

多层住宅环境振动影响测试与减振措施分析^①

朱 斌^{1,2}, 陈龙珠¹, 丁 力²

(1. 上海交通大学土木工程系安全与防灾工程研究所, 上海 200240;

2. 上海市建筑科学研究院 上海市工程结构新技术重点实验室, 上海 200032)

摘要:上海深厚软土地地区某6层砖混住宅房屋经常受到间歇性的振动干扰,其中5~6层尤为明显。本文通过现场振动测试确认了振源为距房屋北侧约80 m远处道路上通过的重型车辆。分析了房屋的环境振动特征和幅值,将其与新近实施的国标《建筑工程容许振动标准》(GB50868—2013)中有关住宅舒适性振级限值进行了比较;对影响舒适度最为严重的住宅结构水平横向振动用有限元软件建模,对结构环境振动响应起主要作用的第1阶自振频率和振型,由下设虚拟层来考察地基土的影响;最后根据该住宅环境振动的特性,分析了减振目标和可供进一步计算优化的两种减振技术措施。本文的实测与分析方法对解决类似的工程问题具有实用参考价值。

关键词: 多层住宅; 环境振动测试; 舒适度评估; 减振措施

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)02-0207-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.02.0207

Ambient Vibration Test for a Multi-story Residential Building and the Vibration Mitigation Measures

ZHU Bin^{1,2}, CHEN Long-zhu¹, DING Li²

(1. Dept. of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Key Laboratory of New Technology Research on Engineering Structure, Shanghai Research Institute of Building Sciences, Shanghai 200032, China)

Abstract: Brick-concrete buildings have been extensively used in urban and rural areas. However, this type of building, which frequently contains a shallow foundation, demonstrates poor structural integrity and is susceptible to influence from ambient vibrations. This case is especially valid for buildings that were constructed in previous eras. With the development of modern cities and the increasing demand for an enhanced quality of life, environmental interference caused by ambient vibrations has become a critical issue. In areas with soft soil, traffic is a primary source of ambient vibrations. Vehicle vibrations caused by road surface roughness or speed changes can cause vibrations throughout the foundation of a building. Therefore, the vibration of brick-concrete buildings is related not only to the excitation source of the vibration but also the soil characteristics, the foundation conditions, and the structural style. The human response to the vibrations of housing structures is closely correlated with a person's cognitive level and their current physical and psychological conditions. Thus, the potential difference in the reactions among building occupants is significant.

Residents in a six-story brick-concrete building, which is located in an area of Shanghai with soft ground, frequently complained about the intermittent interference from vibrations, particu-

① 收稿日期: 2014-02-17

基金项目: 上海市科委资助项目部分研究成果(11dz1202000)

作者简介: 朱 斌(1979—),男,博士生,高级工程师,主要从事工程结构检测、安全鉴定与加固技术研发。E-mail: 1931697937@qq.com

larly residents on the upper two stories. The measures confirmed that the environmental vibrations were generated by heavy vehicles traveling on a road that was located approximately 80 m north of the building. The frequency and amplitude characteristics of the ambient vibrations and the human comfort levels for the different stories of the building were analyzed according to the "standard for allowable vibration of building engineering" (GB50868—2013). To comprehensively evaluate the impact induced by the transversely horizontal vibrations, which influences human comfort levels for the three components of building vibration, a numerical finite element model (FEM) of the building was developed and analyzed. The soil in the model was simulated as a virtual layer.

According to the test results and the numerical analyses, two types of technical measures are proposed to reduce unfavorable vibrations. The paper yields the following conclusions:

(1) The test results show that heavy-duty vehicles from nearby roads are the main cause of the building vibrations. The vertical component of the vibrations along the structure is almost constant; however, its lateral component is significantly amplified, which primarily influences human comfort.

(2) The measures indicate that the peak acceleration range for the top two stories is 68~70 dB, which is lower than the limit values proposed by the "standard for allowable vibration of building engineering" (GB50868—2013). The rationality of the limit values is discussed to satisfy the demand of human comfort.

(3) The structural frequencies and modes are analyzed based on the assumption of a virtual layer of foundation; the simulated results correspond with the measures. The model is a reasonable tool for justifying the effect of vibration reduction measures.

(4) To ensure that each story of the multi-story brick-concrete building complies with the previously recommended standard, the peak lateral acceleration should be reduced by approximately 21% and the two proposed technical measures, which are compared, should be applied.

