

Floor Vibration Measurement Induced by Outside Air Condition Machines and Vibration Reduction Analysis

Bingruo Fan¹, Gang Zong², Bin Zhang²

¹SINOPEC Shanghai Gaoqiao Company, Shanghai

²Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction in College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

Email: fanbingruo@sinogpc.com

Received: Sep. 1st, 2015; accepted: Sep. 17th, 2015; published: Sep. 23rd, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Based on an engineering vibration measurement, vibration influence research induced by outside air condition machines was done in this paper. Firstly, vibration measurement was carried out, and time domain, frequency domain as well as vibration acceleration level were analyzed. Secondly, the finite element model was used to analyze different working conditions and a comparison was made with the results from measurement. Finally, the preferred consolidation and vibration reduction scheme was given. The analysis results showed that the section of column and the thickness of floor slab are important structure parameters for vibration reduction. It is suggested that the slab thickness of top floor should be increased to 200 mm and then the vibration level will be decreased to 73.2 dB, satisfying the current specification requirements.

Keywords

Outside Air Condition Machines, Floor Vibration Measurement, Structure Vibration Reduction Analysis

空调外机致楼盖振动实测与减振分析

樊冰若¹, 宗刚², 张斌²

¹中国石油化工股份有限公司上海高桥分公司, 上海

²同济大学土木工程学院, 结构工程与防灾研究所, 上海

Email: fanbingruo@sinogpc.com

收稿日期: 2015年9月1日; 录用日期: 2015年9月17日; 发布日期: 2015年9月23日

摘 要

本文以某一工程振动实测为背景, 研究了大型中央空调系统引发的振动对建筑振动的影响, 在进行振动现场实测及对实测信号时、频域和振动加速度级进行分析的基础上, 采用有限元模型对不同结果减振方案对应的振动工况进行了数值模拟, 提出了优化的结构减振方案, 分析结果表明, 框架柱截面尺寸和楼板厚度对振动水平的影响较大, 建议顶层楼盖楼板厚度增为200 mm, 此时的楼板振动响应水平减小至73.2 dB, 满足现行规范要求。

关键词

空调外机, 楼盖振动实测, 结构减振分析

1. 前言

空调外机的正常运行所引发的振动是人们日常生活中不可避免的问题, 其在给人们营造舒适工作生活环境的同时, 也给人们带来振动及噪声污染的困扰 [1]-[3]。长期的振动会对建筑结构造成累积破坏, 使结构产生裂缝等损伤, 影响结构的正常使用, 尤其是在激励振动频率与结构的自振频率相近时会产生共振现象, 从而加大结构的振动水平, 影响室内的正常生产、生活, 严重时甚至会影响建筑结构的安全性 [4]。系统认识该类设备振动对建筑结构的影响, 基于合理的评价方法对振动进行评价 [5]-[8], 并采取合理的措施消除振动影响是解决这一问题的关键所在。本文以某一工程振动实测为背景, 研究了空调外机引发的振动对建筑结构楼盖的影响及结构加固减振的优化方案。首先, 介绍了振动实测背景与测试方案, 对实测的振动数据进行了振动加速度级分析; 其次, 采用 MSC 系列通用有限元软件建立了相应的数值模型, 进行了不同振动工况的数值模拟, 并与实测所得到的数据进行对比 [9]; 最后, 综合实测与数值分析的结果, 提出了优化的结构加固减振技术方案 [9]-[12]。

2. 振动实测

2.1. 工程背景

本次测试是基于评估空调外机引发楼盖的振动是否对人们的工作生活环境造成影响而进行的, 采用振动测试仪器对紧邻空调外机的楼盖进行振动现场测试。振动测试场地为一多层框架结构的顶层楼盖, 中央空调外机组置于屋面板。

2.2. 振动测试方案

测试布点位于空调外机正下方楼盖区域, 测试共分为 2 个工况, 工况 1 测点布置于顶层楼盖楼板正中、次梁跨中、柱脚、1.5 m 高度处柱侧面等结构部位; 工况 2 测点位于屋面板空调外机区域, 各工况测点说明见表 1, 测点布置图如图 1, 图 2 为现场实测情况。

