

文章编号:1673-2049(2014)04-0007-09

# 人行激励下压型钢板-混凝土组合楼盖舒适度分析

屈文俊<sup>1</sup>, 宋超<sup>1</sup>, 朱鹏<sup>1</sup>, 郭朋<sup>2</sup>

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 广州市设计院, 广东 广州 510620)

**摘要:**为研究人行激励下大跨度楼盖结构的舒适度问题,对目前比较流行的压型钢板-混凝土组合楼盖体系进行有限元建模,在此基础上进行瞬态振动的分析,将得到的结果与美国规范 AISC-11 的计算结果和标准进行对比。结果表明:AISC-11 计算方法对人行激励的简化并不合理,造成峰值加速度与实际误差较大,偏于不舒适;人行激励模型考虑了多阶简谐激励的作用和人行激励作用位置的变化以及人与楼盖相互作用的过程,更贴近实际。

**关键词:**压型钢板-混凝土组合楼盖;舒适度;人行激励;振动分析;峰值加速度

中图分类号:TU357.2

文献标志码:A

## Serviceability Analysis on Profiled Steel Sheeting-concrete Composite Floors Under Human-induced Dynamic Loads

QU Wen-jun<sup>1</sup>, SONG Chao<sup>1</sup>, ZHU Peng<sup>1</sup>, GUO Peng<sup>2</sup>

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Guangzhou Design Institute, Guangzhou 510620, Guangdong, China)

**Abstract:** To study the problem of serviceability for long-span floor structures, a transient vibration analysis on the profiled steel sheeting-concrete composite floor system was made using finite element modeling method, then the results were compared with the computational and standard values of American code AISC-11. The results show that the simplified method for human-induced excitation of AISC-11 is not reasonable, and the peak acceleration is very different from the real value, which is uncomfortable. Human-induced excitation model which considers multi-order harmonic excitation effect and pedestrian excitation position change, as well as the process of interaction between human and floor, is closer to the actual.

**Key words:** profiled steel sheeting-concrete composite floor; serviceability; human-induced excitation; vibration analysis; peak acceleration

## 0 引言

在大跨度楼盖结构体系中,一般选用压型钢板-混凝土组合楼盖,由于该楼盖体系较柔,容易引起人行走的不舒适,所以大跨度压型钢板-混凝土组合楼盖的设计大多并非由强度控制,而是由楼板的舒适

度控制。

舒适度评价标准主要有频率限值标准、加速度限值标准等,目前以美国 AISC-11 和加拿大 CSA 标准为代表的许多国外标准越来越趋向于用峰值加速度来衡量,中国由于这方面的研究较少,多是根据国外标准进行案例研究。从工程实用的角度来看,

收稿日期:2014-09-22

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51208373);教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120072120008);上海市科学技术委员会资助项目(12PJ1409000)

作者简介:屈文俊(1958-),男,河南辉县人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:quwenjun. tj@tongji. edu. cn。

用峰值加速度来评价楼板的舒适度较为简洁,但其实质问题仍是振动分析的问题。

本文结合工程实例,讨论人行激励下压型钢板-混凝土组合楼盖的振动分析方法,为楼盖的工程设计提供参考。

## 1 分析模型

人行激励下压型钢板-混凝土组合楼盖的振动分析属于连续体的强迫振动问题,计算分析中一般简化为有限自由度体系。利用有限元模型对连续体进行离散化,将楼盖结构划分为有限个单元,这些单元在节点处相互连接,建立位移场函数,通过插值和变分原理对各个单元进行力学分析;然后按照单元之间连接点上的力平衡条件或变形连续条件把单元拼凑成原来的结构,由此列出并求解以节点位移作为未知量的方程组<sup>[1]</sup>。

根据动力学方程进行结构动力分析

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}(t) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为质量矩阵; $\mathbf{C}$ 为阻尼矩阵; $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵; $\mathbf{u}$ 为位移向量; $\dot{\mathbf{u}}$ 为速度向量; $\ddot{\mathbf{u}}$ 为加速度向量; $\mathbf{F}(t)$ 为荷载向量; $t$ 为时间。

由上述可以看出,结构动力分析主要牵涉到惯性(质量)、弹性(刚度)、能量耗散机制(阻尼)和外部干扰荷载。根据这 4 个方面来建立振动分析的模型,质量矩阵以及刚度矩阵可以通过建模直接得到。能量耗散机制非常复杂,为了使动力方程更容易解耦,运算效率更高,此处采用瑞利阻尼实现,其计算公式如下

$$\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K} \quad (3)$$

式中: $\alpha$ 为质量阻尼系数; $\beta$ 为刚度阻尼系数。

人行激励作用作为外部干扰荷载,可以简化为确定性的周期荷载并将其展开成傅里叶级数。根据式(1)求得结构动力特性,即自振频率和特征振型,引入边界条件,利用有限元法求解式(2),可进一步得到加速度响应。

### 1.1 有限元建模

利用通用有限元软件 ANSYS<sup>[2]</sup>对一常见的大跨度楼盖体系建立有限元模型,该楼盖结构平面布置如图 1 所示。根据常用楼盖结构几何尺寸,选取次梁跨度  $L_j = 7$  m,主梁跨度  $L_g = 9$  m,该楼盖体系由型钢梁和 150 mm 厚的压型钢板-混凝土组合楼板所组成,其中柱用 Z 表示,主梁用 KL 表示,次梁用 L 表示。图 2 为组合楼板截面尺寸。

