

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201703006



蜂窝形钢空腹夹层板楼盖 振动舒适度分析

才琪, 马克俭, 刘卓群, 申波

(贵州大学 空间结构研究中心, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 为了研究新型蜂窝形钢空腹夹层板楼盖的竖向振动舒适度,以自振频率和加速度为双控指标,采用子空间迭代法计算结构基频和各阶振型;然后,采用行走路线法对结构进行时程分析,计算结构在人行荷载作用下的加速度响应.考虑跨高比,上覆混凝土板厚度和上、下肋刚度对结构基频和加速度响应的影响,对结构进行参数化分析.结果表明:蜂窝形钢空腹夹层板基频随着跨高比、上覆混凝土板厚度的增大而减小,随着上、下肋刚度的增大而增大;峰值加速度随着跨高比的增大而增大,随着上覆混凝土板厚度及上、下肋刚度的增大而减小.

关键词: 蜂窝形钢空腹夹层板; 自振频率; 加速度; 行走路线法; 参数化分析

中图分类号: TU 352.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2017)03-0312-07

Vibration Comfort Analysis of Honeycomb Shape Steel Open-Web Sandwich Plate

CAI Qi, MA Kejian, LIU Zhuoqun, SHEN Bo

(Space Structure Research Center, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract: In order to study the vibration comfort of the honeycomb shape steel open-web sandwich plate, taking natural frequency and acceleration as the double control index, using the subspace iteration method to calculate the fundamental frequency and every vibration mode. The time history analysis of the structure is carried out by the method of the walking route, and the acceleration response of the structure under the pedestrian load is calculated. Considering the influence of the span-to-depth ratio, the thickness of the overlying concrete slab, the upper and lower rib stiffness on the structural fundamental frequency and acceleration response, the parametric analysis is performed. The results show that the fundamental frequency of the honeycomb decreases with the increase of the span-to-depth ratio and the thickness of the concrete slab, but increases with the increase of the stiffness of the upper and lower ribs. The peak acceleration increases with the increase of the span-to-depth ratio, but decreases with the increase of the thickness of the concrete slab and the upper and lower ribs stiffness.

Keywords: honeycomb shape steel open-web sandwich plat; natural frequency; acceleration; walking route method; parametric analysis

收稿日期: 2016-07-04

通信作者: 马克俭(1934-),男,教授,博士生导师,中国工程院院士,主要从事新型大跨度空间网格结构的研究. E-mail: makejian2002@163.com.

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAJ09B01-01); 贵州省科技合作计划项目(20167468); 贵州省科技创新人才团队建设基金资助项目(20144012); 贵州大学研究生创新基金资助项目(2016001)

近年来,随着轻质、高强楼板体系及大跨度结构在公共建筑及住宅中的广泛应用,人的活动导致的楼板振动问题也越来越引起国内外研究人员的关注^[1-7]. 英国的千禧桥^[1]、韩国的 Techno Mart 大楼^[2]和日本户田公园大桥^[3]都曾因为舒适度问题而加固检修,因此,有必要验算结构的振动是否满足舒适度要求. Ellingwood 等^[4]研究了楼板结构在人行荷载作用下的动力反应,提出了依据楼板振幅和频率来判断结构舒适度的方法. GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》和 CECS 273—2010《组合楼板设计与施工规范》均要求组合楼盖的自振频率不宜小于 3 Hz. JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》除了规定楼盖的基频不宜小于 3 Hz 外,还要求商场及室内连廊楼盖的竖向自振频率不大于 2 Hz 时,峰值加速度限值为 $0.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;竖向自振频率不小于 4 Hz 时,峰值加速度限值为 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. 空腹夹层板楼盖是由两层密肋楼盖通过剪力键连接而共同工作的新型空间楼盖结构,目前已应用国内数十项工程,取得了良好的经济效益和社会效益^[5]. 姜岚等^[2]分析了正交正放钢筋混凝土空腹夹层板的频率影响因素,并拟合了基频的计算公式. 徐向东等^[6]通过研究人行荷载作用下的楼盖加速度,分析正交正放空腹夹层板楼盖的舒适度问题,并指出应根据实际情况采用较长的路线,使其通过低阶振型的中心. 本文通过研究蜂窝形钢空腹夹层板结构的自振频率和人行荷载下的峰值加速度,分析该结构的舒适度.

