, 罗杰. 不同人致激励下空腹夹层板楼盖振动舒适度研究[J/OL]. 贵州大学学报(自然科学版).
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/52.5002.n.20230317.0920.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

不同人致激励下空腹夹层板楼盖振动舒适度研究

钟永力^{1*},晏致涛¹,陈靖²,罗杰³

(1. 重庆科技学院 建筑工程学院,重庆 401331;2. 贵州大学 空间结构研究中心,贵州 贵阳 550003;
3. 中建四局贵州投资建设有限公司,贵州 贵阳 550014)

摘要:舒适度是大跨度楼盖中重要的控制指标。基于舒适度评价标准,对大跨度空腹夹层板楼盖进行了动力响应分析,研究了不同人行激励下空腹夹层板楼盖的舒适度性能。结果表明:空腹夹层板振型以竖向为主,在定点激励下,其峰值加速度随着激励频率的增大而增大;通过低阶振型中心的激励产生的加速度大于未通过低阶振型中心路线;有规律人体高强度运动荷载激励下,空腹夹层板峰值加速度较大,在工程设计中应该进行舒适度分析,加强楼盖的振动控制。

关键词:空腹夹层板;振动舒适度;动力特性;加速度响应;人致荷载

中图分类号:TU375 **文献标志码:**A

钢筋混凝土空腹夹层板是一种新型大跨度楼盖结构,目前已在国内得到了广泛的应用^[1]。但是由于其自重轻、基频低的特点^[2],容易出现舒适度问题,导致人体感受不适甚至恐惧,影响建筑物的正常使用^[3]。因此,对于大跨度楼盖的设计,除了需要满足强度以及刚度要求,充分考虑其振动的舒适度问题是非常必要的。

为了避免楼盖的振动过大,Tredgold^[4]提出了第一个楼盖的刚度标准。对于传统大跨度楼盖的舒适度,国内外学者进行了广泛的研究^[5-7]。然而,国内外针对空腹夹层板这种新型楼盖的舒适度问题研究才刚刚开始。姜岚等^[8]基于行走路线法与定点激励法研究了不同行走路线对空腹夹层板楼盖的舒适度,结果表明相对于定点激励法,行走路线法评价舒适度更有优势,并且低阶振型中心更容易出现加速度峰值。随后,姜岚等^[9]分析了跨高比、空腹率等参数对人行激励下加速度峰值的影响,发现空腹夹层板加速度峰值接近规范限值,建议在工程设计中应该重视舒适度分析。

此外,引起楼盖振动的不确定性因素较多,从而导致对其分析也较为复杂。空腹夹层板作为一种性能优良的大跨度楼盖结构体系,已被应用于各种功能的建筑,例如排球馆、商场以及博物馆等^[10-11]。基于定点激励法与行走路线法的舒适度

分析方法与实际使用情况有一定的差别,无法为结构设计提供有效的参考。尽管可以通过实验获得结构的精确加速度响应,但相关成本较高。因此,本文首先基于定点激励法与行走路线法研究了人致荷载频率以及行走路线对空腹夹层板的舒适度性能的影响;其次,通过考虑结构不同的使用功能,采用3种人群活动激励方式进一步对空腹夹层板楼盖的舒适度进行对比分析,从而为大跨度空腹夹层板楼盖工程设计提供参考。

1 计算模型及分析方法

1.1 计算模型

对于大跨度空腹夹层板楼盖体系,其跨度通常在24~32 m之间^[1]。因此,本研究采用典型周边多点支撑的楼盖体系,选取结构跨度为24 m×24 m,周边柱网6 m,网格尺寸为2 000 mm,结构平面布置如图1所示。取空腹夹层板高度为900 mm,上下肋截面尺寸为400 mm×250 mm,如图2所示,边梁尺寸为400 mm×1 000 mm。其中,混凝土材料的密度为2 500 kg/m³,弹性模量为3×10⁴ N/mm²,泊松比为0.2。采用商用有限元软件SAP2000进行数值计算分析。空腹夹层板的上肋、下肋、剪力键与柱子采用空间梁单元,表层薄板均采用薄壳单元,而空腹夹层板楼盖体系的边梁采用厚壳单元进

收稿日期:2022-07-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52008070);重庆市教委科学技术研究计划青年项目(KJQN202001511)

作者简介:钟永力(1989—),男,博士,研究方向:结构风工程及大跨空间结构,E-mail:zhongyongli@cqust.edu.cn.

