

大跨预应力混凝土楼盖的双向加速度分布规律及舒适度分析研究

熊仲明¹, 虞子良¹, 魏明兴²

(1.西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2.河北建筑设计研究院有限责任公司, 河北 石家庄 050011)

摘要: 大跨预应力混凝土楼盖刚度低、阻尼小、最小频率接近人走动和跳跃的频率, 在人行激励下, 很容易不可避免地发生共振, 使人产生不舒适感. 本文在总结分析楼盖竖向峰值加速度、各控制点的加速度时程曲线在楼面内双向分布的基础上, 建立了大跨预应力混凝土楼盖整体结构的有限元分析模型, 对选定的楼盖方案在三种人行激励工况下的动力响应进行了分析. 同时, 通过楼盖内加速度分布曲线, 对该方案楼盖的舒适度进行了评估. 计算结果表明, 加速度基本上是关于楼盖的形心轴对称变化, 呈抛物线分布; 楼盖的初始状态对楼盖振动的峰值加速度有很大影响, 可能导致振动初始阶段楼盖峰值加速度加大, 为大跨预应力混凝土楼盖结构舒适度的深入研究及减振隔振设计提供了参考.

关键词: 预应力; 楼盖; 加速度分布; 振动舒适度

中图分类号: TU393

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)06-0785-06

近年来, 随着人们对大跨度和大空间要求的不断提高, 预应力混凝土结构在各种工业、民用建筑中取得了广泛的应用. 一般来说, 楼盖的跨度越大, 必然导致建筑楼板轻柔, 竖向自振频率降低. 因此, 大跨度结构在人的正常活动下, 楼板体系的易振动性, 导致一些居住者的不舒适感, 极大影响了建筑的使用功能. 《混凝土结构设计规范》GB50010—2010 对此规定: 大跨度公共建筑混凝土楼盖结构的竖向自振频率不宜低于 3 Hz. 因此, 在大型公共建筑的大跨楼盖设计过程中, 为了楼盖的正常使用, 有必要对楼盖的振动舒适度作出合理的分析及评估.

目前, 国内外很多学者就大跨度楼盖的舒适度进行了研究, 主要从其荷载模型、舒适度标准以及与之相适应的分析方法等方面开展工作, 并得到了不少的成果. 文献[1]运用有限元分析方法对某火车站人群荷载进行了结构的动力响应研究, 并提出了通过布置 MTMD 系统已达到减振并提高舒适度的目的. 文献[2]对长沙南站大跨度候车厅楼盖进行了减振分析与设计, 并提出了舒适度的评价标准和分析方法. 文献[3]对某训练馆大跨度楼盖采用 MIDAS/Gen 进行有限元分析并进行现场振动测试, 得到了以频率作为振动舒适度设计的控制参数切实可行结论.

但上述研究其舒适度标准以及分析方法均不统一, 使得大跨度楼盖的舒适度研究还没有形成统一的规定, 目前只能采取限制频率或振幅的方法以避免这类问题的产生. 另外, 由于大跨度楼盖的加速度分布规律的研究是分析楼盖竖向振动、评估楼盖舒适度及采取相应减振设计措施的基础, 而目前该类研究还未见文献报道. 因此, 本文在以前研究的基础上, 采用已有实验所量测的人行荷载模型, 通过有限元方法对一科技活动中心的大跨度混凝土楼盖进行分析, 以此研究楼盖结构在各种人致荷载模型作用下加速度的分布规律及影响因素, 对其采取减振隔振措施和结构设计有一定的指导作用.

1 楼盖舒适度控制标准

目前, 大跨楼盖结构竖向振动舒适度的控制方法大致可分为两种类型: 一种是规定楼盖的基频应高于某限值, 即 $f_{\min} \geq [f_{\lim}]$, 也称为频率调整法; 另一种是限制楼盖在正常人行激励下的动力反应, 如 $\alpha_{\max} \leq [\alpha]$, 也称为限制动力响应值法. 第一种方法简单、方便, 在设计阶段就可对楼盖结构进行控制, 曾被广泛使用, 但没有直接包含人行荷载这一重要因素. 第二种方法包含了振源激励、结构动力特性和人的感受三个要素, 但计算比较复杂.