本次测试采用的是 IOtech 640e 动态信号分析仪, 与该动态信号分析仪对应使用的为朗斯 LC0115 内置 IC 压电加速度计, 灵敏度为 5000 mV/g, 量程是 1 g, 频率范围是 0.1~1500 Hz。本次振动测试采样频率取 512 sps, 采样持时为 1200 s。

Table 1. Measuring schedule
表 1. 各工况测点说明

测点号	测点位置说明	
工况一	1#、3#、8#	顶层楼盖 1.5 m 高度处柱侧面
	2#、5#	顶层楼盖次梁跨中
	4#、6#	顶层楼盖楼板正中
	7#	顶层楼盖柱脚处
工况二	9#	屋面板楼板正中
	10#	屋面板空调外机隔震橡胶支座处

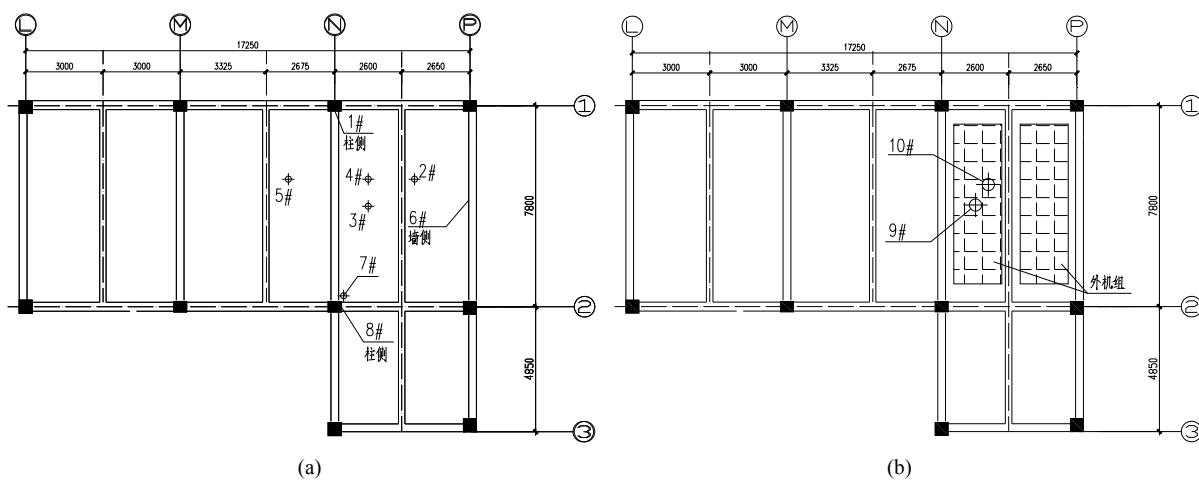


Figure 1. (a) Measuring points of Case 1 on the top floor; (b) Measuring points of Case 2 on the roof
图 1. (a) 工况 1 顶层楼盖测试布点图; (b) 工况 2 屋面板空调外机测试布点图



