

文章编号:1673-2049(2016)06-0030-07

# 基于舒适度的压型钢板-混凝土楼盖板厚取值研究

屈文俊<sup>1</sup>, 莫立标<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:**采用有限元软件 ANSYS 对大跨度压型钢板-混凝土组合楼盖模型进行数值分析, 研究楼板厚度与固有频率、峰值加速度之间的关系, 并给出了满足舒适度要求的板厚建议公式。结果表明: 现有规范对于人行荷载的简化忽略了人-板耦合等不利因素, 使得峰值加速度计算结果偏小, 人行激励模型应当考虑多阶简谐激励、作用位置变化以及人与楼盖相互作用; 随着板厚的增加, 刚度和质量对于楼盖体系固有频率的影响有一个临界点使固有频率取最小值, 一味增加次梁数目到后期往往事倍功半; 通过改变结构体系的布置来满足舒适度要求往往比改变板厚更为高效、经济; 由于单人行走过程中楼板峰值加速度持续时间短, 以均方根加速度作为评价指标更加合适。

**关键词:**组合楼盖; 固有频率; 峰值加速度; 次梁间距; 板厚

**中图分类号:** TU357.2

**文献标志码:** A

## Study on Slab Thickness of Profiled Steel Sheeting-concrete Composite Floors Based on Serviceability

QU Wen-jun<sup>1</sup>, MO Li-biao<sup>1</sup>, GUO Peng<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** Numerical analysis on large-span profiled steel sheeting-concrete composite floor was carried to study the relationship of slab thickness, natural frequency and peak acceleration by finite element software ANSYS, and the suggested formula of slab thickness meeting the requirement of serviceability was given. The result shows that the peak acceleration calculated values according to the current code are underestimated, because the unfavorable factors of person-slab coupling are ignored due to the simplification of pedestrian load. Thus, the multi-order harmonic excitation effect and the change of pedestrian position, as well as the interaction between human and floor should be taken into consideration in the human-induced model. As the slab thickness rises, there is a critical value for getting the minimum frequency to balance the effect of stiffness and mass. Increasing the number of secondary beams on blind faith may not lead to a better result to solve the problem of serviceability, and changing the layout may be more efficient and economic than changing slab thickness. As the duration time of peak acceleration of slab is too short during single walking, taking weighted root mean square acceleration as evaluating indicator may be more suitable.

**Key words:** composite floor; natural frequency; peak acceleration; beam spacing; slab thickness

收稿日期: 2016-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678430)

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.

## 0 引言

压型钢板组合楼板将混凝土布置在受压区,将钢板布置在受拉区,充分发挥了混凝土抗压和钢板抗拉的材料特性,同时利用压型钢板的抗弯刚度作为施工模板,加快施工进度,应用十分广泛。因为材料性能的充分利用,大跨楼盖变得更轻、更柔,阻尼也变得更小,第 1 阶固有频率与人行荷载的步频范围也变得更为相近<sup>[1]</sup>,因此在人行荷载下更易发生共振,进而引起舒适度问题。舒适度问题与承载力要求已成为大跨度组合楼板设计的控制因素<sup>[2]</sup>。设计者一般可以通过改变次梁数目、板厚等措施来达到规范的要求。因此,次梁布置、板厚等对自振频率、峰值加速度的影响规律对于初步设计阶段的结构布置和尺寸选择就显得非常重要。