* 通讯作者:钟永力,E-mail:zhongyongli@cqust.edu.cn.

行模拟。

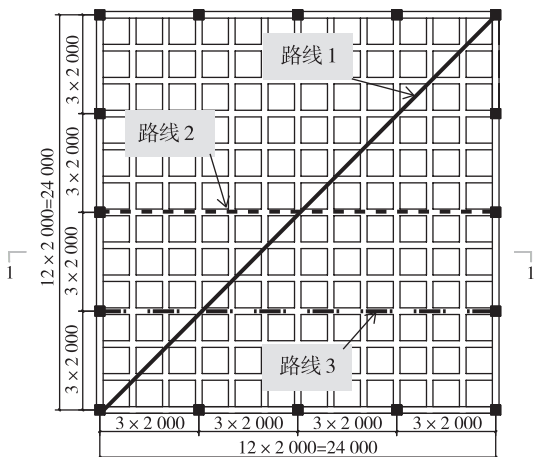


图1 楼盖平面布置图(单位:mm)
Fig.1 Layout plan of the floor

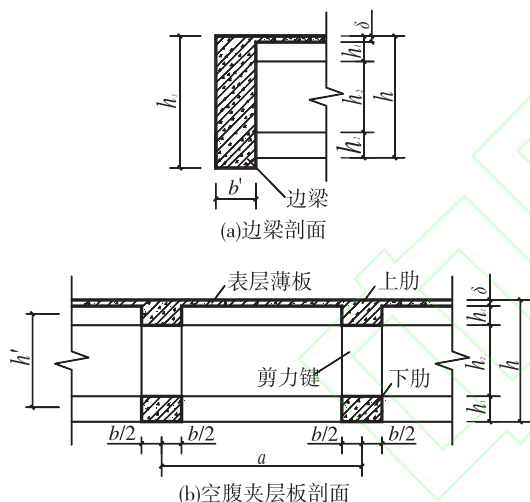


图2 空腹夹层板剖面图

Fig.2 Section diagram of open-web sandwich plate

1.2 人行荷载及工况

1.2.1 单人激励荷载

单步落足模型激励曲线是研究人行荷载的基础,与人的步频以及体重有直接的关系,针对单人步行时的激励曲线,国内外学者进行了较为深入的研究,其激励曲线如图3所示^[12]。Ohlsson 和 Ellinwood^[13]通过对单步落足曲线进行周期性叠加并考虑一定的重叠时间,提出了人在连续行走过程中产生的激励时程曲线,如图4所示。

本文拟采用定点激励法研究不同激励频率对楼板振动的影响,这种方法通常在楼盖第一振型竖向曲线振幅最大位置施加连续行走激励。此外,采用行走路线法研究单人行走激励对空腹夹层板舒