1 行走路线时程分析法

采用单足落步激励法模拟人行荷载对楼盖的激励,通过分析跨中节点的加速度时程曲线研究结构的竖向振动舒适度,行走路线如图 1 所示.根据文献[8]的研究结论可知:采用行走路线法对空腹夹层板进行时程分析时,应该使行走路线通过低阶振型的中心,仅计算单人最不利频率行走下楼板的响应.

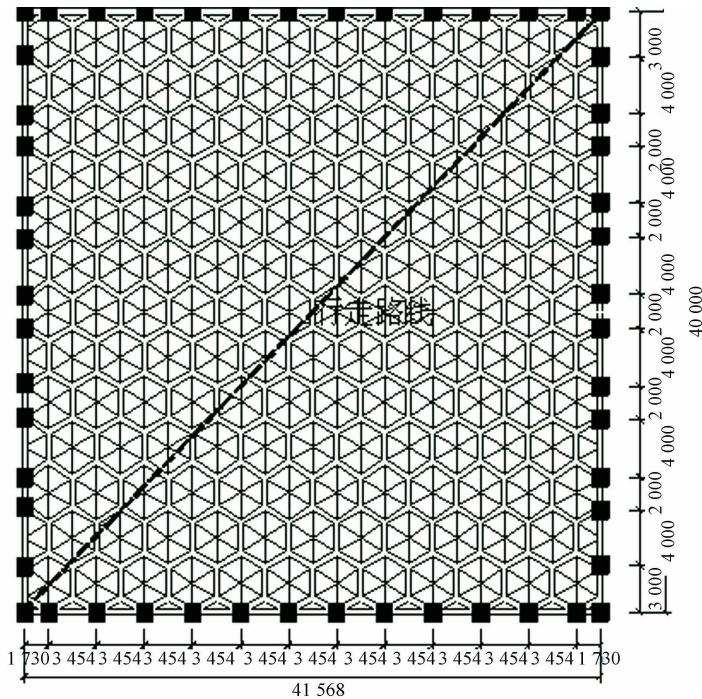


图 1 行走路线示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of walking route (unit:mm)

人行激励是一个复杂的随机行为,主要影响因素有行走的频率、体质量、行走步幅、行走持时和两足同时着地时间等,时程分析主要参数选取如下:

- 1) 单足落步激励的步频取人行步频的平均值, $f_s = 2 \text{ Hz}$;
- 2) 根据文献[9]的研究, 人的体质量为 $G = 71.43 \text{ kg}$;
- 3) 根据中国 18~55 岁人均身高及身高与步幅之间的关系^[10], 步幅 $L = 0.75 \text{ m}$;
- 4) 根据文献[8]的研究, 单足落步总持时, $t_s = 0.6 \text{ s}$;
- 5) 根据文献[11]的计算公式, 取两足同时着地的时间, $d_t = t_s - \frac{1}{f_s} = 0.1 \text{ s}$.

2 有限元模型

以某拟建购物中心的蜂窝形钢空腹夹层板楼盖为研究对象,平面布局如图 2 所示. 图 2 中:平面尺寸为 40.000 m×41.569 m. 网格构造如图 3 所示,有限元模型如图 4 所示. 楼盖总高度为 1 800 mm(其中,上覆混凝土板厚 80 mm),跨高比为 22,蜂窝网格边长为 2 m,设计荷载为 13 kPa,各构件尺寸、材料和有限元模型单元类型,如表 1 所示.