Figure 2. Measuring site
图 2. 测试现场情况

2.3. 实测数据分析

2.3.1. 信号时、频域特征分析

为得到结构的自振频率，通过计算实测到的脉动情况下结构的振动响应，得到了脉动下结构自振响应及其傅里叶谱图如 图 3。

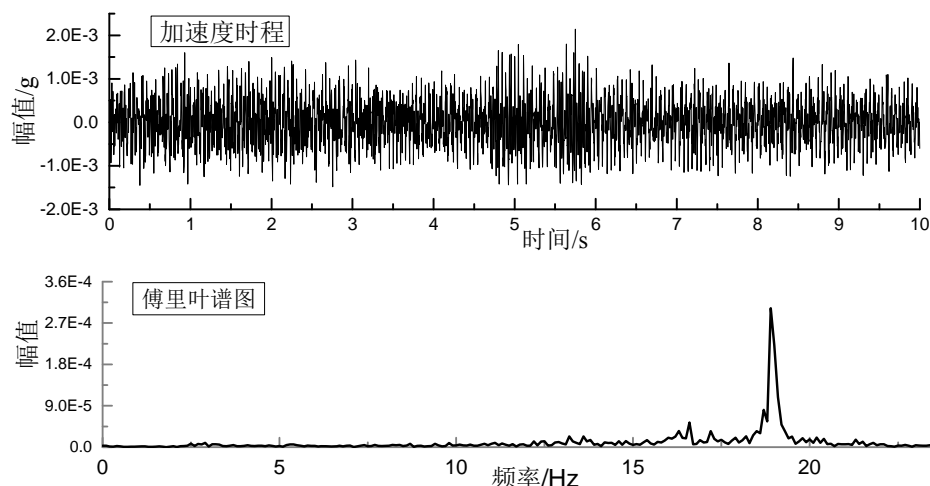


Figure 3. Vibration induced by ambient excitation of point 7#

图 3. 典型结构脉动响应样本(7#测点)

从图 2 脉动情况下结构的振动响应傅里叶谱图我们可以看到,楼盖板的竖向振动的自振频率成分主要集中在 19 Hz 左右,而梁连带板的竖向振动频率在 8 Hz 左右。

基于工况一和工况二实测数据整理并统计,得到空调外机工作状态下各工况实测样本共 60 条,分别从振动加速度级和频域方面对所截取的样本信号进行特征分析。限于篇幅,本文仅给出了 4# 的典型振动信号样本加速度时程及其傅里叶谱图,见图 4,其余测点的样本与此类似。

从图 4 加速度时程图可以看出空调外机引发的振动总体比较平稳。比较其余测点数据可见,振动响应的大小方面,顶层楼盖测点如梁跨中、板跨中与柱侧面的振动响应水平基本一致,有效值在 4 gal (1 gal = 1 cm/s²)左右,而柱脚的振动响应则比较小,有效值在 1 gal 左右;屋面板板中央的振动响应明显则大于顶层楼盖的振动响应,有效值在 6 gal 左右,说明振动沿着柱与墙传播的过程中存在衰减。频域方面,从傅里叶谱图中可以看出,空调外机引起的振动响应其频率在板跨中与梁跨中主要为 19 Hz,而在柱与柱脚处其频率主要为 4 Hz 左右,但是 19 Hz 频率成分依然存在,说明结构的主要响应频率在 19 Hz 左右为其共振区域。

2.3.2. 振动加速度级分析

本文参照建筑室内振动规范 [8],采用 1 s 时间计权的方式,利用 1/3 倍频程分析方法计算振动加速度级,计算公式如下:

$$L_{VAL} = 20 \lg \left(\frac{a_e}{a_0} \right) \quad (1)$$

式中: L_{VAL} 为振动加速度级,单位 dB; a_0 为基准加速度值, a_0 取 10^{-6} m/s²; a_e 为样本振动信号加速度有效值,单位 m/s²。

采用上述公式计算得到各实测样本信号的振动加速度级统计结果(均为计权振动加速度级)详见表 2。

从不同测点的振动加速度级统计来看,空调外机处于工作状态的情况下,顶层楼盖的振动加速度级水平已经超出国家规范 [8] 要求,梁跨中的最大振动加速度级达到 77.8 dB,板中央测点的振动加速度级达到了 76.6 dB,而柱脚及柱上测点的振动加速度级则处于标准以下,低于 70.0 dB。见图 5。楼板板中央和梁跨中的振动加速度级普遍高出国家振动规范标准 [8] (75 dB) 2 dB~3 dB 左右,需要采取措施以减小振动造成的影响。