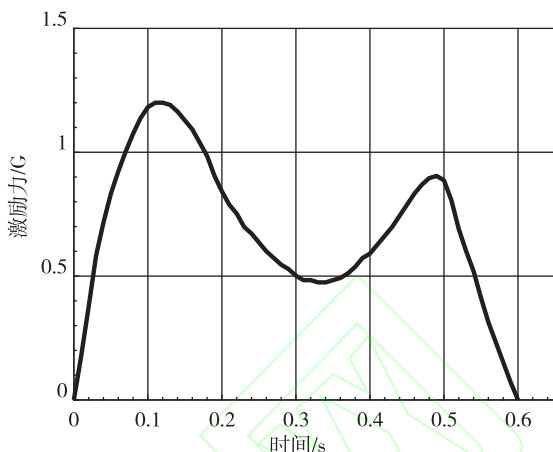


图3 单步落足激励曲线

Fig.3 Excitation curve of single step foot

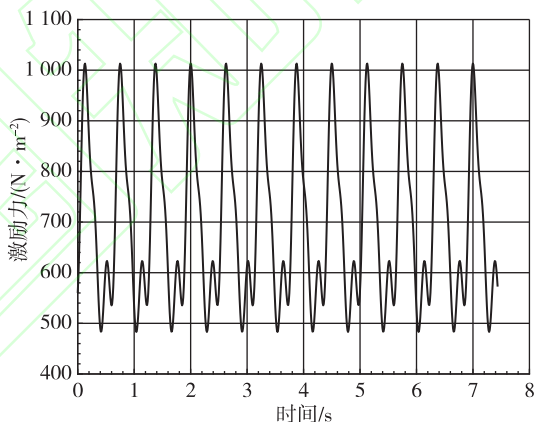


图4 连续行走激励曲线

Fig.4 Excitation curve of continuous walking

适度的影响,根据行走的步频和步幅,在不同的时间对行走路线上不同的点输入单步落足激励荷载进行计算^[8],行走路线布置如图1所示。

1.2.2 人群荷载工况

工况1:假设空腹夹层板作为会场楼盖,则考虑大会堂所有人突然起立,假设每个人起立的动作完全同步,朱鸣等^[14]提出了起立时人群对楼盖的作用荷载曲线为一正弦曲线,得到人体重心起立时运动的加速度(a)、速度(v)和位移(s)分别为

$$\begin{cases} a(t) = \frac{h_1}{2\pi T^2} \sin \frac{2\pi}{T} t & 0 \leq t \leq T \\ v(t) = \frac{h_1}{T} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T} t \right) & 0 \leq t \leq T \\ s(t) = \frac{h_1}{2\pi T^2} \sin \frac{2\pi}{T} t + \frac{h_1}{T} t & 0 \leq t \leq T \end{cases}$$

其中: t 为时间; T 为起立过程的持续时间; h_1 为起立前后人体重心的高差。假定 $h_1 = 0.4\text{ m}$, 若每个人起立持续时间相同为 1 s , 则可得加速度峰值 $a_{\max} = 2.512\text{ m/s}^2$, 可得动力系数为 $\alpha = 0.256^{[14]}$, 考虑单人重量 70 kg , 每 m^2 分布 1 人, 等效均布荷载为 0.7 kPa , 整个楼盖满跨布置, 以考虑最不利情况, 集体起立荷载时程曲线如图 5 所示。

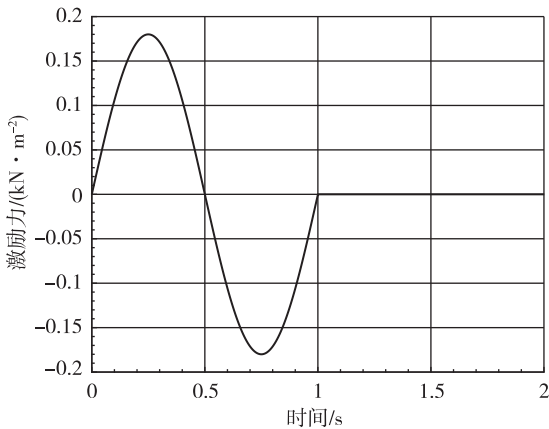


图 5 起立激励曲线
Fig. 5 Excitation curve of stand up

工况 2: 假设该 $24\text{ m} \times 24\text{ m}$ 空腹夹层板作为羽毛球场馆楼盖, 根据国际羽联规定, 羽毛球馆尺寸通常为 $13.4\text{ m} \times 6.1\text{ m}$, 考虑 20 人在场地中央 $20\text{ m} \times 18\text{ m}$ 区域同时跳跃。跳跃荷载采用 Silva 和 Thambiratnam^[15] 提出的模型

$$\begin{cases} F(t) = \left(\frac{\pi Q}{2d}\right)\sin\left(\frac{\pi t}{t_p}\right) & 0 \leq t \leq t_p \\ F(t) = 0 & t_p \leq t \leq T \end{cases} \quad (2)$$

式中: Q 表示荷载密度; t_p 表示接触持续时间; T 表示人跳跃周期; $d = t_p/T$ 表示接触比, 取 0.33 , 跳跃荷载频率介于 $2.4 \sim 3.5\text{ Hz}$ 之间^[16], 本文取中间值 3 Hz 分析, 分析采用的荷载函数不少于 6 s , 计算时间取 10 s , 以研究停止跳跃后振动的衰减。