Key words: multi-storey residential building; ambient vibration testing; comfort evaluation; vibration mitigation measures

0 引言

砖混结构房屋因经济实用、施工简便,在我国城乡得到了广泛的应用。但这类房屋往往采用浅基础且整体性较弱,容易受到环境振动的干扰,建造年代较早的尤为如此。随着城市的发展、经济活动的频繁以及人们生活环境质量要求的提高,砖混结构房屋受环境振动影响的问题日益突出^[1]。

在软土地区,交通振源是引发环境振动的主要原因之一。交通运输车辆因道路不平整、变速行驶等因素产生的振动经过地基传播到建筑的地基后,房屋结构随之发生振动^[2]。因此,砖混结构的环境振动不但与振源有关,而且还受所在区域的地基、建筑基础及其结构形式等因素的影响^[3-4];而人在房屋室内对环境振动的反应与其认知水平以及受振时的生理、心理状况等方面相关,因人而异的特性显著。

本文对上海深厚软土地区某多层砖混房屋建筑

受环境振动的影响进行测试分析,同时对其中水平横向的振动响应进行深入分析,并与 SAP2000 有限元计算模型进行比对,对结构环境振动响应起主要作用的第 1 阶自振频率和振型由下设虚拟层来考察地基土的影响。最后根据该住宅环境振动的特性分析减振目标和可供进一步计算优化的减振技术措施。

1 某多层砖混结构房屋的环境振动问题

1.1 房屋环境振动问题概述

该房屋为上世纪 90 年代建造的 6 层砖混结构,位于一个住宅区的中部,周边都为 2~3 层的民房。它距离北侧道路最近,直线距离约为 80 m,其它三侧距离道路都在 200 m 以外。居民反映经常受到小区四周围道路上通过的机动车辆间歇性的振动干扰,其中 4~6 层尤为明显。

经过 2 次测试和对该房屋周围的振源进行调查分析,可以确认房屋北侧道路上通过的重型车辆是引发房屋有感振动的原因,且实测的数据表明场地的卓越周期和房屋的水平向自振周期较为接近。

1.2 住宅场地岩土工程概况

本住宅建筑工程场地属滨海平原地貌类型。场地地形基本平坦,实测勘探点的地面标高在 3.67~3.75 m 之间,一般地面标高约为 3.7 m。小区室外地坪高程为 4.1 m,对勘察时的地面抬高较少。

土层分布及其常用物理力学指标如表 1 所示,

表 1 土层分布及主要物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of the soil layers

层序	土层名称	厚度/m	重度/(kN·m ⁻³)	直剪固快(峰值)		比贯入阻力平均值 P_s /MPa
				粘聚力 c /kPa	内摩擦角 ϕ /($^{\circ}$)	
① ₁	填土	0.50~0.70	/	/	/	/
②	粉质粘土	1.50~1.80	18.70	20	18.0	1.07
③	淤泥质粉质粘土	1.50~5.70	17.40	14	16.5	0.57
③ _夹	粉质粘土	1.1~1.60	18.40	5	29.5	1.43
④	淤泥质粘土	9.90~10.50	16.70	12	9.5	0.78
⑤ ₁	灰色粘土	8.70~9.10	17.30	/	/	1.13
⑤ ₃	粉质夹粘质粉土	12.90~13.20	17.90	/	/	1.55
⑤ ₄	粘土	1.70~2.30	19.40	/	/	/
⑦	砂质粉土	未钻穿	19.10	/	/	/

可见其为深厚饱和软土地基。按上海市建筑抗震设计规范,该场地属于Ⅳ类,抗震设防烈度为Ⅶ度,设计地震分组为第一组。

1.3 房屋结构概况

房屋建筑平面近似为矩形,东西向长 39.84 m,南北向宽 7.24 m,房屋总高约 17.70 m,高宽比为 2.44。室内外高差 0.30 m,无地下室。房屋分为 3 个单元,每个单元均为一梯两户,户型均为一室一厅,房屋标准层建筑平面布置图见图 1。