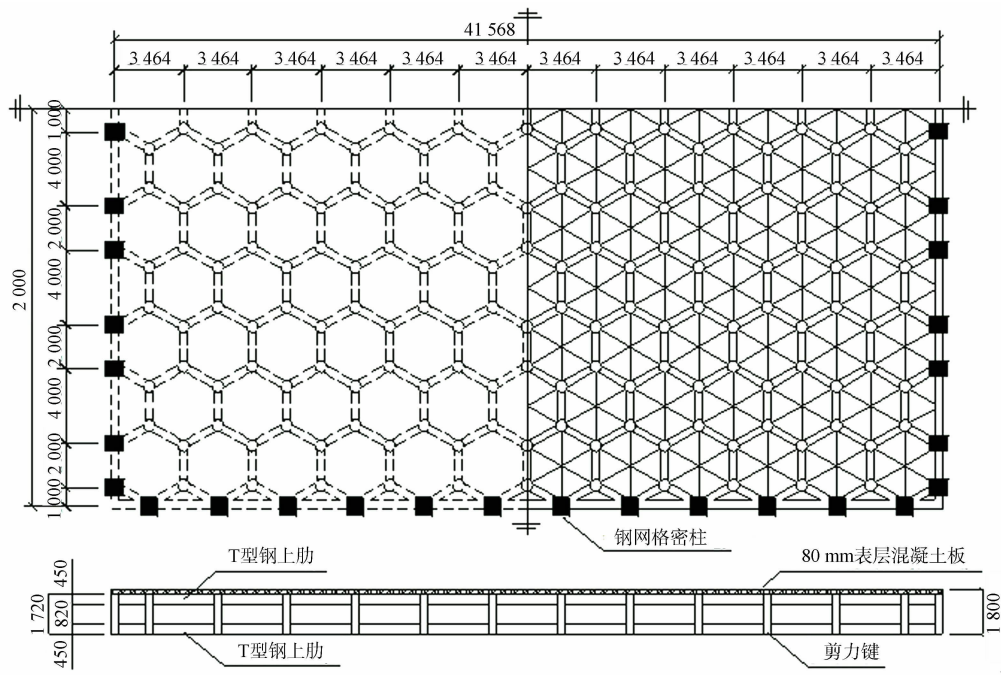


图 2 平面布置图(单位:mm)
Fig. 2 Plan layout (unit:mm)

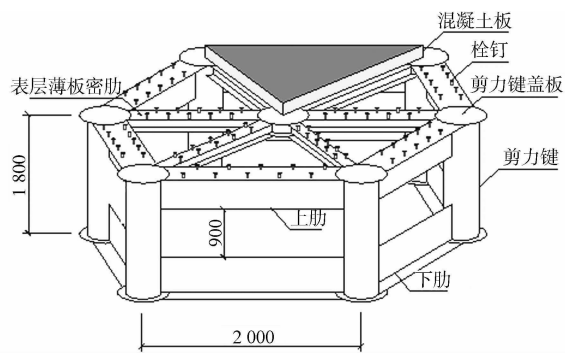


图 3 构造示意图(单位:mm)

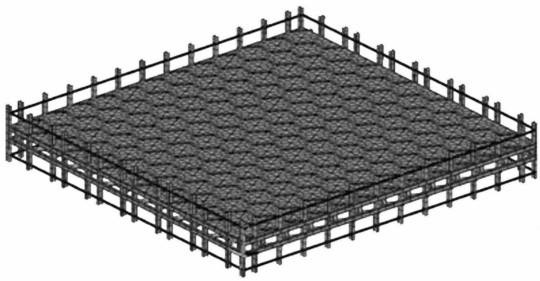


图 4 有限元模型

Fig. 3 Structural schematic diagram (unit:mm)

Fig. 4 Finite element model

表 1 有限元模型结构构件尺寸和参数

Tab. 1 Finite element model, structural member size and parameters

构件	截面尺寸/mm	强度等级	泊松比	密度/kg·m ⁻³	弹性模量/GPa	ANSYS 单元
上肋	T450×400×14×18	Q345	0.3	7 850	206	BEAM188
下肋	T450×400×14×18	Q345	0.3	7 850	206	BEAM188
剪力键	Φ450×30	Q345	0.3	7 850	206	BEAM188
上覆混凝土板密肋	H250×100×2×8	Q345	0.3	7 850	206	BEAM188
钢网格密柱	H425×400×14×20	Q345	0.3	7 850	206	BEAM188
层间梁	H180×140×12×14	Q345	0.3	7 850	206	BEAM188
表层混凝土板	80	C30	0.2	2 500	30	SHELL181