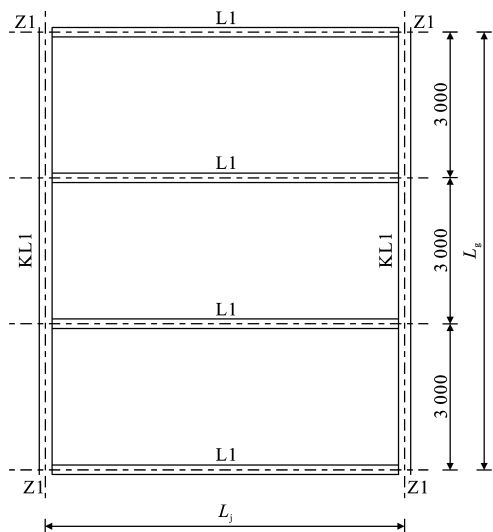


图 1 楼盖结构平面布置(单位:mm)

Fig. 1 Plane Layout of Floor Structure (Unit:mm)

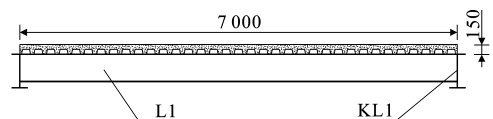


图 2 组合楼板截面尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Sectional Dimensions of Composite Floor (Unit:mm)

压型钢板所采用的型号为 YX-75-200-600,钢板的厚度为 0.8 mm。钢构件均采用焊接 H 型钢,柱采用 HW300×300×8×10,主梁采用 HW550×250×7×10,次梁采用 HW450×200×7×10,所有钢构件均为 Q345 钢。混凝土强度等级为 C25,在动力荷载作用下,混凝土弹性模量会提高约 35%,故取值为 37.8 GPa<sup>[3]</sup>。

根据以上几何尺寸及材料特性,在有限元软件 ANSYS 中建模,楼盖钢柱与钢梁均采用 Beam189 三维梁单元,考虑弯曲和扭转效应。压型钢板采用 Shell181 单元,混凝土采用 Solid65 单元,有限元网格划分为 120 mm。由于人行激励作用相对较小,结构还处于弹性阶段。建模时认为,压型钢板和混凝土之间是无滑移的。在 ANSYS 中,通过使压型钢板与混凝土板底面共节点来实现两者之间的固接。主次梁之间的连接是铰接,通过释放主次梁间的扭转自由度约束来实现。对于楼盖结构,其边界条件对受力性能及动力特性影响较大。此处,组合楼盖支承于混凝土边梁,边梁相当于楼盖的弹性支承,考虑到楼盖在人行激励下的微振动难以传递到与其相邻的楼层,因此可以仅将柱子上下各延伸 1 个楼层高度,然后在端部采用固接约束。楼盖结构

的 4 个角点处的平动自由度也要进行相应的约束,避免楼盖结构平面内的刚体位移。图 3 为楼盖结构整体有限元模型。

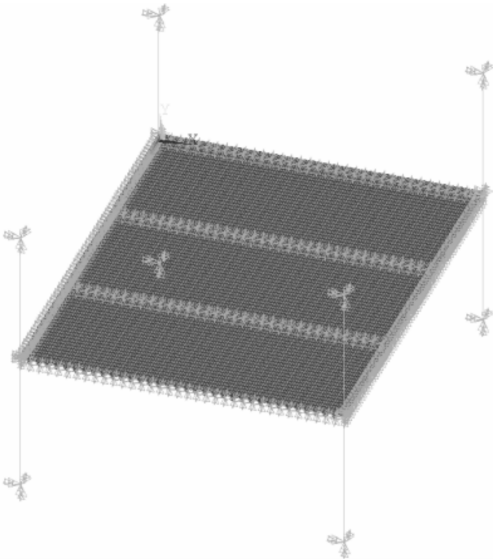


图 3 楼盖结构整体有限元模型

Fig. 3 Overall Finite Element Model of Floor Structure

结构阻尼比模拟实际情况取 0.03,采用瑞利阻尼实现。ANSYS 通过模态分析获得结构的 2 阶角频率,然后再结合振型阻尼比进行计算。

1.2 人行激励作用的模型

分析楼盖结构在人行激励(如行走、跑步、跳跃甚至有氧健身运动)作用下的响应,主要研究单人步行力的情况,按照确定性时域步行荷载模型来进行加载,即步态参数保持恒定,动力荷载近似按周期加载<sup>[4]</sup>,只考虑在竖直方向的振动而忽略对楼板平面内的影响。

一般情况下,人行激励作用可由频率不同的简谐激励合成,而且这些简谐激励的频率与步频成正整数倍关系(即按其傅里叶级数展开)。当分解的简谐激励的步频与楼盖体系的固有频率接近时,便会引发共振效应,使动力响应更加强烈。因此在进行振动分析时如何确定人行激励的振动频率十分关键,其一般的取值范围在 1.6~2.5 Hz 之间,但要准确推测则难以做到。因此按其最不利的情况来考虑,人为选取人行激励的频率,使楼板固有频率为其正整数倍,从而得到最大的动力响应,此处考虑 4 种不同的人行激励作用模型<sup>[5-6]</sup>。