工况 3: 如果夹层板正好作为 1 个人行通道使用, 考虑 24 人在楼盖中间 $24\text{ m} \times 12\text{ m}$ 区域快速跑

动对楼盖的影响。人步行激励曲线采用上述连续行走激励曲线, 快跑频率取 3 Hz 。

1.3 舒适度评价标准

目前国内外关于楼盖竖向振动舒适度的规定相对较多, 我国《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)^[17] 对楼盖舒适度进行了相应的规定, 如表 1 所示, 本文将以此作为舒适度满足与否的判别标准。此外, 国外针对舒适度的标准较多, 例如 PCI 标准对不同楼盖功能的振动舒适度进行了具体的要求^[18], 本研究也将其作为参考。

表 1 楼盖竖向振动加速度的限值
Tab. 1 Recommended values of acceleration for vertical vibration

人员活动环境	峰值加速度限值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	
	竖向自振频率不大于 2 Hz	竖向自振频率不小于 4 Hz
住宅、办公	0.07	0.05
商场及室内连廊	0.22	0.15

2 计算结果分析

2.1 自振特性分析

空腹夹层板楼盖前 6 阶振型及频率(f) 如图 6 所示。可以看出, 空腹夹层板楼盖体系主要以竖向振动为主, 在行人活动激励下, 更容易产生舒适度问题。第一阶自振频率满足规范要求的频率取值^[17]。

2.2 不同频率时定点激励下舒适度分析

激励频率为 2 Hz 时, 楼盖最大响应点加速度时程如图 7 所示。可以看出, 定点激励下, 在激励荷载刚开始作用不久就出现加速度的最大值, 即峰值加速度; 随着荷载作用时间的增加, 加速度幅值稍有减小, 并且趋于平稳。不同行走激励频率的加速度峰值如图 8 所示。随着激励荷载频率的增加, 空腹夹层板峰值加速度大致是逐渐增大的, 这是由于当激励荷载频率逐步增大, 慢慢接近结构的自振频率, 容易发生共振。

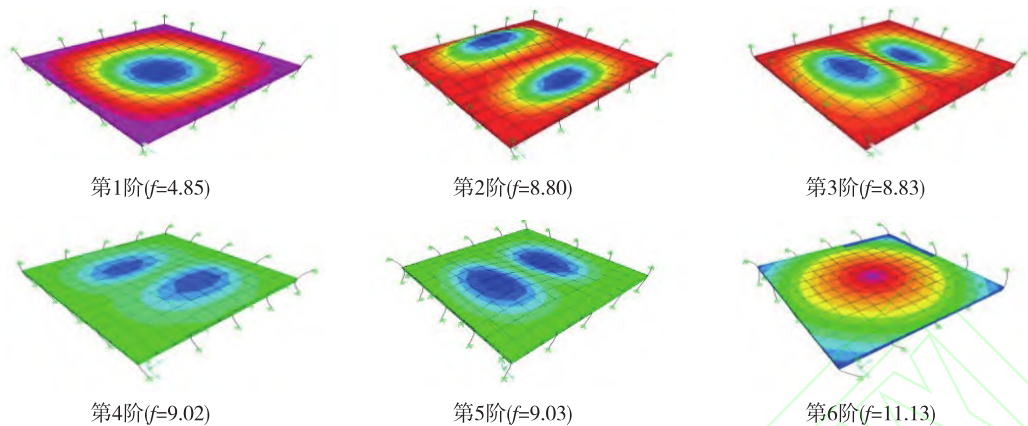


图 6 空腹夹层板前 6 阶振型
Fig. 6 The first six modes of open-web sandwich plate

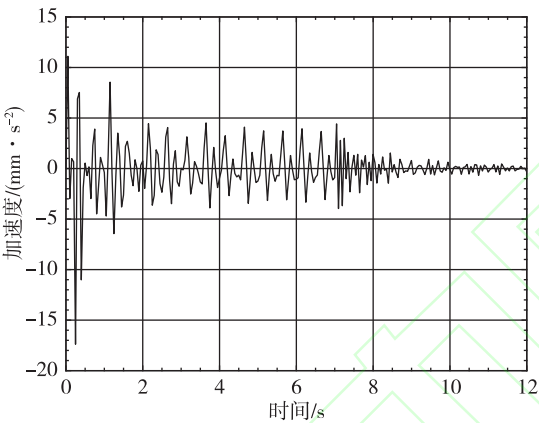


图 7 定点激励下 (2.0 Hz) 加速度曲线
Fig. 7 Acceleration curve under fixed-point excitation (2.0 Hz)