有限元模型周边端点处采用 H 型钢支撑,考虑 H 型钢密柱和层间梁对结构动力特性的影响,将夹

层板的上、下层密柱各取层高的一半高度, 即 2.25 m. H 型钢柱端约束 3 个方向的线位移. 由于人行荷载作用下楼盖的竖向振动较小, 因此, 材料均采用线弹性本构关系. 时程分析时, 考虑动荷载的影响, 将混凝土的弹性模量扩大 1.2 倍, 阻尼比取 0.02. 有限元模型中考虑节点刚域的影响, 将梁单元与梁单元连接节点指定为全刚性, 同时, 考虑分析精度与效率, 网格尺寸大小取为 1 m. 通过单榀空腹梁精细化模型验证了该简化模型具有较高的精度, 满足工程要求.

3 参数化分析

根据文献[2,6,8]的研究, 考虑空腹夹层板三维受力情况, 分析跨高比、上覆混凝土板厚度和上、下肋刚度对钢空腹夹层板振动舒适度的影响.

3.1 跨高比对结构舒适度的影响

为了研究跨高比对蜂窝形钢空腹夹层板振动舒适度的影响, 建立 11 个有限元模型(模型参数如表 1 所示). 建模时, 保证楼盖跨度不变, 通过控制楼盖高度改变跨高比. 楼盖基频(f)与跨高比(λ)的关系, 如图 5 所示. 峰值加速度(a)和跨高比(λ)的关系, 如图 6 所示. 加速度时程曲线, 如图 7 所示.

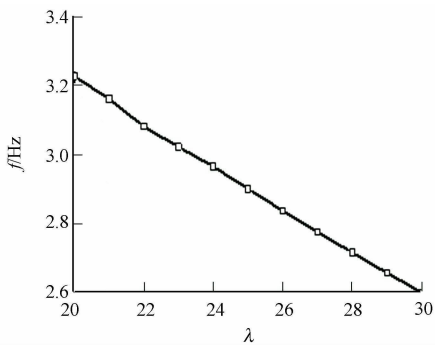


图 5 基频和跨高比的关系曲线
Fig. 5 Curves between fundamental frequency and span height ratio

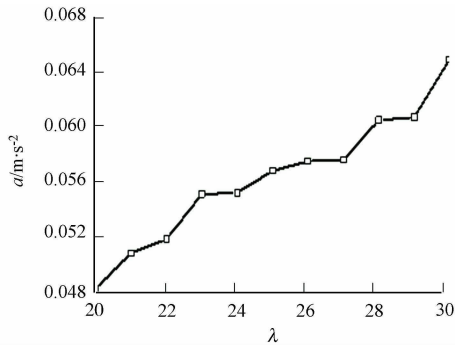
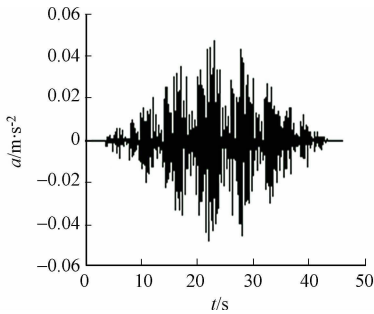
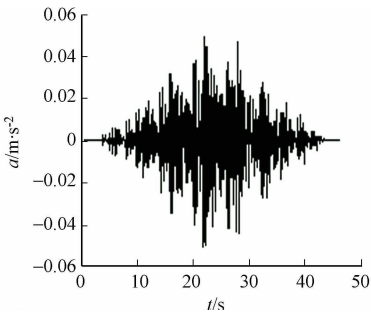


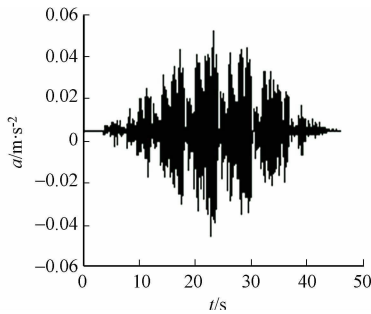
图 6 峰值加速度和跨高比的关系曲线
Fig. 6 Curves between peak acceleration and span height ratio