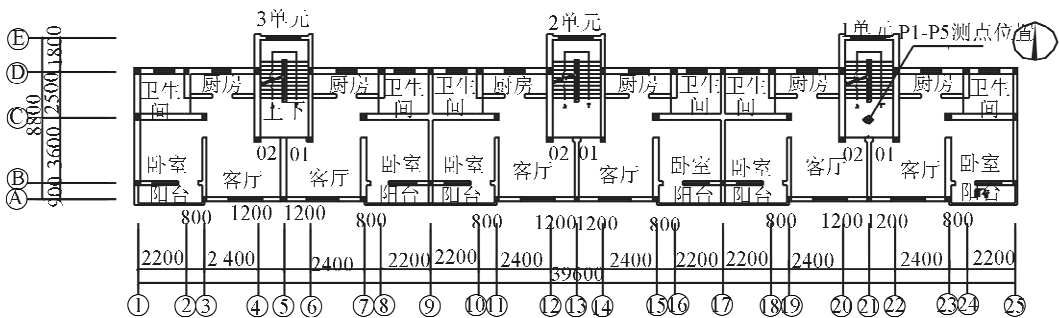


图 1 房屋标准层建筑平面及测点布置示意图

Fig.1 Measuring points at floors of the concerned building

房屋采用条形浅基础,混凝土强度 C20。房屋为砖混结构,横墙承重体系,每层都设置圈梁、构造柱,混凝土强度 C20。承重墙采用 240 多孔砖砌筑,砂浆砌筑强度为 M10;楼板主要为预制板,厨房、卫生间和阳台为混凝土现浇板。

2 房屋环境振动测试分析

2.1 振动测试工作概况

本文振动测试分析的主要仪器设备有 INV3020D 型智能信号采集仪和 941B 型超低频拾振器等。根据测试仪器通道数量、测试目标和现场条件,在房屋东单元的 1~2 层、4~6 层以及室外场

地分别布置测点,每个测点均布置了竖向、水平纵向和横向的拾振器,用以连续采集楼板及场地的振动加速度信号。测试时间为 10:00~15:00。测试过程中安排专人在房屋顶层观测记录邻近道路上通过的车辆,可以发现房屋振动加速度时程曲线峰值和重型车辆通过在时间上有明显的对应关系。

2.2 居民受振舒适度分析

由实测振动加速度峰值,按《建筑工程容许振动标准》(GB50868—2013)^[5]中第 6 章的方法计算振级(VL)见表 2,其中也列出了各测点的振动速度峰值。由此可见:

表 2 环境振动测试分析结果

Table 2 Analysis results of environmental vibration measure

测点与方向	加速度峰值 /(mm·s ⁻²)	VL /dB	速度峰值 /(mm·s ⁻¹)	
P1(6 层楼面) 竖向	3.19	60.59	0.37	
	水平纵向	8.44	65.77	0.92
	水平横向	10.97	69.98	1.14
P2(5 层楼面) 竖向	2.63	58.93	0.31	
	水平纵向	6.97	61.11	0.75
	水平横向	9.07	68.32	1.09
P3(4 层楼面) 竖向	2.02	56.65	0.28	
	水平纵向	5.36	58.83	0.56
	水平横向	6.97	66.04	0.77
P4(2 层楼面) 竖向	3.98	62.21	0.38	
	水平纵向	1.91	49.38	0.21
	水平横向	1.98	51.56	0.22
P5(底层地面) 竖向	2.36	57.64	0.31	
	水平纵向	1.13	42.21	0.19
	水平横向	1.17	46.99	0.20
P6(室外场地) 竖向	2.76	58.52	0.32	
	水平纵向	0.78	41.68	0.12
	水平横向	0.76	41.62	0.11

(1) 随着楼层的升高,两个水平向的振动加速度和振级各自都是单调增大的,但竖向则无此规律,且各层相差不明显,与刚体运动颇为相似。

(2) 各楼层的水平横向振动比水平纵向的强,但在房屋的底层和 2 层楼面则都比竖向的弱,只是这两层的居民对振感并无抱怨。

(3) 5~6 层居民对振感抱怨投诉,实测这两层楼面水平横向加速度振级最大值处于 68.3~70.0 dB,低于《建筑工程容许振动标准》^[5]中住宅区室内人体舒适性的振级限值水平向、混合向昼间 77 dB 和夜间 74 dB,表明该标准规定与实际情况不符而偏于宽松。若按文献^[8]建议,将该标准限值修改为水平向、混合向昼间 72 dB 和夜间 69 dB,则在夜间附近道路重载车辆经过时引起 68.3~70.0 dB 的环境振动,将处于有所超限而会引起居民抱怨的水平,可见比较适用于本文实例。