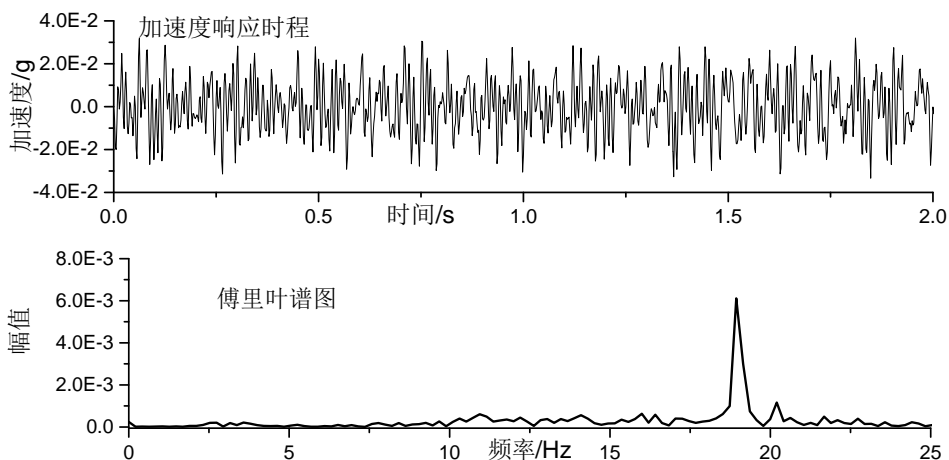


Figure 4. Forced vibration sample of point 4# induced by outside machines
 图 4. 空调外机致结构强迫振动典型样本: 4#测点

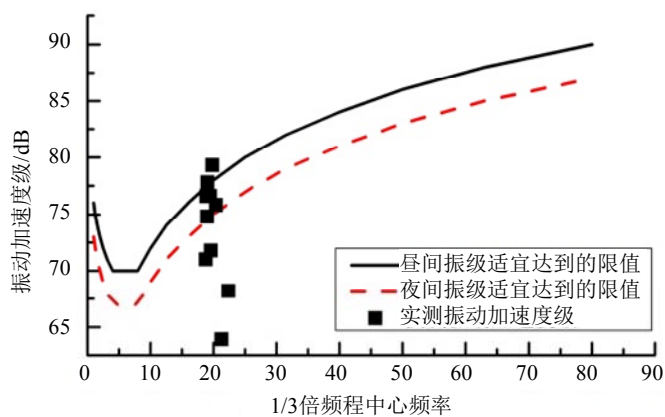


Figure 5. Standard level of vibration curve and the scatter plot of the measured vibration level
 图 5. 规范振级曲线与实测振级散点图

Table 2. The statistic VAL results (units: dB)
 表 2. 各工况测点振动加速度级统计(单位: dB)

测点号	振级	
工况一	1#	71.0
	2#	77.8
	3#	71.8
	4#	75.8
	5#	74.8
	6#	76.6
	7#	63.9
	8#	68.2
工况二	9#	76.6
	10#	79.3

3. 结构减振分析

鉴于空调设备的减振处理无法进一步实施(空调外机基座已采用橡胶垫减振处理),故本文从建筑结构减振措施等方面入手,对结构减振方案进行分析。

3.1. 数值模型分析

本文采用 Patran 有限元软件建立简化数值模型,用于模拟现场工况(模型构件的结构信息依照原设计取用)。模型为二层钢筋混凝土框架结构,底层柱脚为刚性约束。模型层高为 4.85 m,梁和柱均为一维欧拉梁单元,柱截面尺寸为 900 × 850 mm,主梁截面为 350 × 600 mm,次梁截面为 250 × 500 mm;楼板为壳单元,板厚为 120 mm;模型中梁柱单元最大尺寸为 0.5 m,楼板壳单元最大尺寸为 0.5 × 0.5 m,模型总自由度数 65,380,结构阻尼比为 0.05。有限元模型及 19 Hz 频率振动模态如 图 6。