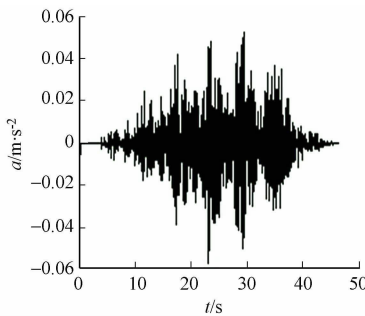
(a) $\lambda = 20$



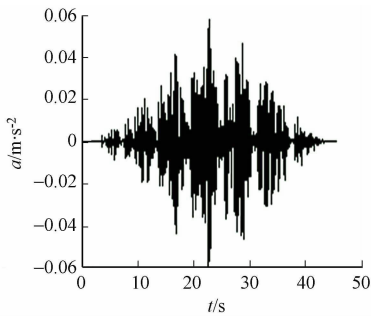
(b) $\lambda = 22$



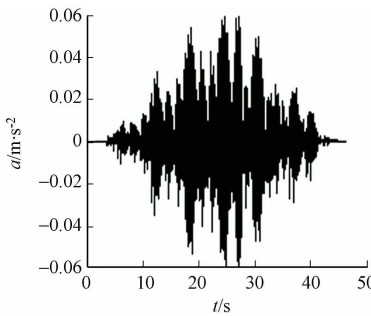
(c) $\lambda = 24$



(d) $\lambda = 26$



(e) $\lambda = 28$



(f) $\lambda = 30$

图 7 不同跨高比空腹夹层板加速度时程曲线

Fig. 7 Acceleration time history curves of different span depth ratio of open web sandwich plate

由图 5 可知:当空腹夹层板跨高比 λ 从 20 增加到 30 时,基频由 3.228 3 Hz 下降到 2.598 3 Hz,下降约为 19.5%,且二者近似呈反比例线性关系。

由图 6 可知:在人行荷载作用下,楼盖的峰值加速度随着跨高比的增大而增大,增幅为 34.78%,但不是简单的线性关系。基频和加速度的变化趋势说明空腹夹层板的竖向刚度随着跨高比的增加而减小。

由图 7 可知:楼盖的加速度响应峰值均出现在第 23 s 左右的位置,即行走至跨中位置时,楼盖的加速度响应最大;加速度时程曲线所围成的面积随着跨高比的增大而增大,说明加速度响应整体水平在增大,这主要是因为楼板刚度随着跨高比的增大而减小;时程曲线的增加和衰减较为平缓,这表明空腹夹层板刚度和质量分布均匀合理。

3.2 上覆混凝土板厚度对结构舒适度的影响

为了研究上覆混凝土板厚度 h 对蜂窝形钢空腹夹层板振动舒适度的影响,建立 9 个有限元模型,混凝土板厚度为 80~160 mm,以 10 mm 的梯度递增。基频的变化曲线,如图 8 所示。峰值加速度的变化曲线,如图 9 所示。加速度时程曲线,如图 10 所示。

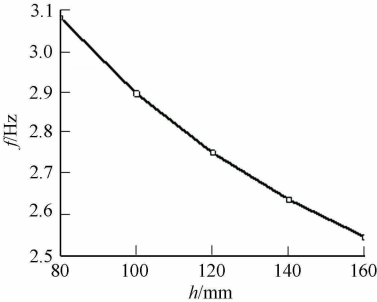


图 8 基频和上覆混凝土板厚度的关系曲线
Fig. 8 Curves between fundamental frequency and thickness of overlying concrete slab

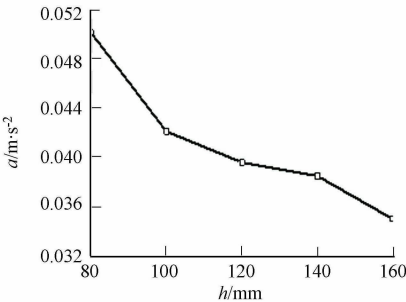


图 9 峰值加速度和上覆混凝土板厚度的关系曲线
Fig. 9 Curves between peak acceleration and thickness of overlying concrete slab