(1)模型 1

假定人行走时的步行力  $F(t)$  是严格的周期函数。模型 1 的人行激励时程曲线如图 4 所示,其函数方程形式为

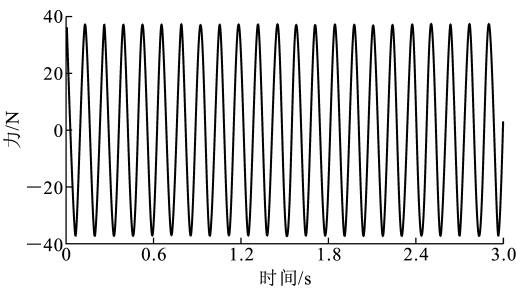


图 4 模型 1 的人行激励时程曲线

Fig. 4 Human-induced Excitation Time History Curve of Model 1

$$F(t)=P\alpha_i\cos(2\pi if_s t) \tag{4}$$

式中: $P$  为行人的重量,取 750 N; $i$  为简谐波数,取值见表 1; $\alpha_i$  为第  $i$  个简谐激励的动荷载因子,为试验观测数据的统计平均值; $f_s$  为人行激励频率。

表 1 激励频率  $f_s$  和动荷载因子  $\alpha_i$

Tab. 1 Excitation Frequency  $f_s$  and Dynamic Load Coefficient  $\alpha_i$

$i$	$f_s/\text{Hz}$	$\alpha_i$	$\phi_i$
1	1.6~2.2	0.50	0
2	3.2~4.4	0.20	$\pi/2$
3	4.8~6.6	0.10	$\pi/2$
4	6.4~8.8	0.05	$\pi/2$

注: $\phi_i$  为第  $i$  个简谐激励的初始相位角。

当运用模型 1 时,只考虑能够引起结构共振的简谐激励,把它加在楼盖结构最高阶模态的竖向位移幅值上,人行激励的频率与楼盖结构的固有频率相等。

(2)模型 2

在作用位置方面,模型 2 与模型 1 相同,但模型 2 考虑了与人的重量有关的静力荷载,认为人行激励是人的重量和由傅里叶级数表示的简谐激励的叠加。模型 2 的人行激励时程曲线如图 5 所示,其函数形式为

$$F(t)=P[1+\sum\alpha_i\cos(2\pi if_s t+\phi_i)] \tag{5}$$

傅里叶级数的阶次取值可以不同,最多的为 5 阶,最少的为 1 阶,一般认为考虑前 3 阶已经足够。在本例中,考虑傅里叶级数的前 4 阶,其他参数以及系数同模型 1。

(3)模型 3

楼盖上的人行激励同样由方程式(5)所确定,并取前 4 阶简谐振动叠加而成,但在模型 3 中考虑了动力荷载的作用位置随着行人位置的移动而变化。模型 3 中的步长和步速参数见表 2<sup>[7]</sup>。

具体人行激励作用的加载方式如图 6 所示。该

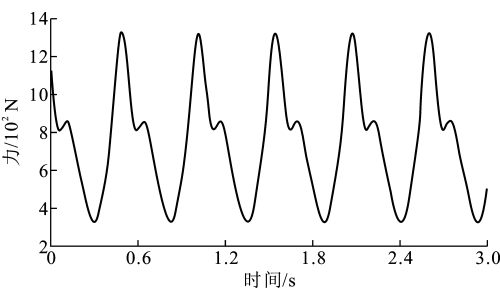


图 5 模型 2 的人行激励时程曲线

Fig. 5 Human-induced Excitation Time History Curve of Model 2

表 2 人行走特性

Tab. 2 Property of People Walking

运动类型	步速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	步长/m	步频/Hz
慢步行走	1.1	0.60	1.7
正常行走	1.5	0.75	2.0
快步行走	2.2	1.00	2.3

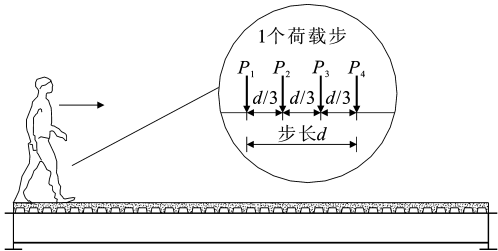


图 6 行人在楼板上走动示意

Fig. 6 Schematic Plot of People Walking on Floor

模型 3 把 1 个荷载步分解为 4 个等间距的动力荷载  $P_1 \sim P_4$ , 荷载由方程式 (5) 在不同时间  $t$  下计算得到, 依次轮流作用于楼盖结构上。

(4)模型 4

楼盖上活动的人可能会显著改变楼盖结构的振动特性, 将人群作为附加质量不尽合理, 因此更为真实的做法是把人的身体等效成 1 个质量-弹簧-阻尼系统, 使之与结构相互作用。

单个站着或坐着的人对结构动力特性(频率、阻尼)有显著影响<sup>[7]</sup>, 会降低结构频率, 增加结构的阻尼。许多研究表明: 人群动荷载与结构之间也有耦合作用, 动态人群也会改变结构的动力特性。

采用文献[8]中所提出的单自由度的质量-弹簧-阻尼系统模型, 具体如图 7 所示, 对于重量为 750 N 的行人来说, 通过考虑单自由度模型的动力特性对其质量、刚度、阻尼进行折算, 得到模型质量  $m=77.25 \text{ kg}$ , 弹簧刚度  $K=1.005 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ , 阻尼系数  $C=3\,870 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ 。在 ANSYS 软件中, 选用 Combin14 单元模拟人体动力性质, 选用