(4) 将表 2 实测最大速度峰值与《建筑工程容许振动标准》^[5]第 7 章的规定比较,可知由邻近公路重载车辆引起的环境振动不会对该房屋结构产生损伤。

2.3 环境振动频域分析

通过对实测信号的 FFT 频域分析,得到室外场地硬地坪以及该房屋结构楼面 3 个方向的环境振动频谱,典型曲线如图 2~图 4。由图可见,室外场地环境振动的频谱呈双峰型,这或许与硬地坪被环境振动激励起较高阶的振型有关。但由于该房屋结构

的质量大且为浅基础,环境振动引起各楼层振动的频谱曲线基本上属于低频单峰型,其对应频率与室外场地硬地坪频谱曲线上第 1 个峰的频率较为接近(表 3)。可见房屋结构对由地基传播而来的环境振动具有一定的滤波效应。

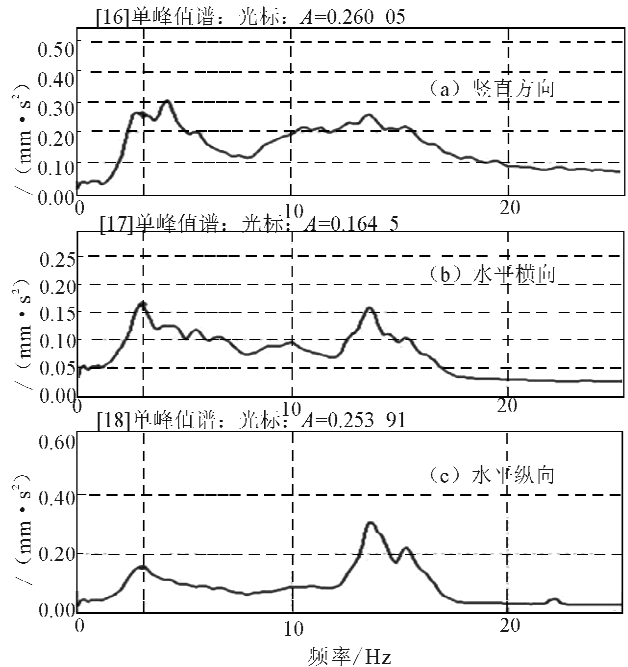


图 2 室外地坪振动加速度频谱

Fig. 2 Frequency spectrums of vibration at the construction site

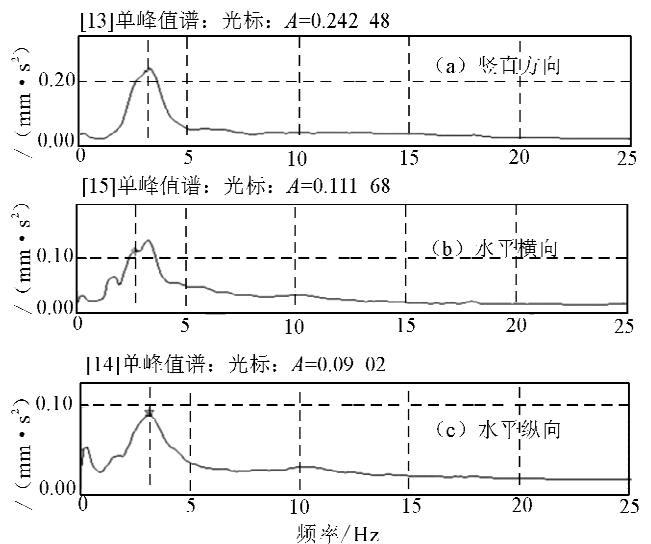


图 3 第 1 层(底层)室内地面振动加速度频谱

Fig. 3 Frequency spectrums of vibration at the ground floor of the building

由表 3 还可看出,房屋结构水平横向环境振动的主频明显比水平纵向的要小,反映出这幢多层房

屋结构的水平横向刚度比水平纵向刚度要低。

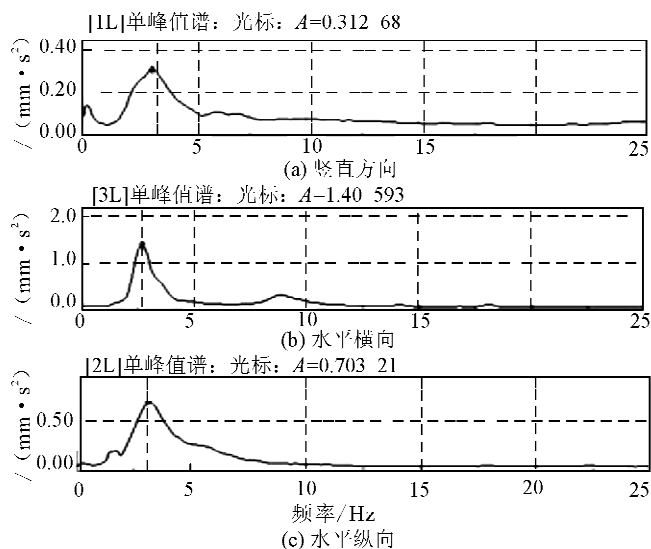


图4 第6层(顶层)楼面振动加速度频谱

Fig. 4 Frequency spectrums of vibration at the 6th floor of the building