本文在考虑人-板耦合的情况下利用 ANSYS 数值模拟的结果探讨板厚对固有频率、峰值加速度的影响,并提出根据次梁间距进行板厚取值的建议。

## 1 分析模型

### 1.1 理论模型

在分析舒适度问题时需要考虑固有频率和加速度,这些分析建立在动力学方程<sup>[3]</sup>之上,即

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = 0 \tag{1}$$

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \tag{2}$$

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

由于能耗机制的复杂性,工程计算中  $C$  常用瑞利阻尼实现,其计算公式如下

$$C = \alpha M + \gamma K \tag{3}$$

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

由动力学方程式(1)计算出固有频率、固有周期,反映的是组合楼板自身的固有特性;引入边界条件后,可利用有限元法求解式(2)得出峰值加速度。式(2)右侧的  $F(t)$  反映了人行荷载的影响,对等式的求解相当关键,所以在选择模型的时候不仅需要考虑结构主次梁间距、板厚、压型钢板的类型等布置的影响,还需要选择合理的荷载类型作为激励荷载。对于巴西里约热内卢州立大学的 Mello 教授等<sup>[4-5]</sup>提出的 4 种人行荷载模型,屈文俊等<sup>[1,6]</sup>通过研究认为,当人行激励模型考虑了多阶简谐激励、作用位置变化以及人与楼盖相互作用时,更贴近于实际,应作为楼盖结构舒适度计算的人行激励模型。人行激励

作用的加载方式如图 1 所示, $P_1, P_2, P_3, P_4$  均为动力荷载。人行走时的步长和步速参数如表 1 所示。

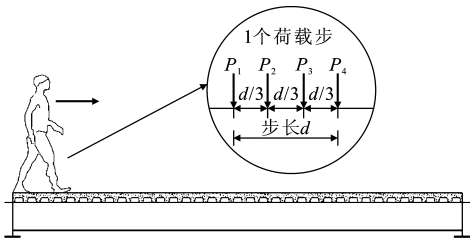


图 1 行人在楼板上走动示意

Fig. 1 Schematic Plot of People Walking on Floor

表 1 人行走特性

Tab. 1 Properties of People Walking

运动类型	步速/(m·s <sup>-1</sup> )	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

### 1.2 ANSYS 模型

计算机以及通用有限元软件的广泛采用使数值分析代替试验成为可能。本文采用 ANSYS15.0 对典型的大跨度楼盖体系进行建模分析,分析思路为通过模态分析确定其固有频率及振型情况,通过瞬态分析人行荷载作用下的楼盖动力响应,得到峰值加速度。根据常用的几何尺寸以及常见布局,将分析模型的次梁跨度定为  $L_1 = 7\text{ m}$ ,主梁跨度  $L_2 = 9\text{ m}$ ,由工字型钢梁和压型钢板-混凝土组合楼板组成。压型钢板采用的型号为 YX-75-200-600,横截面如图 2 所示,板厚  $0.8\text{ mm}$ 。钢构件均采用焊接 H 型钢,柱采用  $\text{HW}300 \times 300 \times 8 \times 10$ ,主梁采用  $\text{HW}550 \times 250 \times 7 \times 10$ ,次梁采用  $\text{HW}450 \times 200 \times 7 \times 10$ 。考虑混凝土弹性模量  $E_c$ 。在动力荷载作用下会得到提高,故取  $E_c = 37.8\text{ GPa}$ <sup>[7]</sup>,结构阻尼比取为 0.03。

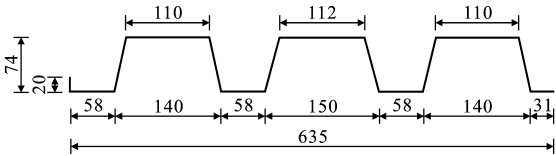


图 2 压型钢板横截面(单位:mm)

Fig. 2 Section of Profiled Steel Sheet (Unit:mm)

根据以上几何尺寸及材料特性建立的 ANSYS 框架模型如图 3 所示,行走线路如图 4 所示。由于 Beam189 三维梁单元考虑了扭转约束和剪切影响<sup>[8]</sup>,与梁的实际受力情况比较接近,梁柱均采用该单元。压型钢板采用 Shell181 单元,混凝土采用 Solid65 单元。根据白明杰等<sup>[9]</sup>的研究,组合楼板在