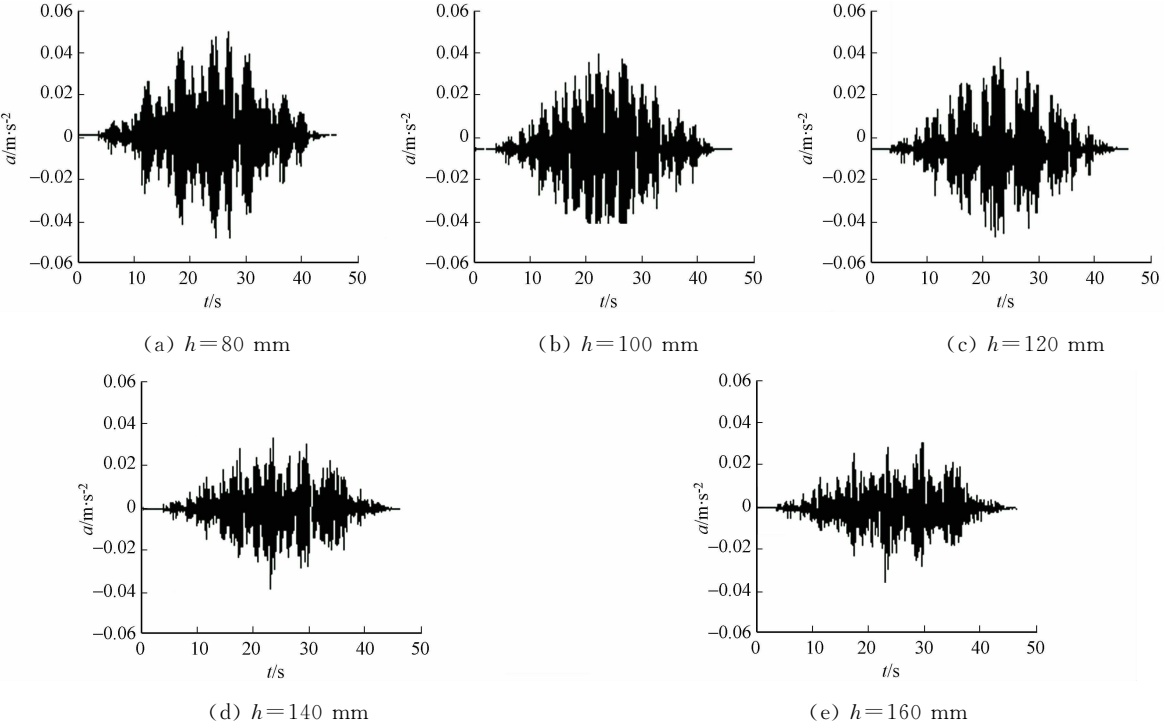


图 10 不同上覆混凝土板厚度的加速度时程曲线
Fig. 10 Acceleration time history curve of thickness of overlying concrete slab

由图 8 可知:空腹夹层板的基频随着混凝土板厚度的增加,由 3.081 4 Hz 下降到 2.545 8 Hz,下降幅度为 17.38%。这主要是由于空腹夹层板的质量随着混凝土板厚度的增加而增加,虽然此时楼板竖向刚度也有所增加,但是相比刚度的贡献,质量的影响更大。

由图 9,10 可知:峰值加速度随着上覆混凝土板厚度的增大而不断下降,由 $0.0502\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 下降到 $0.0350\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,降幅 30.28% ,但二者并不是简单的线性关系.这主要是因为混凝土板厚的增大将导致结构的质量增大,使结构的惯性增大,抵抗振动的能力增强.另一方面,楼板加速度时程曲线峰值随着混凝土板厚度的增加而下降,并且在行走持时内,加速度峰值更加均匀.