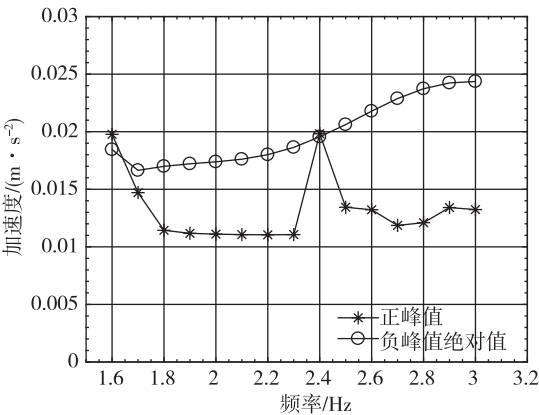


图 8 不同频率定点激励加速度峰值
Fig. 8 Peak acceleration of fixed-point excitation with different frequencies

2.3 不同行走路线时舒适度

由图 6 可知,楼盖的低阶振型中心位于楼盖的几何中心处。在楼盖的低阶振型中心,激励荷载作用下加速度的响应达到最大值,因此,提取空腹夹层板楼盖中心处的加速度时程响应曲线如图 9 所示。可以看出,当行走激励进行一半时,加速度响应达到最大值,即人行走到几何中心时加速度达到峰值。图 10 为各行走路线对应的加速度峰值。在 3 条行走路线中,行走路线为路线 1 和路线 2 时,其加速度峰值远大于路线 3,即通过楼盖结构低阶振型中心的行走路线峰值加速度比偏离低阶振型中心的行走路线峰值加速度大,说明行走路线偏离低阶振型中心时对峰值加速度影响较大,所以在采用行走路线法评价舒适度时,应该尽量选择通过楼盖低阶振型中心的路线。

采用定点激励法与行走路线法,人致激励荷载都比较单一,这些使用情况多处于住宅或者办公建筑。根据舒适度准则要求,加速度响应需小于 0.05 m/s^2 。因此,两种激励情况下都能满足我国规范要求。

2.4 人群荷载下空腹楼盖的舒适度分析

目前建成的钢筋混凝土空腹夹层板大跨度楼盖,得到了不同使用功能的应用,比如体育场馆、会场等,本节根据使用功能采用不同工况荷载进行激励,以研究它们在不同工况下的舒适度。从图 11 可以看出,在 3 种工况作用下,空腹夹层板楼盖的加速度峰值基本都出现在激励的开始阶段,这说明突加荷载对结构振动的影响较大。

不同工况下加速度峰值响应如表 2 所示。当空腹夹层板楼盖结构使用功能为会场(工况 1)或

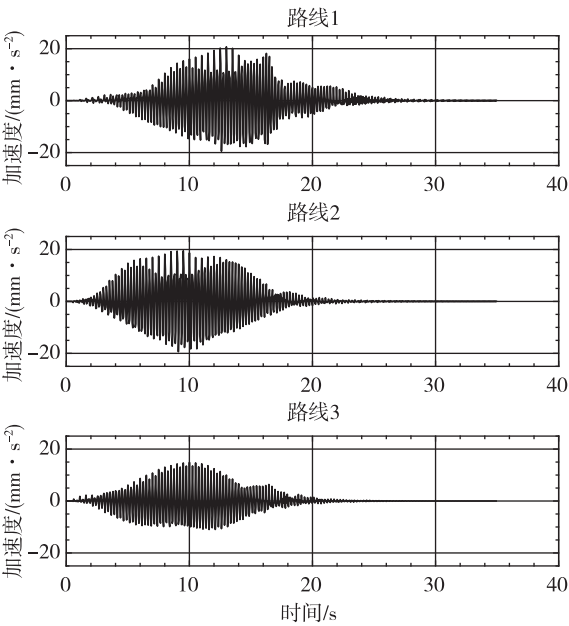


图9 不同路线楼板中心加速度时程响应
Fig.9 Time-history of floor center acceleration with different walking routes