基于 2.3.1 节脉动测试数据分析所得到的结论,本文采用主频为 19 Hz 的简谐波激励作为模型的输入激励以模拟空调外机的振动,以点荷载的形式施加于 图 1(a)中空调外机位置,共 12 个加载点以模拟空调外机的数量。

3.2. 减振方案探讨

为探讨减小空调运行引发振动对结构影响的措施,在前述实测和数值模拟的基础上,本文提出在 5 个方面进行结构减振设计,分别包括改变楼盖、二层楼盖楼板厚度,改变二层柱截面尺寸,减少同时运行的外机数量等几方面,具体方案详见 表 3。典型的数值模拟响应时程曲线见 图 7。考虑到减振方案分析是减振后与原结构振动响应水平对比的相对值,因此,本节计算过程中荷载幅值均取为 1.0。

选取与实测相对应的典型测点如柱上侧面、板中央、梁跨中,柱脚等测点作为目标测点,提取振动响应加速度时程,统计加速度有效值如 表 4 和 表 5 (限于篇幅问题,本文只给出减振方案一、二、三和四时 4#和 8#测点的振动响应结果,其余测点类同),振动响应随板厚的变化曲线如 图 8,振动响应随柱截面尺寸的变化曲线如 图 9。

对于方案一和方案二,二层楼盖振动响应有效值随楼(层)盖厚度增加的变化曲线见 图 8 所示,可见,当屋盖厚度增大时,二层楼盖振动水平呈现出减小 - 反弹 - 减小的变化趋势,而二层楼盖厚度变化时,该层楼盖的响应基本为单调减小,当屋盖和二层楼盖厚度交叉变化是时,二层楼盖的响应基本也呈现出单调减小的变化趋势。对于方案四改变柱截面尺寸时,二层楼盖的响应基本也呈现出单调减小的变化趋势,如 图 9 所示。对于方案五减少屋盖加载点数时,二层楼盖的响应基本未出现变化。

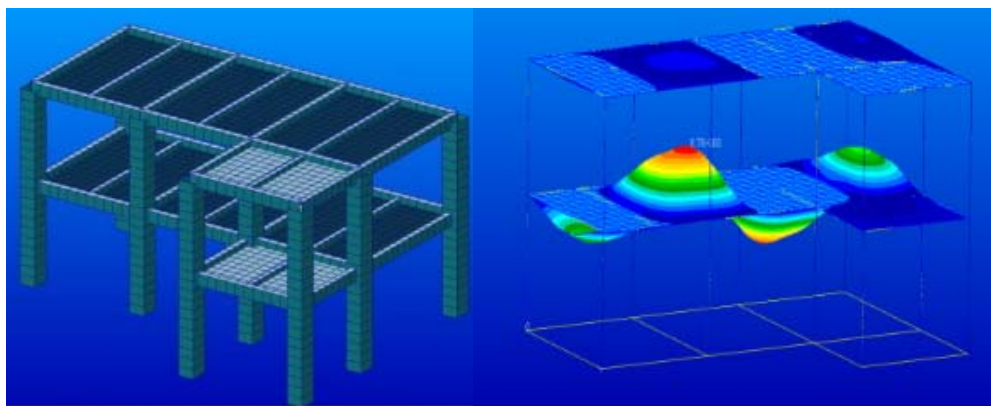


Figure 6. The FEM model and the mode of 19 Hz
图 6. 整体模型及二层楼盖竖向振动模态(19 Hz)

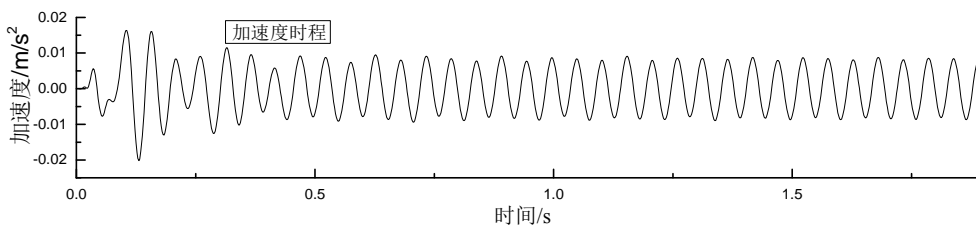


Figure 7. Typical numerical analysis results of the slab mid-span on 2nd floor
图 7. 典型的振动响应时程(二层楼盖板跨中)