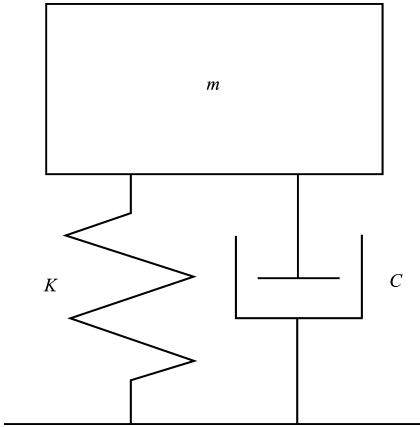


图 7 模型 4 的质量-弹簧-阻尼系统

Fig. 7 Mass-spring-damp System of Model 4

Mass21 单元模拟人体质量, 并考虑加载随位置的改变。沿路线方向每隔 1 个行人步长, 在离楼盖高 1.2 m 处(即人静止时的重心高度)建立节点, 定义质量单元, 考虑行人的质量。连接质量单元节点和相应楼盖节点建立弹簧单元, 通过定义弹簧单元的实常数考虑行人的竖向刚度和阻尼, 加载时利用生死单元法。

2 实例分析

根据工程实例对次梁跨度为 7 m、间距为 3 m 的大跨度压型钢板-混凝土组合楼盖体系进行有限元模型的振动分析, 并将分析结果与按照美国钢结构协会提出的 AISC-11 标准计算的结果与限值进行比较。

2.1 基于有限元模型的楼盖体系振动分析

2.1.1 模态分析

ANSYS 模态分析为一阶线性分析<sup>[9-17]</sup>, 在已知系统的频率范围下, 采用分块兰索斯法得到楼盖体系的前 4 阶频率  $f_1 \sim f_4$  及模态, 其竖直方向的振型如图 8~11 所示。

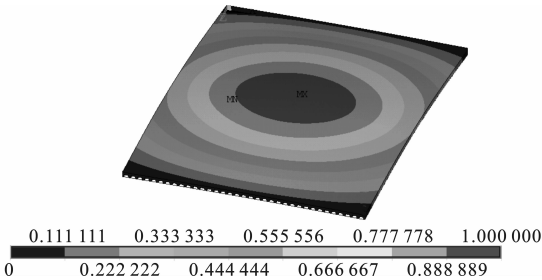


图 8 第 1 阶振型模态 ( $f_1=7.588 \text{ Hz}$ )

Fig. 8 The 1st Order Vibration Mode ( $f_1=7.588 \text{ Hz}$ )

通过 ANSYS 分析得到的楼盖结构固有频率与文献[4]相吻合。

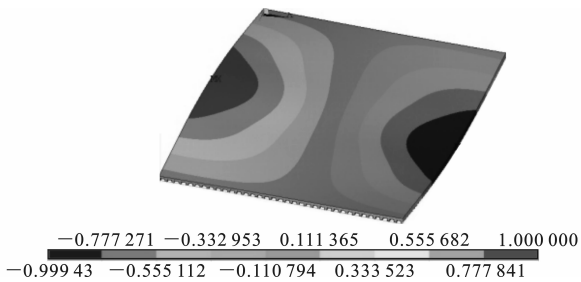


图 9 第 2 阶振型模式 ( $f_2=13.847$  Hz)  
Fig. 9 The 2nd Order Vibration Mode ( $f_2=13.847$  Hz)

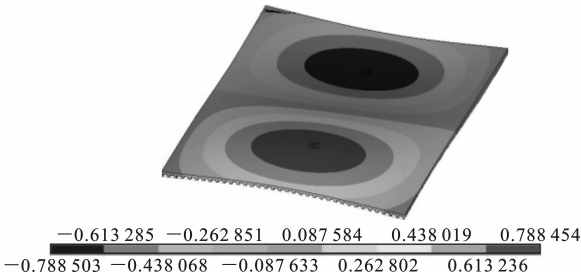


图 10 第 3 阶振型模式 ( $f_3=13.899$  Hz)  
Fig. 10 The 3rd Order Vibration Mode ( $f_3=13.899$  Hz)

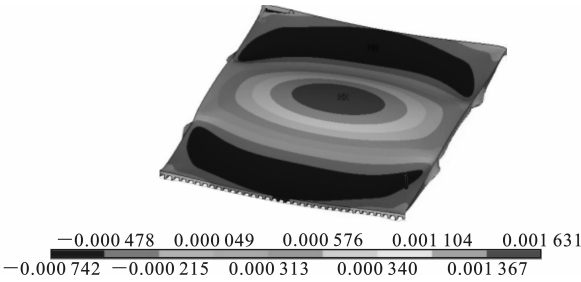


图 11 第 4 阶振型模式 ( $f_4=15.668$  Hz)  
Fig. 11 The 4th Order Vibration Mode ( $f_4=15.668$  Hz)

2.1.2 加速度响应分析

考虑动力分析的准确性以及效率,采用完全法谐响应分析计算瞬态响应。

(1)模型 1

将由方程式(4)所确定的人行激励施加到第 1 阶模态的位移幅值处,加载点见图 12。按有限元模型模态分析得到楼盖结构的固有频率为 7.588 Hz,频率为 1.897 Hz 的人行激励的第 4 个简谐函数才能引起共振效应,因此作为激励被应用。引起共振的人行激励作用周期  $T_p=1/f_s=0.527$  s,加载总时长取 5 个周期长度为 2.636 s,并且考虑 0.5 的折减系数(对于人行走而言,完整的稳态共振响应是很难达到的,并且行走的人与受干扰的人不会同时出现在第 1 阶振动模态的最大位移处),得到的加速度时程曲线见图 13,峰值加速度为  $0.0129\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,小于 AISC-11 的限值规定(住宅、办公楼峰值加速度