3.3 上、下肋刚度对结构舒适度的影响

蜂窝形钢空腹夹层板是由上、下肋和剪力键共同组成的受力体系,因此,很有必要研究上、下肋刚度对空腹夹层板振动舒适度的影响.建立 12 个有限元模型,通过改变上、下肋截面尺寸来研究上、下肋刚度对结构振动舒适度的影响.建模时控制腹板和翼缘的厚度不变,腹板高度 (l) 和翼缘宽度 (b) 各自从 $350\sim 475\text{ mm}$,以 25 mm 为梯度递增.改变翼缘宽度时,腹板高度为 400 mm ;改变腹板高度时,翼缘宽度为 450 mm .分别研究腹板高度和翼缘宽度对结构振动舒适度的影响,分析结果如图 11~14 所示.

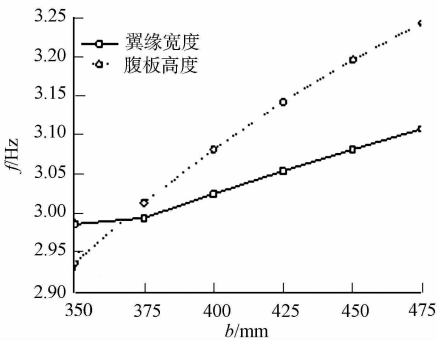


图 11 基频和上、下肋刚度的关系曲线

Fig. 11 Curves between fundamental frequency, upper and lower rib stiffness

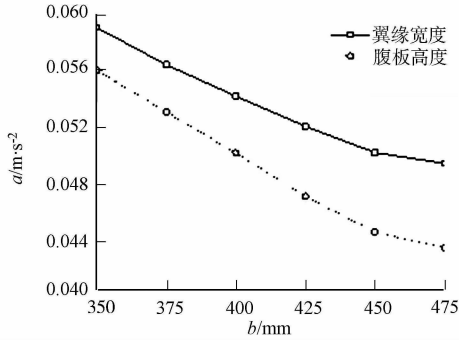
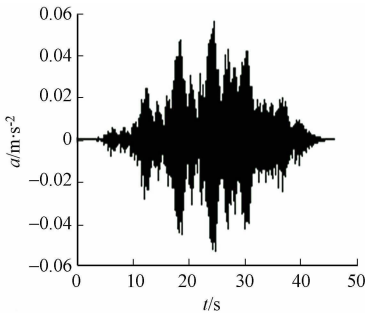
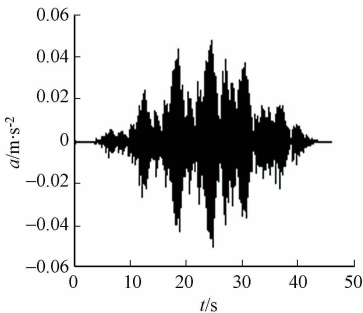


图 12 峰值加速度和上、下肋刚度的关系曲线

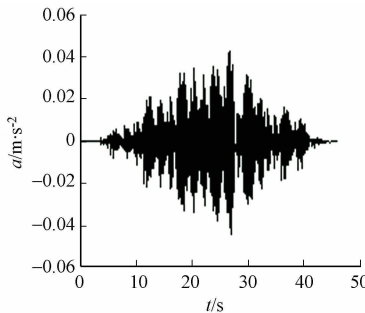
Fig. 12 Curves between peak acceleration, upper and lower rib stiffness



(a) $b=350\text{ mm}$



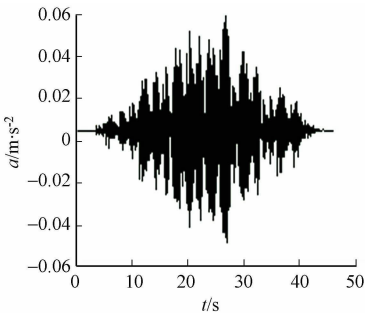
(b) $b=400\text{ mm}$



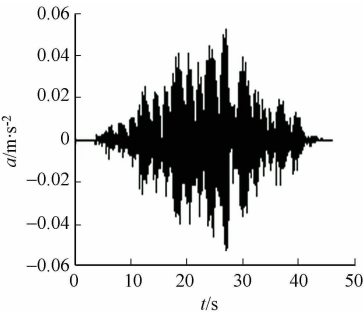
(c) $b=450\text{ mm}$

图 13 加速度和腹板高度的关系曲线

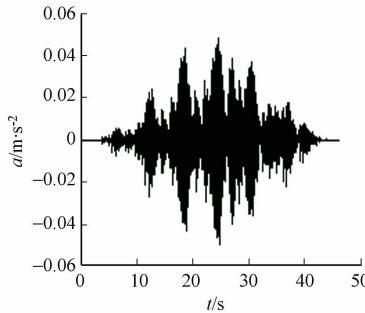
Fig. 13 Curve between acceleration and web height