表3 房屋结构以及场地振动的主要频率

Table 3 Predominant frequencies of the building and construction site

房屋结构的自振频率/Hz			场地频谱的第1个峰频/Hz		
竖直方向	水平横向	水平纵向	竖直方向	水平横向	水平纵向
3.125	2.637	3.125	2.950	3.030	3.030

2.4 水平横向振动加速度随楼层而变化的规律分析

通过上述分析可知,该房屋结构以水平横向的振动为对居民舒适度的主要影响因素。为进一步了解其水平横向加速度响应的特性,对实测信号在每10 s时段上读取各楼面振动加速度的最大峰值,再在对其经过滤除干扰和2次积分获得的位移信号上读取相应的最大位移峰值。在同一组次测试中,由信号可见,各楼面水平横向振动加速度峰值几乎同时出现(时差不超过0.05 s),使得加速度峰值随楼层升高而变化的曲线与第1阶水平横向振型较为相似。

图5由上述读取方法获得的10组数据绘制,其中纵坐标对楼面的编号方法:底层楼面(地面)为0,底层顶即2层楼面为1,2层顶即3层楼面为2,以此类推6层顶即屋面为6;横坐标是各层水平横向加速度或位移峰值以6层楼面为基准进行归一化。由图可见加速度和位移峰值沿楼层高度的放大规律相似,后者的离散程度相对要小一点;平均而言,顶层楼面的横向水平振动强度大约是底层地面的5

倍,放大效应较为显著。

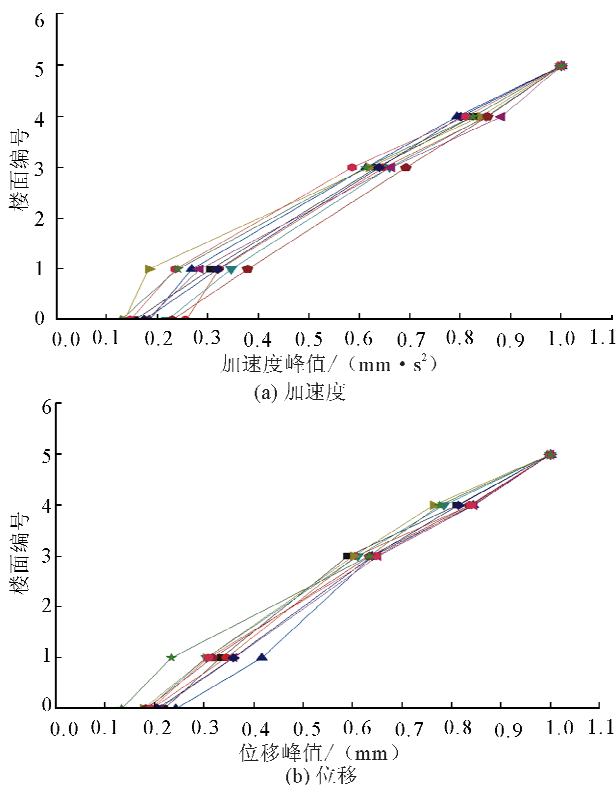


图5 水平横向加速度和位移峰值沿楼层高度的变化

Fig. 5 The acceleration and displacement variation with height for normalized acceleration in transversely horizontal direction