收稿日期: 2013-11-08

修改稿日期: 2014-12-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51278395); 陕西省教育厅专项基金 (12JK0895)

作者简介: 熊仲明 (1966-), 男, 教授, 博导, 主要从事隔震减震控制、共同作用、大跨结构理论及试验研究等. E-mail: 631678230@qq.com

随着标准的发展,评价标准越来越趋向于用峰值加速度来评价结构的舒适度,参照ATC1999和AISC-11中的规定,用楼盖竖向峰值加速度来衡量结构的竖向振动舒适度,各种环境下楼盖的峰值加速度见表1.本文取1.5%g为峰值加速度.

表1 结构竖向振动舒适度标准

Tab.1 The standard of structure of vertical vibration comfort			
人员活动环境	人的活动	结构阻尼比	峰值加速度限值/g
住宅、办公、教室	行走、跳跃等有节奏运动	0.02~0.12	0.5%
商场、舞厅、车站	行走、跳跃等有节奏运动	0.01~0.05	1.5%
室外人行天桥	行走、跳跃等有节奏运动	0.005~0.01	5%

2 人行激励的荷载模型

在一般的结构设计中,动力荷载是通过一个动力增大系数将动力荷载简化为静力荷载来考虑的.由于人行荷载不是静态的,这种荷载可能由单人行走,也可能由很多人共同活动引起的,荷载作用点不断改变,作用位置与步频、体重等因素有关,所以不能简单的用静载来代替.为了评价楼板振动的舒适性就必须对人行激励的荷载模型进行研究.

对人的活动激励的研究是从人的单足落步荷载时程曲线开始的,研究中关注的主要是行走过程中的竖向分力,图1为典型的单足落步时程曲线,纵坐标 F 为单足竖向作用力/体重.人的步行曲线与人的体重、落脚轻重和步频有关.实验研究表明,一般人自然走动频率在1.5~2.5 Hz之间变化.

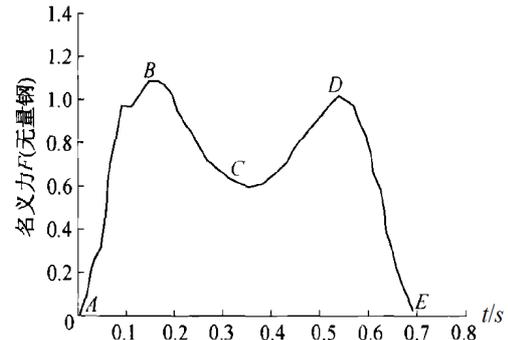


图1 典型的单足落步时程曲线
Fig.1 Typical time history curve of single step foot fall

2.1 人行荷载时程模拟

本文人行激励时程曲线采用IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering) 的人行荷载曲线,公式如下^[4]:

$$F_p(t) = G \left[1 + \sum_{i=1}^3 \alpha_i \sin(2i\pi f_s t - \Phi_i) \right] \quad (1)$$

式中: $F_p(t)$ 为行人荷载时程; G 为人的体重,按70 kg/人考虑; f_s 为步行频率; Φ_i 为相位角; α_i 为荷载动力分项系数, $\alpha_1 = 0.4 + 0.25(f_s - 2)$, $\alpha_2 = \alpha_3 = 0.1$

2.2 起立荷载时程模拟

假定人起立时对楼盖的冲击激励曲线为一个正弦波,持续时间 $T = 1$ s, 将人简化为一个单质点体系,设人体质心竖向运动加速度的表达式为: $a(t) = a_1 \sin(2\pi/T)t$, $t \in [0, T]$; 则人体质心竖向运动的速度表达式为: $v(t) = -a_1(T/2\pi) \cos(2\pi/T)t + C_1$; 人体质心竖向运动的位移表达式为:

$$s(t) = -a_1(T/2\pi)^2 \sin(2\pi/T)t + C_1 t + C_2$$

由边界条件, $t=0$ 时, $v(0) = 0$, $s(0) = 0$; $t=T$ 时, $s(T) = h$ (起立前后人体质心升高的高度,假定为 $h=0.4$ m), 其中 $C_2 = 0$, $C_1 = h_1/T$, $C_1 = T a_1 / 2\pi$. 则人体质心的加速度幅值 $a_1 = (2\pi C_1 / T) = (2\pi h_1 / T^2) = 2.512$ m/s².