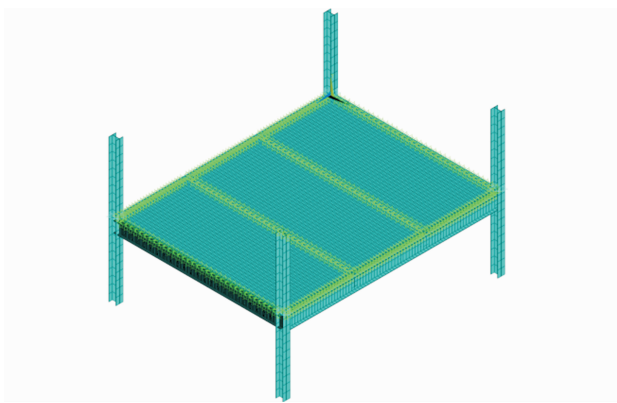


图 3 ANSYS 框架模型  
Fig. 3 Frame Model in ANSYS

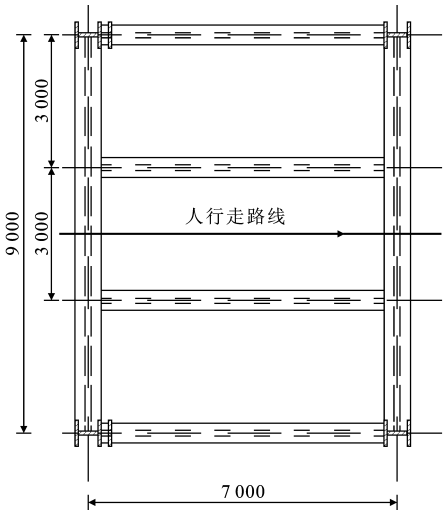


图 4 行走路线 (单位: mm)  
Fig. 4 Walking Route (Unit: mm)

荷载较小且未出现较多裂缝之前符合平截面假定, 压型钢板和混凝土之间基本无滑移。由于人行荷载较小, 可以认为组合楼板处于弹性小变形范围, 因此在 ANSYS 模拟中压型钢板和混凝土之间的接触面可采用共节点的方式实现。主次梁之间铰接, 通过释放主次梁间的扭转自由度约束来实现。由于柱子的存在会影响其整体刚度, 因此在建模时加入柱子来考虑对楼盖体系自振特性的影响。由于楼盖在人行激励下的微振动难以传递到与其相邻的楼层, 因此只是将柱子上下各延伸 1 个楼层高度, 然后在端部固接约束。同时约束 4 个角点处的平动自由度, 避免楼盖结构平面内的刚体位移。结构阻尼通过瑞利阻尼实现。分析时采用分块兰索斯法得到其频率及模态; 采用完全法谐响应分析计算瞬态响应, 得到峰值加速度。

ANSYS 模型在文献[1]中进行过初步的探讨, ANSYS 分析所得频率(7.588 Hz)与美国 AISC-11

计算所得频率(6.987 Hz)误差甚小, 并与文献[10]所得结果相吻合, 证明了此模型与分析方法的正确性。因此, 在本文中修改板厚、板跨等参数后继续沿用此模型。

1.3 人-板耦合效应

Wei 等<sup>[11]</sup>研究发现车底板振动会因为人与坐垫的相互作用而放大。同理, 人的自身形态变化可能会显著改变楼盖结构的振动特性<sup>[12-14]</sup>, 尤其是当楼板的基频为步频的 3 倍时其影响更为显著<sup>[13]</sup>。目前的许多研究<sup>[15-17]</sup>采用将荷载简化为傅里叶级数形式荷载的简化方式, 而忽略了人-板耦合的不利影响。本文采用的模型在考虑行人位置变化的基础上, 将人的身体等效成一个质量-弹簧-阻尼系统(图 5), 使之与结构相互作用, 即可以反映人体自身形态对结构体系的影响。ISO 5982—1981 提供了人体在卧姿、坐姿和站姿 3 种情况下的并动力模型参数<sup>[18]</sup>, GB/T 16640—1996<sup>[19]</sup>给出了适合中国人特性的无框架质量的并联三自由度模型, ISO 5982—2001<sup>[20]</sup>又给出了混联三自由度模型。由于以上模型均为多自由度<sup>[21-22]</sup>, 为便捷起见, 本文参考文献[23], 对于重量为 750 N 的行人, 其模型质量  $m = 77.25\text{ kg}$ , 弹簧刚度  $K = 1.005 \times 10^5\text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ , 阻尼系数  $C = 3\ 870\text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ 。ANSYS 中采用 Combin14 单元和 Mass21 单元实现, 为模拟人重心位置, 将质量单元高度定为 1.2 m。在行走路线上的落足点设置 Mass21 单元, 用 Combin14 单元连接混凝土板, 加载时采用生死单元法实现行人的移动。