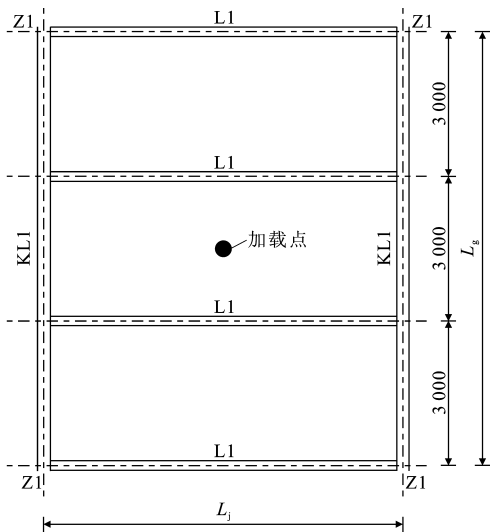


图 12 模型 1 加载点 (单位:mm)  
Fig. 12 Loading Point of Model 1 (Unit:mm)

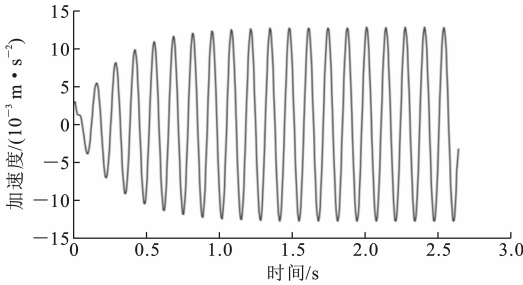


图 13 模型 1 加速度时程曲线  
Fig. 13 Acceleration Time History Curve of Model 1

限值为  $0.049\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ),并且加速度最大值出现在 2.008 4 s,后面的周期峰值加速度稳定在  $0.0129\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  附近。位移幅值为 6.120 mm。

(2)模型 2

将由方程式(5)所确定的人行激励加载到第 1 阶模态的位移幅值处,加载点同样如图 12 所示。引起共振的人行激励作用周期  $T_p=1/f_s=0.527$  s,加载总时长取 8 个周期长度为 4.216 s,同样考虑 0.5 的折减系数,得到的加速度时程曲线如图 14 所示。峰值加速度为  $0.0389\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,小于 AISC-11 的限值  $0.049\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。峰值加速度出现在 0.063 3 s,后面的周期峰值加速度大概稳定在  $0.0204\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  附近。位移幅值为 6.164 mm。

(3)模型 3

模型 3 考虑了人行激励的时间和空间效应,此处采用 2 种不同的加载路线进行比较,如图 15 所示。根据表 2,由线性内插法可以得到对应于步频为 1.897 Hz 的第 4 个简谐波的步长  $d=0.699\text{ m}$ 。 $P_1, P_2, P_3, P_4$  加载间距的理论值  $d/3=0.233\text{ m}$ ,

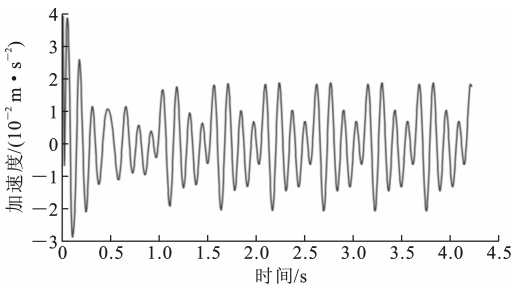


图 14 模型 2 加速度时程曲线

Fig. 14 Acceleration Time History Curve of Model 2

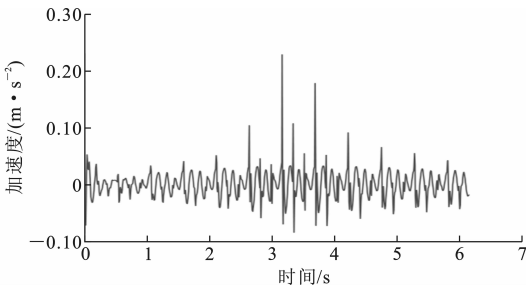


图 16 模型 3 加速度时程曲线(路线 1)

Fig. 16 Acceleration Time History Curve of Model 3 (Route 1)

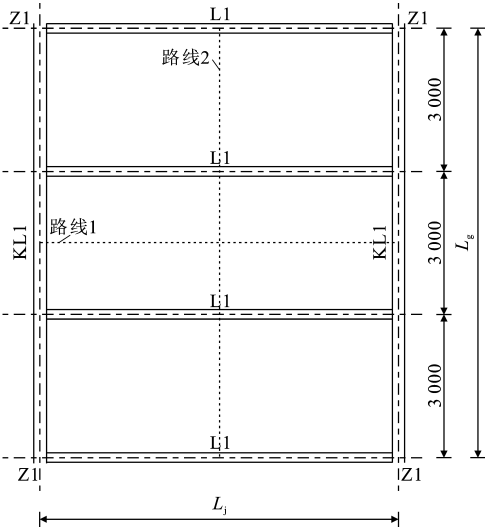


图 15 模型 3 加载路线(单位:mm)