图5和表2中的最大加速度测试分析数据均表明,该房屋结构第6层楼面的水平横向振动与底层地面相比放大了近5倍,对比非常显著。

由于房屋结构基础和底层室内地面置于深厚软土地基之上,将图6与常规假设房屋结构基底固定条件下计算出的水平横向第1振型直接进行比较似欠合理。对此下文拟介绍分析一种简化分析方法及其结果。

3 地基对房屋结构动力特性影响的简化分析

对图1所示房屋结构采用有限元计算软件SAP2000 V15建模计算其动力特性。环境振动相对微弱,可对房屋结构进行弹性分析。综合考虑计算精度和模型的复杂程度,楼板、砌体墙体采用壳单元模拟,圈梁、构造柱采用框架单元模拟。其中MU10烧结普通砖和M10水泥砂浆砌筑的砌体弹性模量根据《砌体结构设计规范》(GB 50007—2011)^[6]表3.2.5-1选取为3 024 MPa,圈梁、构造

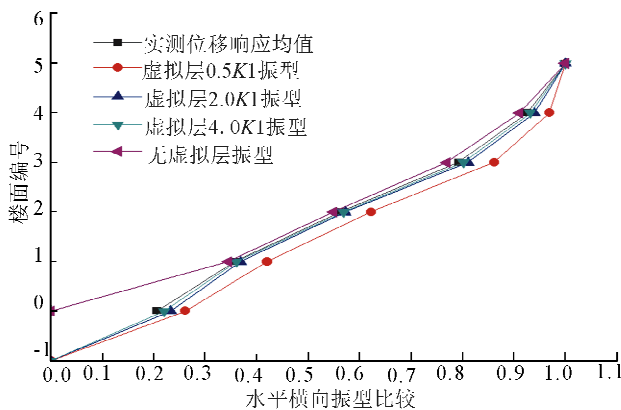


图6 设虚拟层刚度对房屋水平横向振型的影响

Fig. 6 Horizontally fundamental modes of building on virtually underground layer with different rigidities

柱和楼板等混凝土材料的参数按 C20 查混凝土规范选取。各层质量参照《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[7]并结合实际情况取值。

为尝试考察地基的非刚性固定对房屋结构动力特性的影响规律,在地面下方增设一个虚拟层,使得房屋底层楼面可以运动。虚拟层底的编号为-1,假定固定不动;虚拟层顶部质量取与房屋底层顶板的相同,侧向刚度按房屋底层刚度 K_1 的 0.5~4 倍来试算。在此模型下,由有限元计算得到房屋结构水平横向的第 1 阶自振频率如表 4,图 5 所示实测平均数据与增设虚拟层后由有限元计算的第 1 阶水平横向振型比较如图 6。

由表 4 可见,随着所取虚拟层侧向刚度数值的减小,大约为房屋第 1 阶水平横向自振频率的计算值随之减小,当虚拟层侧向刚度取约为底层刚度 K_1 的 3 倍时,计算所得的该自振频率与实测值比较接近。而从图 6 一组曲线可以推论,由图 5 所示各楼面实测平均数据沿高度的变化与虚拟层侧向刚度取约为 3 倍底层刚度 K_1 时,对应的振型曲线也相差不多,但在底层地面处与常规将房屋地基假设成固定的房屋振型曲线差别很大。

表 4 下设虚拟层刚度对房屋水平横向自振频率(Hz)的影响

Table 4 Horizontally fundamental frequencies of building on virtually underground layer with different rigidities

实测	虚拟层刚度				
	无穷大(常规)	$4K_1$	$2K_1$	K_1	$0.5K_1$
2.637	2.743	2.702	2.586	2.341	2.214

上述分析初步表明,本文用下设虚拟层来考虑地基对房屋结构第 1 阶振型和自振频率影响,这一

简化做法的结果具有一定的可信度,值得对其参数的合理取值开展进一步的研究,以便在实际工程测试分析中加以应用。

4 减少房屋环境振动的技术措施初探

由第 2.2 节第(3)点分析可知,要使得该房屋居民在夜间也不至于对附近道路重载车辆经过时引起的振动达到 69 dB,则第 6 层楼面的振级要降低 2 dB。对此,按振级定义估计该层楼面的横向水平加速度峰值的折减率 α 满足 $-20\lg\alpha=2$,即 $\alpha=79\%$ 。这意味着拟采取的技术措施要将振动加速度峰值降低 21%。