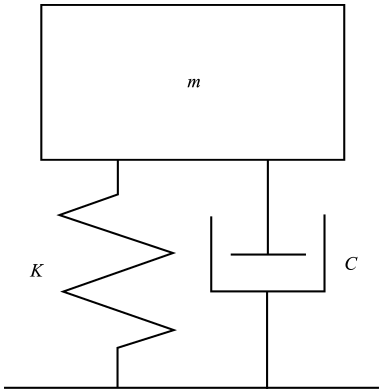


图 5 质量-弹簧-阻尼系统  
Fig. 5 Mass-spring-damp System

2 板厚对舒适度的影响

2.1 舒适度评价标准

纵观各国的规范、标准和研究, 人行激励下的振动舒适度控制指标大多采用挠度、频率和加速度等。

传统上,各国处理结构振动舒适度问题都采用限制构件变形的方式,但是随着楼板结构向着更轻、更柔和阻尼更小的方向发展,采用挠度限值控制结构的效果并不十分理想。从 20 世纪 30 年代起,国外对建筑结构的楼板振动问题就展开了一系列理论、试验和实测研究,重新建立其楼板振动的评价体系<sup>[6,24-25]</sup>,如表 2 所示。

表 2 楼板结构振动的评估标准

规范和标准	振动估量	评估时间
ISO 2631	计权的均方根加速度	
AISC-11	峰值加速度	
BS 6472	振动剂量	全部的振动时间
DIN 4150	连续有效值	0.125 s
VDI 2057	计权的均方根加速度	测量的持续时间
SBR	连续有效值	0.125 s
NS 8176	95%上限值	激励时间

到目前为止,人们普遍采用频率和加速度 2 套体系<sup>[2]</sup>,且越来越趋向于采用峰值加速度来衡量。作为目前普遍认可的组合楼盖舒适度评价规则是美国钢结构协会提出的 AISC-11 标准,其所采用的加速度评价指标具有广泛的认可度,中国 CECS 273:2010<sup>[26]</sup>对峰值加速度限值做出了相似的要求。因此,从工程实用角度和发展趋势考虑,本文将采用 AISC-11 的评价指标,取住宅、办公楼的楼盖峰值加速度限值  $a_p=0.049\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,辅以频率作为参考。

2.2 板厚对固有频率的影响

美国钢结构协会给出了计算楼盖结构竖向振动的第 1 阶固有频率  $f_n$  的简化计算方法<sup>[27]</sup>,即将楼盖体系分为次梁板体系和主梁板体系,分别按照简支梁计算固有频率和挠度,然后进行整合得到,即

$$f_n=0.18\sqrt{\frac{g}{\Delta_j+\Delta_g}}\tag{4}$$

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。

计算固有频率  $\omega$  的基本公式为

$$\omega=\sqrt{K/M}\tag{5}$$

式中: $K$  为楼盖结构刚度; $M$  为楼盖结构质量。

由式(5)可知,随着楼板厚度的增加,刚度增加,有利于增大固有频率,但是板厚增加的同时意味着增加了质量,而这又不利于增大固有频率,此消彼长,所以两者的影响必定有一临界点,此时楼盖的固有频率取最小值。采用上述 ANSYS 有限元模型进行数值分析,以上结论得到了验证。次梁间距 3.00