由动力平衡公式: $F(t) - G = ma(t)$, 则起立激励的时程曲线函数为:

$$F(t) = G(1 + 0.256 \sin 2\pi t) \quad t \in [0, T] \quad (2)$$

起立激励的时程曲线见图2.

2.3 跳跃荷载时程模拟

目前对人跳跃激励时程的研究较少,本文中采用有间隔的齿形波来模拟人跳跃时对楼盖的冲击时程,

如图 3 所示. 图中 a 称为跳跃动力系数; b 称为落地持时系数, P_0 为人静止时的重量, T 为周期. 低频跳跃 (小于 2 Hz), $a=3.0$, $b=0.45$; 中频、高频跳跃时 (大于 2.8 Hz), $a=4.0$, $b=0.45$.

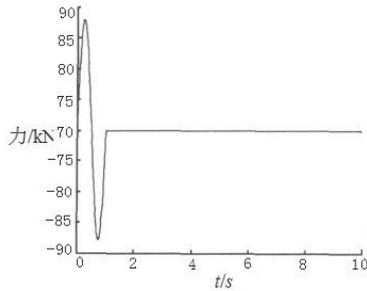


图 2 起立激励的简化时程曲线

Fig.2 Simplified time history curve of standing up-incentive

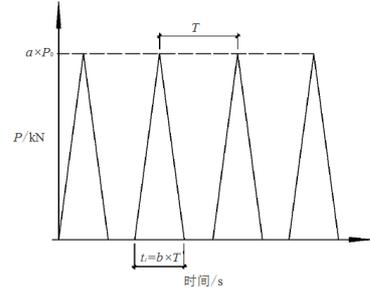


图 3 跳跃激励的简化时程曲线

Fig.3 Simplified time history curve of jumping-incentive

3 工程概况

为了分析统计大跨度楼盖的加速度分布规律, 本文选取一科技活动中心作为工程实例. 该科技活动中心中间分上下两层, 分别位于 1 和 4 层. 中间的大跨预应力混凝土楼盖采用纵横框架承重方案, 柱网尺寸为 (27 m+27 m) × 30 m. 为了能够给上部重量很大的钢屋盖提供稳定的支撑, 下部混凝土结构两端支撑在框架上并且由中间两根截面很大的混凝土柱子分成了两跨, 整个楼盖被分成两个梁格, 每个区格为主次梁主梁横向布置的结构方案. 楼盖的构件尺寸及预应力筋的布置见表 2.

表 2 楼盖构件尺寸及预应力筋布置

Tab.2 The size of Floor's component and the layout of prestressed tendon (mm)

	纵框架梁	横框架梁	主梁	次梁	板厚
构件截面尺寸	1 000×2 800	600×2 400	600×2 000	400×1 200	200
预应力筋布置	折线形	四段抛物线形	四段抛物线形	无	无

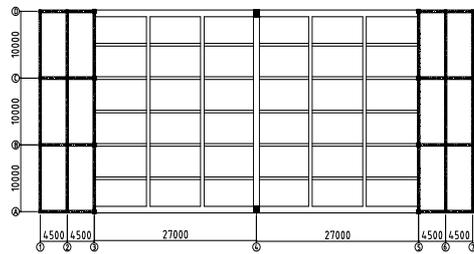


图 4 主次梁方案主梁横向布置平面图

Fig.4 Layout of transversal arrangement of main girder

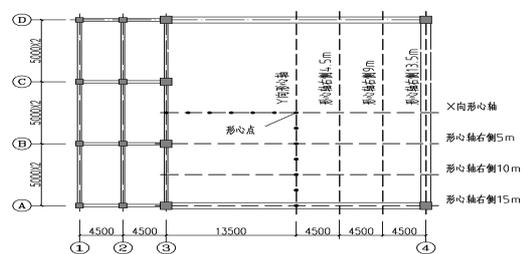


图 5 楼盖控制点的布置图

Fig.5 layout of floor control point

4 楼盖振动舒适度分析

采用 SAP2000 有限元分析软件建立大跨楼盖结构的整体模型, 用自定义的时程函数曲线来模拟各种人行激励时程曲线, 采用模态积分的方法对大跨楼盖结构在各种人行激励工况下的动力响应进行线性动力时程分析, 计算出大跨楼盖结构在竖向激励作用下的峰值加速度及峰值加速度在楼盖内的分布, 进而对楼盖的竖向振动舒适度进行评价.