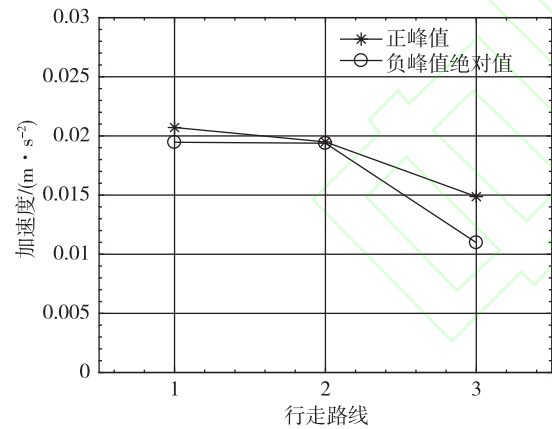


图10 不同路线楼板中心加速度峰值
Fig.10 Peak acceleration of central point with different walking routes

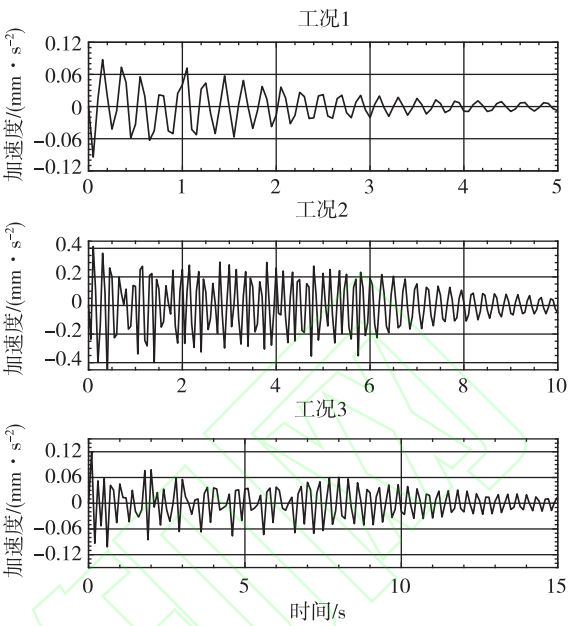


图11 3种工况加速度时程曲线
Fig.11 Time-history of acceleration for three cases

表2 不同工况下加速度峰值响应
Tab.2 Peak values of acceleration for three cases

工况	加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	
	正峰值	负峰值
1	0.088	0.094
2	0.413	0.495
3	0.120	0.101

3 结论

采用有限元软件 SAP2000 对不同的人致荷载下大跨度空腹夹层板楼盖进行了舒适度分析,得到如下结论:

1)常规跨度空腹夹层板楼盖以竖向振动为主,其振动频率能够满足规范对楼盖竖向振动频率的基本要求。

2)在典型人行活动频率范围内,随着激励频率的增大,空腹夹层板峰值加速度也逐渐增大;针对不同的行走路线,通过低阶振型中心的激励产生的加速度大于未通过低阶振型中心路线。

3)非剧烈人群活动激励下,产生的加速度响应能满足中国规范要求;而在人体剧烈运动荷载激励下,产生的加速度响应高于我国规范限值,而参照 PCI 标准,峰值加速度响应满足要求,但比较接近限值,建议设计时应加强对楼盖舒适度的控制。

者通道(工况3)时,加速度响应较小,满足规范规定的 0.15 m/s^2 的限值,并且还有一定的富余量。然而,当空腹夹层板用于体育场馆时,在跳跃荷载激励下,产生了较大的加速度响应,超过了中国规范规定的限值。然而,美国 PCI 标准规定频率3 Hz以上的楼盖,在有节奏运动情况下,可以接受的加速度限值为 $0.4 \sim 0.7 \text{ m/s}^2$ 。参照这一加速度标准,空腹夹层板楼盖作为体育场馆时也能满足要求,但是比较接近有关标准的限值,在进行结构设计时,应该加强对舒适度的控制要求。