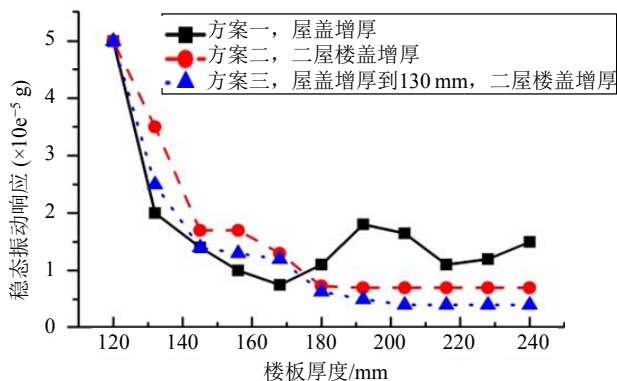


Figure 8. Changing curves of the vibration response in the center of the board on top floor along with the changing of the thickness of the board
图 8. 顶层楼盖楼板中央测点振动响应随板厚变化曲线如图

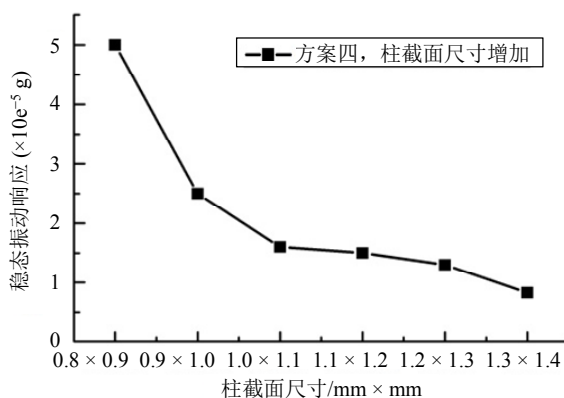


Figure 9. Changing curve of the vibration response in the center of the board on top floor along with the changing of the size of the column
图 9. 顶层楼盖楼板中央测点振动响应随板柱截面尺寸变化曲线如图

Table 3. Vibration reduction scheme
表 3. 减振方案

方案	说明
一	屋面板厚度从 120 mm 加厚到 240 mm, 每次计算增厚 10%, 其他模型参数不变
二	计算层楼盖板厚度从 120 mm 加厚到 240 mm, 每次计算增厚 10%, 其他模型参数不变
三	屋面板厚度 130 mm, 计算层楼盖板厚度从 120 mm 加厚到 240 mm, 每次计算增厚 10%, 其他模型参数不变
四	框架柱截面尺寸从 850 × 900 mm 增粗到 1000 × 1400 mm, 每次截面边长增加 10%, 其他模型参数不变
五	屋面板加载点减半以模拟空调不同的工作状态, 即减为 6 个荷载加载点, 其他模型参数不变

Table 4. The RMS of the board (unit: $\times 10 e^{-5} g$)
表 4. 板中央测点 4#有效值统计(单位: $\times 10 e^{-5} g$)

楼板厚度/mm	方案一	方案二	方案三
120	5.0	5.0	5.0
132	2.0	3.5	2.5
145	1.4	1.7	1.4
156	1.0	1.7	1.3
168	0.75	1.3	1.2
180	1.1	0.73	0.63
192	1.8	0.7	0.5
204	1.65	0.7	0.4
216	1.1	0.7	0.4
228	1.2	0.7	0.4
240	1.5	0.7	0.4

Table 5. The RMS of the column (unit: $\times 10 e^{-5} g$)
表 5. 柱测点(8#)有效值统计(单位: $\times 10 e^{-5} g$)