Fig. 15 Loading Route of Model 3 (Unit:mm)

实际加载时近似取加载间距为 0.24 m。人行激励作用的周期  $T=1/f_s=0.527$  s,每个力在楼盖结构上的作用时间  $T/3=0.176$  s。本模型考虑了加载的空间变化,因此计算时没有考虑动力荷载的折减系数。

沿路线 1 加载,第 1 阶模态位移幅值点(中点)处的加速度时程曲线见图 16,峰值加速度为  $0.229\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,大于 AISC-11 的限值  $0.049\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。峰值加速度出现的时间为 3.163 s,此时动力荷载大约加载到楼盖跨中的位置,与理论推测值比较吻合。从加速度时程曲线随时间变化规律可以看出,人行走位置越接近跨中,测试点的加速度值越大,在跨中位置附近加速度值达到最大。随着人远离测点,测点加速度值减小,并且人行行走至跨中位置以后的节点时,测点峰值加速度都比位于前面对称位置处节点上的数值要大,这是由于前面存在已有振动影响的结果,位移幅值为 6.211 mm。荷载沿路线 2 作用的情况下,该线路的加速度时程曲线如图 17 所示。峰值加速度为  $0.223\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,大于 AISC-11 的

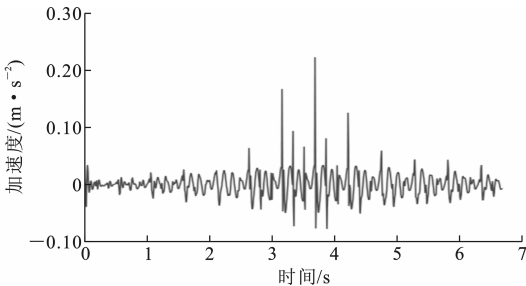


图 17 模型 3 加速度时程曲线(路线 2)

Fig. 17 Acceleration Time history Curve of Model 3 (Route 2)

限值规定。峰值加速度出现的时间点为 3.69 s,位移幅值为 6.208 mm,其他特性同路线 1。

(4)模型 4

同样考虑 2 条不同的加载路线,如图 15 所示。在路线 1 的情况下,第 1 阶模态位移幅值点处的加速度时程曲线如图 18 所示。峰值加速度为  $0.136\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,大于 AISC-11 的限值  $0.049\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。测点峰值加速度发生的时间为 3.163 s,位移幅值为 6.196 mm。在路线 2 情况下,上述节点的加速度时程曲线如图 19 所示,峰值加速度为  $0.123\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,大于 AISC-11 的限值规定。峰值加速度发生的时间为 3.69 s,位移幅值为 6.195 mm。

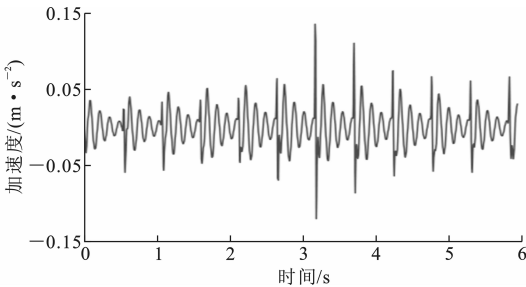


图 18 模型 4 加速度时程曲线(路线 1)

Fig. 18 Acceleration Time History Curve of Model 4 (Route 1)

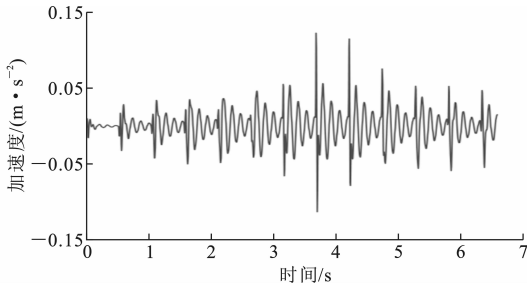


图19 模型4加速度时程曲线(路线2)

Fig. 19 Acceleration Time History  
Curve of Model 4 (Route 2)

## 2.2 基于AISC-11方法的楼盖体系动力特性及加速度响应分析

参照目前普遍认可的组合楼板舒适度评价规程——美国钢结构协会AISC-11标准对结构的舒适度进行评估,其舒适度评价主要由结构的固有频率和峰值加速度2个方面来进行控制,其中针对固有频率在4~8 Hz的结构,主要利用峰值加速度的限值来进行控制。由于结构固有频率过低会引起共振的效应,固有频率过高人对加速度的感受更不敏感,因此,选取比较有代表性的固有频率范围进行研究。对住宅、办公楼的楼盖,其峰值加速度限值 $a_0 = 0.049 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

楼盖体系承受荷载取值如下:恒载为混凝土和压型钢板2.51 kPa,30 mm厚现制水磨石面层0.65 kPa,20 mm厚混凝土找平层0.4 kPa,吊顶荷载0.18 kPa,有效均布活荷载为0.5 kPa(按照AISC-11标准要求取值)。

### 2.2.1 模态分析

AISC-11提出楼盖结构竖向振动的第1阶固有频率的简化计算方法。在计算一个确切模态的固有频率 $f_n$ 时,首先分为次梁板楼盖体系模型和主梁板楼盖体系模型考虑,然后再把它们组合起来。次梁板楼盖体系和主梁板楼盖体系的固有频率和挠度分别通过均布荷载作用下简支梁的固有频率和挠度的计算方程得到。 $f_n$ 的计算公式为

$$f_n = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_j + \Delta_g}} \quad (6)$$