4.1 计算参数的选取

在人的行走和跳跃等动力激励下, 结构的竖向振动响应计算分析与常规的静力和动力计算有一定的相似性, 但也有其自身的特点, 在一些参数的选取上与常规的静力和动力计算不同.

(1) 材料参数的确定: 材料的密度、重量及强度都仍然按照规范取值, 但在分析人行走或跳跃时, 可以考虑材料弹性模量的动力影响系数, 对混凝土弹性模量乘以 1.2 的动力影响系数. 在 AISC11 中, 动力影响系数取 1.35.

(2) 阻尼比的选取: 楼盖结构的阻尼比一般为 0.02~0.12, 比结构设计计算时所取的阻尼比稍大. 参照人行桥预应力混凝土结构的阻尼比, 本文出于保守考虑, 取阻尼比为 0.05.

(3) 质量源的选取: 质量源的选取与楼盖竖向振动的峰值加速度有很大的关系, 本文按《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010), 取质量源为恒载+0.5活载。

(4) 激振力大小的选取: 对于人行荷载, 取单人激振力为单人体重 0.7 kN; 对于跳跃荷载, 取单人激振力为单人体重的 4 倍, 即 2.8 kN。

(5) 作用点的选择: 根据建筑的使用功能, 判断激励可能出现的区域, 参照楼盖的竖向振型, 对竖向激励进行不利布置, 加在结构该振型的位移最大点。

(6) 峰值加速度限值的选取: 本大跨楼盖为多功能厅, 峰值加速度的选择, 取峰值加速度限值为 1.5%g。

4.2 人行激励工况

工况 1: 行人走动 (频率取 1.7 Hz), 保守的认为过道上所有人的体重和频率都相同, 但起步相位不同, 相位均匀分布在 [0, π] 之间, 等效均布荷载为 0.7 kN/m², 加载位置假定为楼盖中部宽 3 m 的板带。

工况 2: 集体起立, 假定大厅所有座椅上的人集体起立, 起立冲击荷载按上文所述的时程公式考虑, 相应的等效均布荷载取 0.7 kN/m²。

工况 3: 部分行人按 2 Hz (接近楼盖的基频) 以相同的频率和相位跳跃, 单人跳跃动力荷载值取 2.8 kN。考虑到大跨楼盖的对称性, 各人行激励工况下, 楼盖控制截面和控制点的位置如图 5 所示。

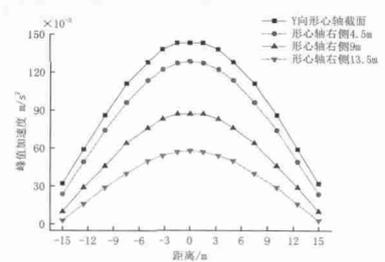
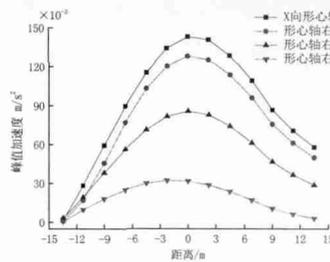
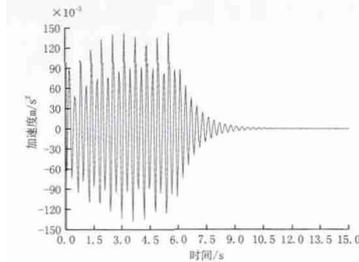


图 6 典型人行激励下楼盖形心点加速度时程曲线 图 7 峰值加速度沿 X 轴方向的分布 图 8 峰值加速度沿 Y 轴方向的分布
Fig.6 Centroid acceleration time history curve Fig.7 The distribution of the peak acceleration along the X axis Fig.8 The distribution of the peak acceleration along the Y axis