对该房屋结构,有两种基本的减振技术措施可供选择,可对其进行技术、经济和现场施工可行性等方面的综合计算和分析论证后择优选出:

(1) 对房屋上部结构维持现状,但增设桩基以提高房屋地基基础刚度,减少底层楼面(地面)的振动输入,从而将第 5、6 层的振级降到居民可以接受的程度;

(2) 对房屋维持浅基础,但对其上部结构进行加固,以减小水平振动沿高度的放大倍数,从而将第 5、6 层的振级降到居民可以接受的程度。

由于地基振动的主要频率较低,波长处于 30~50 m 范围,在房屋周围设置被动型隔振沟的深度较大,采用这种措施的可行性相对较小。

5 结论和建议

通过对上海深厚软弱地基上某 6 层砖混住宅环境振动的现场测试和分析,本文得出以下主要结论:

(1) 本栋房屋测试结果表明,由邻近道路重载车辆经过引起的环境振动,竖向分量沿高度方向基本上未被放大,而具有明显放大效应的横向水平振动是影响居民舒适度的主要因素;

(2) 该房屋 5~6 层居民因振感强而抱怨投诉,实测其横向水平加速度峰振级的最大值处于 68~70 dB,低于《建筑工程容许振动标准》(GB50868—2013)对住宅区室内人体舒适性要求昼间 77 dB 和夜间 74 dB 的限制,再次表明这一标准振级限值与实际相比显得偏松,而将其昼夜限制均降低 5 dB 更为合适;

(3) 本文尝试下设虚拟层来反映地基对房屋自振频率和振型的影响,初步表明计算结果与实测数据能够相符,在后续的房屋减振措施论证中具有实用潜力,但对合理选取虚拟层参数的方法尚需进一

步研究;

(4)要使得该多层砖混房屋各楼面在夜间的振级低于上述第(2)点建议的 69 dB,则需将横向水平振动加速度峰值降低大约 21%,有两个技术措施可供进一步的计算论证后选用:增设桩基以减小房屋底层被输入的环境振动,或加固上部结构以减小沿高度的放大效应。

参考文献(References)

- [1] Hao H, Ang T C. Analytical Modeling of Traffic-induced Ground Vibrations[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 921-928.
- [2] Ahmad S, Al-Hussaini T M, Fishman K L. Investigation on Active Isolation of Machine Foundations by Open Trenches[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(6): 454-461.
- [3] 马宏旺,王兰民,陈龙珠,等.农村住宅砌体结构地震破坏数值模拟研究[J].地震工程学报,2013,35(2):232-239.
MA Hong-wang, WANG Lan-min, CHEN Long-zhu, et al. Numerical Simulation of Earthquake Damage in Rural Masonry Buildings[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(2): 232-239. (in Chinese)
- [4] 刘红玫,林学文.甘肃省农村各种结构类型房屋的地震破坏机理[J].西北地震学报,2007,29(1):75-78.
LIU Hong-mei, LIN Xue-wen. Structure Types of the Rural House and Seismic Destroying Mechanism in Gansu Province[J]. Northwestern Seismological Journal, 2007, 29(1): 75-78. (in Chinese)
- [5] 中国机械工业联合会. 建筑工程容许振动标准(GB50868—2013)[S]. 北京:中国计划出版社,2013.
China Machinery Industry Federation. The Standard for Allowable Vibration of Building Engineering (GB50868-2013)[S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese)
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 砌体结构设计规范(GB 50007—2011)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
Ministry of Housing and Urban—Rural Development of the People's Republic China. Code for Design of Masonry Structures(GB 50007—2011)[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范(GB 50009-2012)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
Ministry of Housing and Urban—Rural Development of the People's Republic China. Loading Code for Design of Building Structures(GB 50009-2012)[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [8] 朱斌,陈龙珠,龚治国,等.上海某小区高层住宅环境振动影响测试评估[J].工程抗震与加固改造,2013,35(4):115-123.
ZHU Bin, CHEN Long-zhu, GONG Zhi-guo, et al. Evaluation of Industrial Vibration Impact to Tall Residential Buildings in Shanghai[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2013, 35(4): 115-123. (in Chinese)