m 时楼盖的第 1 阶自振频率计算结果如图 6 所示,不同次梁间距、板厚的计算结果如图 7 所示。

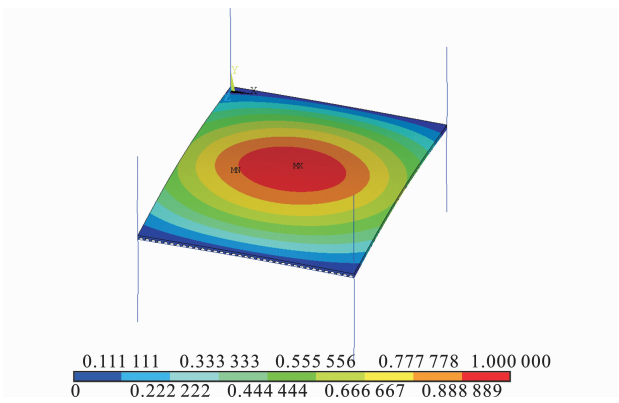


图 6 次梁间距 3.00 m 的第 1 阶自振频率(单位:Hz)

Fig. 6 The 1st Nature Frequency of Slab when Secondary Beam Spacing Is 3.00 m (Unit:Hz)

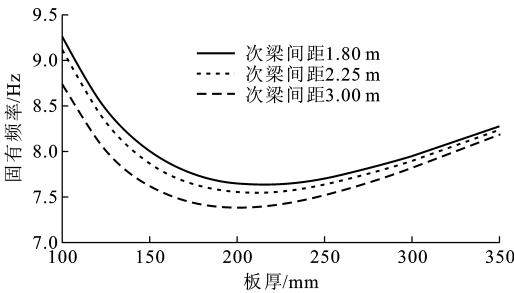


图 7 楼板固有频率与楼板厚度的关系

Fig. 7 Relationship Between Natural Frequency and Slab Thickness of Floor

从图 7 可知,在本文所采用的楼盖体系中,板厚 200 mm 左右为质量和刚度的变化临界点。当板厚小于 200 mm 时,随着板厚的增加,第 1 阶固有频率随之下降,说明增加板厚对于质量增加的效果更加明显;当板厚大于 200 mm 时,第 1 阶固有频率提高,说明此时增加板厚对于刚度的改变更加显著。随着板厚的继续增加,不同次梁间距下楼盖体系的固有频率趋于一致,次梁的布置间距对固有频率的影响越来越小,但是此时板厚已相当厚,在大跨组合楼盖体系中并不常见。

同时,从图 7 还可以看出,随着次梁间距的减小,楼盖体系的固有频率单调增加。这主要是由于压型钢板组合楼盖体系的绝大部分质量位于楼板上,增减次梁对于楼盖体系总体质量的影响较小,而刚度的改变较大。即使在曲线后半段,次梁间距的影响已相当弱,但仍未从根本上改变次梁间距越小,固有频率越大这一根本性规律。

由以上分析可知,若要提高楼盖体系的舒适度,通过改变结构体系,如增减次梁数量,缩小次梁间距

等,其效果往往比改变板厚要方便高效。

2.3 板厚对峰值加速度的影响

AISC-11 根据式(4)计算得到  $f_n$ ,通过选择最小简谐波倍数  $i$ ,提出峰值加速度简化计算公式

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_0 \exp(-0.35 f_n)}{\beta W} \leq \frac{a_0}{g} \tag{6}$$

式中: $P_0 \exp(-0.35 f_n)$  为人以接近楼盖结构固有频率的行走产生的有效简谐荷载; $a_p$  为评估出的峰值加速度; $P_0$  为恒定的力,对楼盖取 0.29 kN,折算成重量为 750 N 的行人后取值为 0.31 kN; $\beta$  为楼盖体系的阻尼比,对于建筑内有家具、非结构构件时,取值为 0.03; $W$  为楼盖体系的有效重量; $a_0$  为规定的加速度限值。