参考文献:

- [1] 马克俭, 张华刚, 郑涛. 新型建筑空间网格结构理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [2] 钟永力, 张华刚, 马克俭. 空腹夹层板的自振特性分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2014, 31(1): 104-107.
- [3] 陈隽. 人致荷载与人致结构振动[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [4] TREDGOLD T. Elementary principles of carpentry [M]. London: E & F. N. Spon, 1875.
- [5] ZHOU X H, CAO L, CHEN Y F, et al. Experimental and analytical studies on the vibration serviceability of pre-stressed cable RC truss floor systems [J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 361: 130-147.
- [6] 折雄雄, 陈隽. 大跨度楼盖振动舒适度研究综述[J]. 结构工程师, 2009, 25(6): 144-149.
- [7] HUANG M H, THAMBIRATNAM D P, PERERA N J. Dynamic performance of slender suspension footbridges under eccentric walking dynamic loads [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 303: 239-254.
- [8] 姜岚, 张华刚, 袁波, 等. 行走激励下大跨度空腹夹层板结构振动舒适度分析[J]. 四川建筑科学研究, 2012, 38(1): 9-13.
- [9] 姜岚, 马克俭, 张华刚, 等. 大跨度空腹夹层板楼盖基于行走路线法的舒适度时程分析[J]. 空间结构, 2016, 22(2): 28-36, 43.
- [10] 马克俭, 张华刚, 肖建春, 等. 中国钢筋混凝土空间网格结构新体系的开拓与发展(上)[J]. 中国工程科学, 2008, 10(7): 4-17, 34.
- [11] 吴多东, 栾焕强, 马克俭. 某大跨度混凝土空腹夹层板楼盖分析与设计[J]. 建筑结构, 2018, 48(4): 1-6.
- [12] 曹亮. 楼盖在人致振动作用下的加速度响应分析理论及试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [13] ELLINGWOOD B M, TALLIN A. Structural serviceability: floor vibration [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1984(2): 401-418.
- [14] 朱鸣, 张志强, 柯长华, 等. 大跨度钢结构楼盖竖向振动舒适度的研究[J]. 建筑结构, 2008(1): 72-76.
- [15] SILVA S, THAMBIRATNAM D P. Dynamic characteristics of steel-deck composite floors under human-induced loads [J]. Computers and Structures, 2009, 87(17-18): 1067-1076.
- [16] 于敬海, 曹建锋, 李敬明. 跳跃荷载作用下大跨度钢筋混凝土楼盖舒适度分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2013, 35(6): 64-67, 103.
- [17] 中华人民共和国行业标准. 高层建筑混凝土结构技术规程(JGJ 3—2010) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [18] PCI Industry Handbook Committee. PCI design handbook: Precast/Prestressed Concrete [M]. 7th ed. Chicago: Precast/Prestressed Concrete Institute, 2010.

(责任编辑: 曾 晶)

Study on Vibration Serviceability of Open-Web Sandwich Plate Under Different Human-Induced Load

ZHONG Yongli¹*, YAN Zhitao¹, CHEN Jing², LUO Jie³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;

2. Space Structure Research Center, Guizhou University, Guiyang 550003, China;

3. China Construction Fourth Engineering Bureau Guizhou Investment and Construction Co., Ltd., Guiyang 550014, China)

Abstract: Vibration serviceability is an important control index in large-span floor. Based on the evaluation standard of vibration serviceability, the dynamic response of large span open-web sandwich plate is analyzed, and the performance of vibration serviceability for open-web sandwich plate under different human-induced load is investigated. The results show that the vibration mode of open-web sandwich plate is mainly vertical, and its peak acceleration increases with the increase of excitation frequency under fixed-point excitation. The acceleration generated by the excitation passing through the center of the low-order mode is greater than that not passing through the center of the low-order mode; under the excitation of loading with regular human high-intensity motion, the peak acceleration of open-web sandwich plate is relatively large. So analysis on vibration serviceability should be carried out in engineering design to strengthen the vibration control of floor.

Key words: open-web sandwich plate; vibration serviceability; dynamic characteristics; acceleration response; human-induced load