4.3 行走激励下楼盖的竖向振动

由图 6~8 可知, 当行人在过道上走动时, 峰值加速度在楼盖平面内大致呈抛物线型分布, 线型比较平滑, 表明楼盖结构整体性好。在沿 X 轴方向的分布图上, 楼盖左端支撑在刚度很大的框架结构 (附属建筑) 上, 竖向峰值加速度很小, 几乎为零; 右端支撑在刚度较小的纵框架梁上, 峰值加速度为最大峰值加速度的 1/3 左右。在沿 Y 轴方向的分布图上, 楼盖峰值加速度的分布关于 X 向形心轴对称, 两端的峰值加速度很小, 仅为最大峰值加速度的 1/20~1/4。楼盖竖向峰值加速度位于 0.058~0.143m/s² 之间, 小于规定的大跨楼盖峰值加速度限值 1.5%g, 满足规范关于楼盖舒适度的要求。

4.4 起立激励下楼盖的竖向振动

考虑到楼盖结构的对称性, 在楼盖形心轴上选取控制点, 每侧沿对称轴取 7 个控制点, 如图 5 所示。对起立激励下楼盖的竖向振动响应进行计算分析, 起立激励下楼盖各控制点的竖向峰值加速度见表 3, 峰值加速度最大点的加速度时程曲线见图 9。

表 3 各控制点竖向峰值加速度
Tab.3 Vertical peak acceleration of Each control point (m/s²)

控制点	1	2	3	4	5	6	7
Y 向	0.049	0.067	0.084	0.115	0.136	0.149	0.155
X 向	0.003	0.033	0.069	0.103	0.130	0.148	0.155

由表 3 可知, 楼盖控制点 1~5 的峰值加速度均小于峰值加速度限值 1.5%g, 满足规范关于竖向舒适度的要求; 楼盖形心区域控制点 6~7 的峰值加速度最大值为 0.155 m/s², 较峰值加速度限值大 5%。由图 9 可知, 最大峰值加速度出现在使用者刚开始起立的一瞬间, 这是由于在荷载时程模拟中, 人的静载是作为突加荷载施加在结构上的。因此, 需对峰值加速度进行适当的折减。考虑到峰值加速度

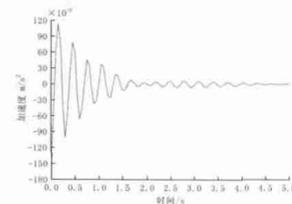


图 9 起立激励下楼盖竖向加速度时程曲线
Fig.9 Acceleration time history curve of standing up incentive

超限很小且需要折减, 此处认为楼盖在起立激励下的竖向振动满足舒适度限值的要求.

4.5 跳跃激励下楼盖的竖向振动

跳跃激励的布置分两种情况: 一种是均匀布置在过道上, 取等效均布荷载为 0.4 kN/m^2 ; 另一种是考虑 50 人在楼盖左侧 $9 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 区域内跳跃, 等效均布荷载 0.8 kN/m^2 . 首先考虑第一种情况, 如下所示:

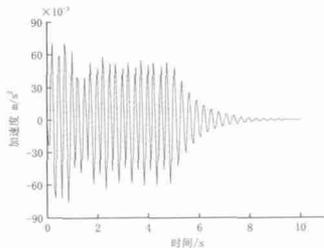


图 10 跳跃激励下楼盖形心加速度时程曲线
Fig.10 Acceleration time history curve of jumping-incentive

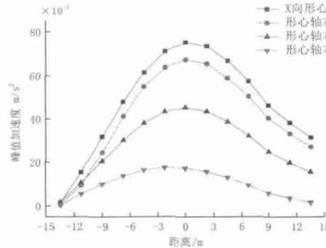


图 11 峰值加速度沿 X 轴方向的分布
Fig.11 The distribution of the peak acceleration along the X axis

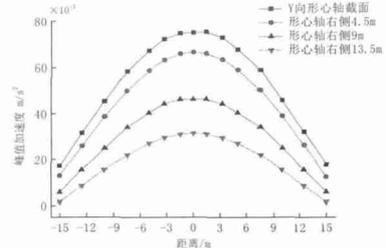


图 12 峰值加速度沿 Y 轴方向的分布
Fig.12 The distribution of the peak acceleration along the Y axis