当次梁均匀布置,行人步长为 0.72 m,次梁间

表 3 次梁间距为 2.25 m 时峰值加速度与板厚的关系

Tab. 3 Relation of Peak Acceleration and Thickness of Floor when Secondary Beam Spacing Is 2.25 m

板厚/mm	130	150	170	180	190
ANSYS 峰值加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	0.091 3	0.071 3	0.057 7	0.052 4	0.047 9
AISC-11 峰值加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	0.014 9	0.013 4	0.012 1	0.011 5	0.011 0

表 4 次梁间距为 3.00 m 时峰值加速度与板厚的关系

Tab. 4 Relation of Peak Acceleration and Thickness of Floor when Secondary Beam Spacing Is 3.00 m

板厚/mm	150	170	200	210	220
ANSYS 峰值加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	0.136 0	0.093 9	0.061 4	0.054 6	0.049 1
AISC-11 峰值加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	0.016 7	0.013 1	0.011 2	0.010 6	0.010 1

对比 AISC-11 规范的计算结果和采用本文质量-弹簧-阻尼体系模拟人行激励的 ANSYS 分析结果可知,AISC-11 规范的计算结果偏小,究其原因在于规范对计算进行了简化,忽略了板跨、步频等因素的影响<sup>[28]</sup>,本文模型在考虑了人-板耦合之后采用的质量-弹簧-阻尼体系更加符合实际情况。

对比表 3,4 可知,当次梁间距为 3.00 m 时板厚需要达到 220 mm 才能满足要求,而次梁间距为 2.25 m 时板厚则只需要 190 mm,减小了近 13.6%。因此,板厚相对较薄时,减小次梁间距对于减小峰值加速度非常高效,是一个可取的做法。由表 3,4 还可知,随着板厚的增加,次梁间距的影响逐渐减小,即当板厚足够大时,相同的板厚可能取到相同的峰值加速度,次梁的布置方式不再是影响峰值加速度的关键因素,这与板厚对固有频率的影响一致。

2.4 板厚取值建议

将试算得到的满足加速度限值的最小板厚进行统计,得到的结果见表 5。

由于建筑内一般会有建筑隔墙、家具、装饰面层等,其实际质量还会增加;同时考虑到周围板的约束

距为 3.00 m 时,楼板中点的加速度计算结果如图 8 所示,不同次梁间距、板厚的计算结果列于表 3,4 (板厚为压型钢板底部至混凝土表面的厚度)。

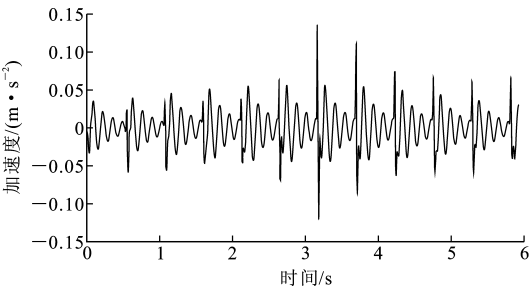


图 8 次梁间距 3.00 m 的楼板中点加速度曲线  
Fig. 8 Acceleration Curves of Floor Center when Secondary Beam Spacing Is 3.00 m

表 5 满足加速度限值的最小板厚

Tab. 5 Minimum Thickness of Floor for Meeting Limit Value of Acceleration

次梁间距 $L_n$ /m	1.80	2.25	3.00
板厚 $h$ /mm	150	190	220
ANSYS 峰值加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	0.048 7	0.048 0	0.049 1
AISC-11 峰值加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	0.012 6	0.011 0	0.010 1
$h/L_n$	1/12	1/12	1/14