式中: $\Delta_j$ 为次梁支撑范围内组合楼板的跨中挠度; $\Delta_g$ 为主梁支撑范围内组合楼板的跨中挠度; $g$ 为重力加速度。

次梁跨中挠度

$$\Delta_j = \frac{5\omega_j L_j^4}{384E_s I_j} = 2.129 \text{ mm}$$

主梁跨中挠度

$$\Delta_j = \frac{5\omega_g L_g^4}{384E_s I_g} = 4.375 \text{ mm}$$

式中: $I_g, I_j$ 分别为主、次梁的组合惯性矩; $E_s$ 为钢材弹性模量; $\omega_g, \omega_j$ 分别为主、次梁上的线荷载。

该楼盖体系的固有频率为

$$f_n = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_j + \Delta_g}} = 6.987 \text{ Hz} \leq f_1 = 7.588 \text{ Hz}$$

### 2.2.2 加速度响应分析

AISC-11将楼盖结构简化成单自由度系统,并假定人在走动的过程中会引发楼盖结构的共振。忽略静荷载影响,只考虑1阶简谐波荷载,即人行激励 $F_i = P_{\alpha_i} \cos(2\pi i f_s t)$ 。

通过选择最小的简谐波倍数 $i$ ,满足 $f = i f_s$ 符合楼板的固有频率,近似计算方程为

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_0 \exp(-0.35 f_n)}{\beta W} \leq \frac{a_0}{g} \quad (7)$$

式中: $P_0 \exp(-0.35 f_n)$ 为人以接近楼盖结构固有频率的频率行走产生的有效简谐波荷载; $a_p/g$ 为评估出的峰值加速度值; $P_0$ 为恒定的力,对楼盖取 $P_0 = 0.29 \text{ kN}$ ,折算为重量750 N的行人后取值为0.31 kN; $\beta W$ 为楼板对人员行走振动的阻抗, $\beta$ 为阻尼比, $W$ 为楼板的有效重量; $a_0/g$ 为规定的加速度限值。

次梁板体系的有效重量 $W_j$ 为

$$W_j = \omega_j B_j L_j = 332.8 \text{ kN}$$

主梁板体系的有效重量 $W_g$ 为

$$W_g = \omega_g B_g L_g = 619.6 \text{ kN}$$

组合楼盖体系的有效重量 $W$ 为

$$W = \frac{\Delta_j}{\Delta_j + \Delta_g} W_j + \frac{\Delta_g}{\Delta_j + \Delta_g} W_g = 525.8 \text{ kN}$$

针对AISC-11标准,在以上情况下对住宅、办公及教堂建筑的结构阻尼比取为0.02~0.05,而当建筑内有家具、非结构构件时,阻尼比取为0.03,选定结构的阻尼比 $\beta = 0.03$ ,则可得到该结构的峰值加速度为

$$a_p = \frac{P_0 \exp(-0.35 f_n)}{\beta W} g = 0.0167 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \leq 0.049 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

该计算结果满足限值要求。

### 2.3 结果对比

计算结果对比见表3。从固有频率来看,实际振动分析的结果大于AISC-11标准计算的结果,但二者都满足限值要求(在4~8 Hz范围内)。固有频率在限值范围内取值越高越远离低频的人行激励,能更加有效地避免共振效应,因此按照AISC-11标

表 3 计算结果对比

Tab. 3 Comparison of Calculation Results

计算方法		自振频率/Hz	AISC-11 标准自振 频率限值/Hz	峰值加速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	AISC-11 标准加速度 峰值限值/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	位移幅值/mm
ANSYS 有 限元法	模型 1	7.588	4~8	0.012 9	0.049	6.120
	模型 2			0.038 9		6.164
	模型 3			0.229 0		6.211
	模型 4			0.136 0		6.196
AISC-11 方法		6.987		0.016 7		

准计算的结果偏于保守。

从峰值加速度来看,当模型 3 和模型 4 的人行激励作用在所分析的楼盖结构上时,楼盖的峰值加速度都比模型 1 和模型 2 作用下的峰值加速度大(至少 3 倍以上)。这种现象说明,当考虑人行激励作用的位置变化以及人与楼板结构的动力耦合作用时,结构的动力响应有一个相当大的增加。在模型 1 与模型 2 人行激励作用下的振动分析结果与按照 AISC-11 标准计算的结果较为接近,并满足限值要求,而在模型 3 与模型 4 的人行激励作用下峰值加速度则远远超过限值要求。这主要是由于 AISC-11 的简化计算只考虑了与引起共振效应所对应的 1 阶简谐激励的作用,忽略了其他阶简谐激励的作用以及人行激励作用位置的变化和人对于楼盖结构阻尼、刚度的影响,这些问题对舒适度的影响很大,所以简化并不合理。

从峰值位移的角度来看,由于模型只考虑单人步行力的问题,施加荷载较小,结构处于弹性阶段,挠度值对舒适度的影响不大。

3 结 语

(1)AISC-11 简化计算方法的误差较大,从工程角度考虑,应推荐模型 3,4 作为楼盖结构舒适度计算的人行激励模型,考虑了多阶简谐激励的作用以及人行激励作用位置的变化和人与楼盖相互作用的过程,使人行激励模型更贴近于实际。