由图 10 可知, 楼盖形心处的峰值加速度最大, 为 0.075 m/s^2 , 远小于楼盖的峰值加速度限值 $1.5\% g$, 满足规范关于舒适度的要求. 由图 11~12 看出, 峰值加速度在楼板内的分布规律同人行激励下加速度的分布曲线规律非常接近, 这主要是因为两种激励布置的区域相同 (过道), 荷载的分布和传播路径都非常接近. 第二种情况如下所示:

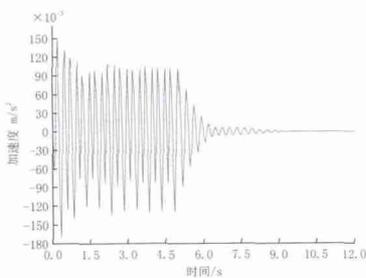


图 13 峰值加速度最大点处的加速度时程曲线
Fig.13 Acceleration time history curve of the points of The largest peak acceleration

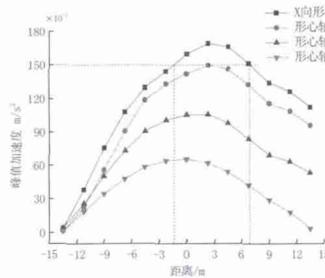


图 14 峰值加速度沿 X 向的分布
Fig.14 The distribution of the peak acceleration along the X axis

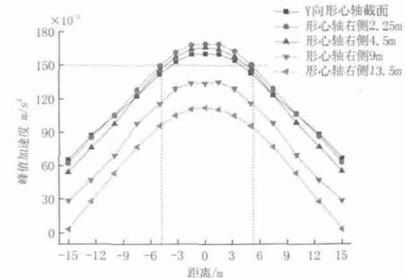


图 15 峰值加速度沿 Y 向的分布
Fig.15 The distribution of the peak acceleration along the Y axis

由图 13~15 可知, 在第二种情况下, 楼盖峰值加速度最大点出现在楼盖形心右侧区域, 最大峰值加速度达到了 0.169 m/s^2 , 超过了规范关于峰值加速度限值的要求. 在 X 向控制截面上, 随着截面向形心轴截面靠近, 各截面峰值加速度出现的位置由跨中向右侧缓慢移动, 最大峰值加速度出现在形心点右侧 2.25 m 处; 在 Y 向截面上, 形心轴右侧 2.25 m 和 4.5 m 处的截面峰值加速度均比形心轴截面的峰值加速度大, 与峰值加速度在 X 向的分布曲线相对应, 纵向框架的跨中截面的峰值加速度较横向框架跨中截面的峰值加速度要大, 同人行激励下纵横向框架峰值加速度的分布情况相同. 楼盖上峰值加速度超限的区域大概为一个 X 向 8.5 m、Y 向 10 m 的一个区域, 其它区域均满足规范关于楼盖舒适度的要求.

5. 结语

本文通过对大跨预应力混凝土楼盖在人行激励、集体起立、跳跃激励等三种工况下的竖向动力响应分析, 得到了各工况下楼盖的竖向峰值加速度、控制点的加速度时程曲线以及峰值加速度在楼面内沿 X 向和 Y 向的分布情况. 通过对上述计算结果的分析, 得到如下结论:

(1) 在拟定的三种人行激励工况下, 楼盖的竖向振动峰值加速度均小于限值 $1.5\% g$, 满足规范关于舒适度的要求. 各激励工况下, 楼盖内峰值加速度的分布变化均匀, 结构整体性好, 从侧面也说明选用主次梁方案主梁横向布置对框架传递受力是合理的.

(2) 工况二中集体起立荷载时程曲线, 人的静载是作为突加荷载施加在楼盖上, 且楼盖初始位移不为零, 导致峰值加速度出现在初始时刻. 在实际情况中可对峰值加速度计算值给与一定折减.