影响,其实际峰值加速度还会减小。由此当采用本文人行激励模型初选板厚时,建议公式为

$$h = \left( \frac{1}{15} \sim \frac{1}{20} \right) L_n \tag{7}$$

从上述分析可知,AISC-11 规范的计算结果相对保守,其计算的峰值加速度小于 ANSYS 模拟的结果,因此当公式(7)计算得到的板厚按照 AISC-11 规范的计算公式进行计算时,一般也满足现行规范对于加速度限值的要求,因此可作为初步设计阶段板厚取值的参考。

值得指出的是,当楼盖体系的柱距已确定时,若继续增加次梁数量来减小次梁间距以求降低峰值加速度其效果往往有限。究其原因继续增加的次梁

位于变形较小的两端,因此刚度的增加也变得更加有限。在采用式(7)时,若次梁间距较小,则分母应该取大值,反之则取小值。

### 3 结 语

(1)由于 AISC-11 规范的简化计算只考虑了与引起共振效应所对应的 1 阶简谐激励的作用而忽略了其他阶简谐激励的作用、作用位置的变化、人-板耦合等,其计算结果偏小。当人行激励模型考虑了多阶简谐激励、作用位置变化以及人与楼盖相互作用时,更贴近于实际,应作为楼盖结构舒适度计算的人行激励模型。

(2)随着楼板厚度的增加,刚度和质量对于楼盖体系固有频率的影响必定有一临界点,此时楼盖的固有频率取最小值。同时,由于压型钢板组合楼板的绝大部分质量位于楼板上,增减次梁对于楼盖体系总体质量的影响较小,而刚度的改变影响较大。改变结构体系往往比改变楼板厚度要方便高效。

(3)对于压型钢板-混凝土组合楼盖体系而言,压型钢板组合楼板的板厚可以取  $(1/15 \sim 1/20)L_n$ ,若次梁间距较小,则分母应该取大值,反之则取小值。此时的板厚取值一般都可满足现行规范关于加速度限值的要求。

(4)峰值加速度持续时间短,行人的感知可能并没有那么明显,单纯采用峰值加速度来评估存在欠缺,后续研究可考虑采用计权的均方根加速度进行分析。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 屈文俊,宋超,朱鹏,等.人行激励下压型钢板-混凝土组合楼盖舒适度分析[J].建筑科学与工程学报,2014,31(4):7-15.  
QU Wen-jun, SONG Chao, ZHU Peng, et al. Serviceability Analysis on Profiled Steel Sheeting-concrete Composite Floors Under Human-induced Dynamic Loads[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(4): 7-15.
- [2] 虞终军,丁洁民,阮永辉,等.超高层建筑办公楼面竖向振动舒适度分析[J].结构工程师,2012,28(1):14-20.  
YU Zhong-jun, DING Jie-min, RUAN Yong-hui, et al. Floor Vibration Serviceability Analysis of a High-rise Office Building[J]. Structural Engineers, 2012, 28(1): 14-20.
- [3] 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.

- [4] MELLO A V A, DA SILVA J G S, DA VELLASCO P C G D, 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.
- [5] KERR S C, BISHOP N W M. Human Induced Loading on Flexible Staircases[J]. Engineering Structures, 2001, 23(1): 37-45.
- [6] 郭朋,屈文俊,熊天齐.大跨度楼盖结构舒适度评价标准与人行激励研究综述[J].结构工程师,2014,30(2):155-163.  
GUO Peng, QU Wen-jun, XIONG Tian-qi. Review of Studies on Long-span Floor Serviceability[J]. Structural Engineers, 2014, 30(2): 155-163.
- [7] MURRAY T M, ALLEN D E, UNGAR E E. Steel Design Guide Series 11: Floor Vibration Due to Human Activity[R]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 1997.
- [8] 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 Communication Press, 2007.
- [9] 白明杰,邵永健,翁晓红,等.压型钢板-混凝土组合楼板刚度的试验研究[J].混凝土与水泥制品,2011(5): 43-47.  
BAI Ming-jie, SHAO Yong-jian, WENG Xiao-hong, et al. The Experimental Analysis of the Stiffness of the Profiled Steel Sheeting-concrete Composite Floors [J]. China Concrete and Cement Products, 2011(5): 43-47.
- [10] 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.
- [11] WEI L, GRIFFIN M J. The Prediction of Seat Transmissibility from Measures of Seat Impedance [J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 214(1): 121-137.
- [12] 何浩祥,闫维明,张爱林.人行激励下梁板结构与人体耦合作用研究[J].振动与冲击,2008,27(10):130-133,165.  
HE Hao-xiang, YAN Wei-ming, ZHANG Ai-lin. Dynamic Interaction Between Human and Beam-slab Structures Under Human Walking Excitation [J].

- Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(10): 130-133, 165.
- [13] 谢伟平, 鲁伟, 何卫. 人-板耦合系统动力响应及相互作用研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(1): 56-62.
- XIE Wei-ping, LU Wei, HE Wei. Research on Dynamic Responses and Interaction of Human-floor Coupled System[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37(1): 56-62.
- [14] SUBASHI G H M J, MATSUMOTO Y, GRIFFIN M J. Apparent Mass and Cross-axis Apparent Mass of Standing Subjects During Exposure to Vertical Whole-body Vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293(1/2): 78-95.
- [15] 都磊. 人行激励下大跨度楼板振动舒适度研究[D]. 南京: 东南大学, 2010.
- DU Lei. Vibration Serviceability Research of Long-span Floor Under Human Activity [D]. Nanjing: Southeast University, 2010.
- [16] 赵娜. 人行激励下钢-混凝土组合楼盖振动响应研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- ZHAO Na. Investigate Response of Composite Floor Vibration Under Walking Excitation[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2011.
- [17] 于敬海, 李敬明, 王银平. 有节奏运动荷载作用下大跨度钢筋混凝土楼盖竖向振动舒适度分析[J]. 建筑结构, 2013, 43(10): 68-70, 58.
- YU Jing-hai, LI Jing-ming, WANG Yin-ping. Vibration Serviceability Analysis on Large Span RC Floor Under Rhythmic Activity Loads[J]. Building Structure, 2013, 43(10): 68-70, 58.
- [18] ISO 5982—1981, Vibration and Shock — Mechanical Driving Point Impedance of the Human Body[S].
- [19] GB/T 16440—1996, 振动与冲击 人体的机械驱动点阻抗[S].
- GB/T 16440—1996, Vibration and Shock — Mechanical Driving Point Impedance of the Human Body[S].
- [20] ISO 5982—2001, Mechanical Vibration and Shock-range of Idealized Values to Characterize Seated-body Biodynamic Response Under Vertical Vibration[S].
- [21] 杜磊. 某超高层建筑钢-混凝土组合楼盖振动舒适度研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- DU Lei. Study on Human-induced Vibration for Steel-concrete Composite Floor of a Super-high Rise Building[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [22] 杨康. 基于人-结构相互作用大跨楼盖振动响应及控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- YANG Kang. Study of Vibration Response and Control for Large-span Floors Based on Human-structure Interaction[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [23] 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.
- [24] 娄宇, 吕佐超, 黄健. 人行走引起的楼盖振动舒适度设计[J]. 特种结构, 2011, 28(2): 1-4, 29.
- LOU Yu, LU Zuo-chao, HUANG Jian. Comfortable Design for Floor Vibration Due to Human Walking [J]. Special Structures, 2011, 28(2): 1-4, 29.
- [25] 王洪涛. 楼板结构在人行走激励下的振动分析及性能评估[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
- WANG Hong-tao. Vibration Analysis and Performance Evaluation of Floor System Under Human-induced Excitation[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012.
- [26] 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].
- [27] AISC 811-97, Design Guide 11: Floor Vibrations Due to Human Activity[S].
- [28] 潘宁. 人行荷载下楼板振动响应舒适度研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2012.
- PAN Ning. Research on Floor Vibration Response Under Walking Loads for Serviceability[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2012.