柱截面尺寸/mm \times mm	方案四
800 \times 900	5.0
900 \times 1000	2.5
1000 \times 1100	1.6
1100 \times 1200	1.5
1200 \times 1300	1.3
1300 \times 1400	0.83

Table 6. The VAL of measuring sites (units: dB)
表 6. 各测点振动加速度级统计(单位: dB)

测点号	振级
1#	60.1
2#	68.6
3#	59.3
4#	73.2
5#	68.7
6#	68.5
7#	71.1
8#	55.1

3.3. 优选减振方案

上述减振方案分析结果表明, 采用不同的结构处理方法均可以达到同一减振效果, 但综合考虑既有结构处理的施工条件等因素, 本文建议采用方案一为较优的实际方案(二层楼盖还未正式使用易于施工, 而屋盖施工存在空调设备、防水保温层等问题, 柱施工则会影响到下层结构等)。进一步分析, 本文拟定

对二层楼盖的厚度加大至 200 mm 为最优方案, 此时顶层楼盖的振动响应显著减小, 振动加速度级从加固减振前的 77.8 dB 降低到加固后的 73.2 dB, 在国家振动标准规定值 [8] (75 dB) 以下。具体各结构部位的振动加速度级统计分析结果见 表 6。

4. 结论

1) 实测表明空调外机运行引起楼盖振动的共振频率在 19 Hz 左右, 其振动加速度级水平最大值为 77.8 dB, 超出国家振动标准 [8] (75 dB) 2~3 dB 左右。

2) 本文提出五种减振方案, 通过数值分析可见, 楼(层)盖板振动响应的大小与楼板厚度、框架柱截面尺寸、空调外机开机数量等影响因素有关, 其中空调外机开机数量对振动水平的影响比较小, 而框架柱截面尺寸和楼板厚度对振动水平的影响比较大。

3) 综合考虑数值模型的计算分析结果和现场结构施工难易程度, 建议顶层楼盖楼板厚度增为 200 mm, 此时的楼板振动响应水平显著减小到 73.2 dB, 在国家振动标准规定值 [8] (75 dB) 以下, 说明该减振加固措施可行有效。

参考文献 (References)

- [1] 刘百国 (2010) 浅谈室外空调机对建筑物的影响及对策. *铜陵学院学报*, **1**, 83, 89.
- [2] 冯劲梅 (2003) 住宅空调的现状与发展趋势. *住宅科技*, **4**, 42-43.
- [3] 张庆仲 (2004) 现代住宅空调室外机设置的调查研究. *建筑科技*, 中国土木工程学会住宅工程工作委员会 2004 年住宅建设创新发展论坛会议.
- [4] 曹艳梅, 夏禾 (2002) 振动对建筑物的影响及其控制标准. *工程力学*, 增刊, 388-392
- [5] 李泉, 樊健生, 聂建国 (2012) 人群节律性运动下大跨楼盖的随机振动问题研究. *振动与冲击*, **24**, 9-15.
- [6] 蒋通 (2010) 环境振动实测和分析中考虑多振源影响的振级评价方法. *城市轨道交通研究*, **5**, 27-29.
- [7] 蔡翔宇, 姚晓平 (2010) 环境振动评价标准研究. *山西建筑*, **27**, 345-355.
- [8] 中华人民共和国国家标准 (2005) 住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准, GB/T50355-2005.
- [9] 李海波, 卢哲安 (2003) 框架结构消能减震设计的有限元分析. *世界地震工程*, **4**, 117-120.
- [10] 张建宇, 王曙光 (2001) 消能减震钢筋砼框架结构的设计方法研究. *工程力学*, **S**, 128-132.
- [11] 赵恩平, 刘晓静, 孙春燕 (2011) 中小学校框架结构抗震鉴定及加固实践总结. *土木工程与管理学报*, **3**, 98-102.
- [12] 李浩久, 强文博, 师小燕 (2009) 结构振动控制的发展和现状. *四川建筑*, **3**, 104-109.