(2)峰值位移对舒适度的影响不大,不应作为限值条件。人行激励作用非常复杂,单人步行力存在差异性,频率难以固定,本文模型仍然存在局限性,因此未来更好的人行激励模型是考虑随机性按照窄带随机过程进行时域与频域下的分析,并考虑人群激励即人与人之间的相互影响。

(3)针对大跨度楼盖结构的舒适度评价标准也有待进一步研究,由于人对振动的反应有主观性和不确定性,受到大量复杂因素的影响,具有很大的差

异性。因此,如何科学定量地考虑人的舒适度标准仍有待探讨。

参考文献:  
References:

[ 1 ] 俞载道. 结构动力学基础[M]. 上海: 同济大学出版社,1987.  
YU Zai-dao. Fundamentals of Structural Dynamics [M]. Shanghai: Tongji University Press,1987.

[ 2 ] 王新敏,李义强,许宏伟. ANSYS 结构分析单元与应用[M]. 北京: 人民交通出版社,2011.  
WANG Xin-min, LI Yi-qiang, XU Hong-wei. ANSYS Structural Analysis Unit and Application [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.

[ 3 ] AISC 811-97, Design Guide 11: Floor Vibrations Due to Human Activity[S].

[ 4 ] ZIVANOVIC S, PAVIC A, REYNOLDS P. Vibration Serviceability of Footbridges Under Human-induced Excitation: A Literature Review[J]. Journal of Sound and Vibration 2005, 279(1/2): 1-74.

[ 5 ] KERR S, BISHOP N W M. Human Induced Loading on Flexible Staircases [J]. Engineering Structures, 2001, 23(1): 37-45.

[ 6 ] MELLO A V A, DA SILVA J G S, DA VELLASCO P C G, et al. Dynamic Analysis of Composite Systems Made of Concrete Slabs and Steel Beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(10): 1142-1151.

[ 7 ] BROWNJOHN J M W. Energy Dissipation from Vibrating Floor Slabs Due to Human-structure Interaction[J]. Shock and Vibration, 2001, 8(6): 315-323.

[ 8 ] MATSUMOTO Y, GRIFFIN M J. Mathematical Models for the Apparent Masses of Standing Subjects Exposed to Vertical Whole-body Vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 260(3): 431-451.

[ 9 ] 傅志方, 华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.  
FU Zhi-fang, HUANG Hong-xing. Modal Analysis Theory and Application [M]. Shanghai: Shanghai Jiao



- Tong University Press, 2000.
- [10] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社, 2007.
- WANG Xin-min. Numerical Analysis of Engineering Structure with ANSYS[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [11] 聂建国, 刘明, 叶列平. 钢-混凝土组合结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- NIE Jian-guo, LIU Ming, YE Lie-ping. Steel-concrete Composite Structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [12] HICKS S. Vibration Characteristic of Steel-concrete Composite Floor Systems[J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2004, 6(1): 21-38.
- [13] 周庆, 邹银生. 现浇混凝土空心楼盖受力特性研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 57-60.
- ZHOU Qing, ZOU Yin-sheng. Research on Force Resistance Properties of Cast-in-situ Hollow Concrete Floor[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 57-60.
- [14] 吴方伯, 汪幼林, 周绪红, 等. 混凝土密肋空心楼盖试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1): 59-62.
- WU Fang-bo, WANG You-lin, ZHOU Xu-hong, et al. Experimental Research on Hollow-ribbed Concrete Floor[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1): 59-62.
- [15] 黄健, 娄宇, 王庆扬. 多层体育健身场馆楼盖系统的舒适度设计[J]. 建筑结构, 2008, 38(8): 102-105, 117.
- HUANG Jian, LOU Yu, WANG Qing-yang. Comfortable Degree Design for Floor Systems of Health Clubs and Multistory Sports Gymnasium[J]. Building Structure, 2008, 38(8): 102-105, 117.
- [16] CECS 273: 2010, 组合楼板设计与施工规范[S].
- CECS 273: 2010, Code for Composite Slabs Design and Construction[S].
- [17] PIMENTEL R L. Vibration Performance of Pedestrian Bridges Due to Human-induced Loads[D]. Sheffield: University of Sheffield, 1997.

## 《建筑科学与工程学报》约稿函

### 尊敬的各位专家:

《建筑科学与工程学报》是由教育部主管、长安大学和中国土木工程学会主办的面向国内外公开发行的学术期刊, 主要报道结构工程、桥梁工程、岩土工程、地下建筑与基础工程、防灾减灾、建筑材料、建筑学、市政工程、力学及相关领域的最新研究成果。自 2005 年更名以来, 在各位专家的大力支持下, 《建筑科学与工程学报》得到了快速发展, 鉴于《建筑科学与工程学报》还有很大的发展空间, 为了进一步提高期刊的学术质量和影响力, 特向各位专家约稿。

《建筑科学与工程学报》目前的优势包括:

- (1)《中文核心期刊要目总览》刊源。
- (2)中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)刊源。
- (3)不收取审稿费。
- (4)发表周期短。
- (5)对学术质量高、有重大项目支持的论文优先发表(对于专家的优秀论文可当期发表)。
- (6)刊登综述类文章。
- (7)可同期刊登同一主题的系列成果。

希望各位专家能继续支持我刊, 积极投稿。

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

《建筑科学与工程学报》编辑部