(3) 楼盖的初始状态对楼盖振动的峰值加速度有很大影响, 可能导致振动初始阶段楼盖峰值加速度

很大,较稳态时的峰值加速度大20%左右。因此,在进行楼盖舒适度评估时,应考虑楼盖的初始状态对楼盖竖向振动的影响,并采取合理的荷载时程曲线。因瞬态振动衰减很快,对振动要求较低的工程,可忽略楼盖瞬态振动对楼盖振动的影响,以楼盖稳态振动时的峰值加速度对楼盖舒适度进行评价。

(4) 两侧框架结构竖向刚度大,为楼盖提供了良好的约束,对控制楼盖的竖向振动起到了很好的作用。楼盖的竖向振动对两侧框架的影响很小。

参考文献 References

- [1] 操礼林, 李爱群. 人群荷载下大型火车站房大跨楼盖振动舒适度控制研究[J]. 土木工程学报, 2010(43):334-340.
CAO Lilin, LI Aiqun. Vibration serviceability control of a long-span floor in large station room under crowd-induced excitation [J]. China civil engineering journal, 2010,(43):334-340.
- [2] 周德良, 李爱群. 长沙南站大跨度候车厅楼盖竖向舒适度分析与检测[J]. 建筑结构, 2011, 41(7): 24-29.
Zhou Deliang, Li Aiqun. Analysis and test on the comfort of the large-span waiting hall floor in South Changsha Railway Station[J]. Building Structure, 2011, 41(7): 24-29.
- [3] 迟春, 宋涛炜, 冯远, 等. 青岛综合训练馆大跨度楼盖竖向振动舒适度研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(9):69-72
CHI Chun, SONG Taowei, FENG Yuan. Study on the vertical vibration comfort of large-span floor for Qingdao Training Center [J]. Building Structure, 2010, 40(9):69-72
- [4] KERR S C. Human induced loading on staircases[D]. London: University of London, 1998.
- [5] 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.
SHE Xiongxiang, CHEN Jun. A review of vibration service ability for long-span floors[J]. Structural Engineers, 2009, 25(6):144-149.
- [6] ELLTINGWOOD B, TALLIN A. Structural serviceability floor vibration [J]. Journal of Structural Engineering, 1984, 110(2):401-408.
- [7] MURRAY T M, Allen D E, Ungar E E. Floor vibrations due to human activity[S]. Steel design guide 11. American Institute of Steel Construction, 1997.
- [8] BACHMANN H, PRETLOVE A J, RAINER H. Vibrations Induced by People[S]. Vibration Problems in Structures-Practical Guidelines, 1995.
- [9] International Standard 2631-2: Evaluation of human exposure to whole-body vibration continuous and shock-induced vibration in buildings[S]. International Standards Organization, 1989.
- [10] 阳升, 钱基宏, 赵鹏飞. 武汉火车站大跨度楼面结构振动舒适度研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(1): 28-30.
YANG Sheng, QIAN Jihong, ZHAO Pengfei. Study on vibration comfort of long-span floor structure of Wuhan railway station under walk and jump excitation [J]. Building structure, 2009, 39(1): 28-30.
- [11] 王光远, 译. 结构动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
WANG Guangyuan. Dynamics of Structures [M]. Beijing: Science Press, 1979.

Analysis of the two-way acceleration distribution and comfort of large-span PRC floor

XIONG Zhongming¹, YU Ziliang¹, WEI Mingxing²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055 China;

2. Hebei institute of architectural design & research CO., LTD, Shijiazhuang 050011 China)

Abstract: Large-span PRC floor structure has low rigidity, little damp, and its least frequency is as closer as the frequency of moving and jumping of people on the floor. Induced by human walking, it would be happened to generate resonance easily and inevitably, people would also feel uncomfortable. In this paper, the finite element analysis model of large-span PRC floor structure was built on the basis of summarizing and analyzing the two-way distributions of the floors, vertical peak acceleration and acceleration-time history curve of all control points. The dynamic response of the selected floor-project under three working conditions of incentive were analyzed. At the same time, the comfort level of the floor was assessed through the distribution curve of the vertical peak acceleration in the floor. The calculation results show that the distribution of acceleration is symmetrical about the centroidal axis of floor which may change in uniform in the form of a parabola. The initial state of floor has very big effect on the peak acceleration of floor's vibration and would strengthen vertical peak acceleration in the initial time. This provides a reference for the deep research of the comfort level of the large-span PRC floor and the design of vibration isolation.

Key words: prestressed; floor; acceleration distribution; the vibration comfort.

(本文编辑 吴海西)