(a) $l=350\text{ mm}$



(b) $l=400\text{ mm}$



(c) $l=450\text{ mm}$

图 14 加速度和翼缘宽度的关系曲线

Fig. 14 Curves between acceleration and flange width

由图 11,12 可知:翼缘宽度由 350 mm 增大到 475 mm 时,基频由 2.9936 增大到 3.1078 ,增幅为 3.8% ,峰值加速度由 $0.051\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 减小到 $0.048\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,减幅为 5.88% ;腹板高度由 350 mm 增大到

475 mm 时,基频由 2.935 7 增大到 3.243 7,增幅为 10.49%,峰值加速度由 $0.056\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 减小到 $0.042\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,减幅为 25%.这表明结构基频随着翼缘宽度和腹板高度的增大而增大,相比翼缘宽度,腹板高度对结构基频的影响更显著.

由图 13,14 可知:加速度时程曲线峰值平均值随着腹板高度和翼缘宽度的增大而减小,时程曲线的上升和衰减变化并不明显.因此,空腹夹层板的竖向刚度不会因为上、下肋刚度的变化而发生突变,结构竖向刚度分布均匀合理.

4 结 论

1) 人行荷载作用下,空腹夹层板的峰值加速度随着上覆混凝土板厚度的增大而减小;随着跨高比的增大而增大;随着上、下肋刚度的增大而减小,腹板高度比翼缘宽度对结构加速度的影响更明显.

2) 在人行荷载的作用下,峰值加速度在 $0.035\sim0.065\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 之间,满足 JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》^[12] 对商场楼盖舒适度的要求.

3) 蜂窝形钢空腹夹层板的基频在 2.55~3.24 Hz 之间,位于 CECS 273—2010《组合楼板设计与施工规范》^[13] 限值的 3 Hz 附近,工程应用时应对结构的基频进行验算.

参考文献:

[1] 孙崇芳,梁书亭,朱筱俊.新型预制装配式楼盖人行荷载下舒适度试验研究[J].建筑结构,2014,44(13):19-23.
[2] 姜岚,张华刚.大跨度空腹夹层板楼盖基于舒适度要求的动力特性分析[J].空间结构,2014,20(3):56-60.
[3] MEHDI S. Vibration serviceability of a building floor structure [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,2010,24(6):508-518.
[4] ELLINGWOOD B, TALLIN A. Structural serviceability: Floor vibrations [J]. Journal of Structural Engineering, 1984,110(10):2424-2437.
[5] 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,2005:93-97.
[6] 徐向东,马克俭,张华刚,等.大跨度装配整体式钢网格式结构楼盖舒适度分析[J].空间结构,2014,20(1):4-8.
[7] 贾子文,周绪红.冷弯薄壁型钢-混凝土组合楼盖基频研究[J].工程力学,2010,27(11):144-153.
[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] EBRAHIMPOUR A, SACK R L. Design live loads for coherent crowd harmonic movements[J]. Journal of Structural Engineering,1992,110(2):401-418.
[10] 谢庆森,王秉权.安全人机工程[M].天津:天津大学出版社,1999:122-123.
[11] 张高明.火车站站房结构在人行和列车激励作用下的振动舒适度问题研究[D].北京:中国建筑科学研究院,2008:25-27.
[12] 中国建筑科学研究院.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,2010:17-20.
[13] 中冶建筑研究总院有限公司.组合楼板设计与施工规范: CECS 273—2010[S].北京:人民出版社,2010:15-16.

(责任编辑:黄仲一 英文审校:方德平)