

地铁邻近建筑的厚层橡胶支座基础隔振试验研究

盛涛^{1,2}, 李亚明³, 张晖³, 施卫星², 杨悦²

(1. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江宁波 315211;

2. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092;

3. 上海建筑设计研究院, 上海 200041)

摘要: 设计两种不同层厚的叠层钢板橡胶支座, 对其竖向刚度进行测试, 检验了支座设计方法的可行性。在上海市某地铁站附近修建两层砌体结构足尺试验模型, 通过改变厚层橡胶支座的类型及布置方式形成 4 种现场试验工况, 检验了基础隔振措施对提高地铁邻近建筑室内舒适度的有效性。试验结果表明: 基础隔振措施可使楼板的 Z 振级减小约 19 dB, 且隔振频率越低时, 舒适度提高效果越明显; 合理控制竖向隔振频率与楼板第 1 阶自振频率的比例关系, 是设计基础隔振结构的关键, 比例越小时隔振效果越明显; 基础隔振虽能明显减小楼板的竖向高频振动, 但也同时放大了整体结构的竖向低频振动, 舒适度由低频振动控制; 基础隔振会使基础部位的峰值速度出现增大现象, 但对现代建筑结构的安全性不会构成明显影响。

关键词: 厚层橡胶支座; 地铁; 舒适度; 隔振频率; 安全性

中图分类号: TU352.12 TB533.2 TU317.1 文献标志码: A

Field experiment study of subway nearby building's base isolation by laminated thick rubber isolator

SHENG Tao^{1,2}, LI Yaming³, ZHANG Hui³, SHI Weixing², YANG Yue²

(1. Faculty of Architecture & Civil Engineering & Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Shanghai Institute of Architectural Design & Research, Shanghai 200041, China)

Abstract: Two sets of rubber isolators in different thickness were designed and tested in laboratory to verify the feasibility. Then a full-scale two-story masonry model was constructed near a subway station in Shanghai. By verifying the kinds and layout of thick rubber isolators, four different field experimental conditions were designed to verify the effectiveness of base isolation method. Results show that: Z-vibration levels of floorslabs are decreased 19 dB maximally with base-isolation; the lower the resonance frequency, the better the human comfort inside building; the ratio of the structure's vibration isolation frequency to the floorslab's resonance frequency is the key to the design of subway vibration isolated structures; the lower the ratio, the better the effectiveness; human comfort inside base-isolated structures is controlled by the low frequency vibrations of structures' movement as a whole, though the floorslab's high frequency vibrations are reduced effectively; after base isolation method, the structure's peak velocity of particle vibration at foundation is amplified, but the influences on structure's safety still be little because modern buildings' mass is great.

Keywords: laminated thick rubber isolator; subway; human comfort; vibration isolation frequency; safety

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408324), 上海市建设交通“十一五”重大科研项目计划(重科 2010-002)。

作者简介: 盛涛(1984—)男, 湖北仙桃人, 工学博士, 讲师。E-mail: south_west@126.com

通信作者: 施卫星(1962—)男, 上海人, 工学博士, 教授。E-mail: swxtgk@126.com

收稿日期: 2014 年 1 月

0 引言

轨道交通系统已成为我国在“十二五”时期的重点投资和发展战略之一。随着各大、中型城市的地铁线路逐步投入运营,引发了一系列环境振动问题,如室内舒适度、精密仪器的正常使用及古建筑的安全保护等,受到社会各界的普遍关注^{[1-2],[3]1-2}。

传统的地铁环境振动控制方法主要包括振源减振、传播途径减振及建筑物被动减振与隔振等^[4-6]。这些方法均具有各自的优、缺点,仅适用于特定的工程场合。以往的研究结果^[7]表明,厚层橡胶支座在其水平力学性能与传统的薄层橡胶支座没有明显差别的前提下,还具有一定的竖向刚度。结合实测地铁环境振动的频谱特性,厚层橡胶支座可用于地铁邻近建筑的环境振动控制,但相关的试验研究和工程应用还较少^[8]。

为了分析厚层橡胶支座应用于地铁邻近建筑基础隔振的可行性,本文作者设计和制作两种不同层厚的叠层钢板橡胶支座,结合上海市某地铁站附近的两层砌体结构足尺模型试验,验证应用厚层橡胶支座形成的基础隔振措施对提高室内舒适度的有效性。在此基础上,评估该措施对结构安全性的影响程度。

1 厚层橡胶支座及其竖向刚度测试

地铁环境振动的实测及研究结果^[9-10]表明,地铁运行主要引发建筑结构的竖向振动,进而影响其室内舒适度。借鉴传统叠层钢板橡胶支座的隔震原理,通过增加单层橡胶层的厚度,使其在具有较低竖向刚度的同时,还能保持足够的竖向承载力。其中,厚层橡胶支座的竖向刚度 K_V 的计算式为

$$K_V = \frac{E_{cb}A}{h} \quad (1)$$

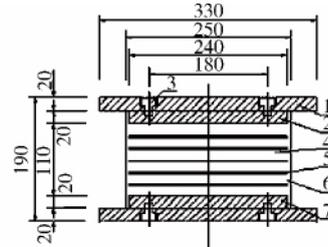
其中: A 为橡胶的截面积, $A = \pi D^2/4$, D 为橡胶支座直径; E_{cb} 为修正压缩模量,按式(2)计算。

$$E_{cb} = \frac{E_c E_b}{E_c + E_b} \quad (2)$$

其中: E_b 为橡胶材料的体积弹性模量,约为 2 000 MPa; E_c 为压缩弹性模量,取决于橡胶材料的国际标称硬度及支座的第一形状系数^[11]。

为了检验厚层橡胶支座的竖向刚度计算式,设计了两种尺寸的叠层钢板橡胶支座,分别为 I 型和 II 型。支座的构造如图 1 所示,对应的设计参数如表 1 所示。

试验中所用的橡胶,其国际标称硬度为 53 度。根据天然橡胶的弹性模量与标称硬度和形状系数之



注: 1. 连接板; 2. 钢封板; 3. 螺栓; 4. 单层橡胶; 5. 2 mm厚的夹层钢板; 6. 外封橡胶层; 7. 钢封板。

图 1 厚层橡胶支座构造

Fig. 1 Design of laminated thick rubber isolator

表 1 厚层支座的设计参数

Table 1 Design parameters of thick rubber isolators

支座类型	橡胶层厚/mm	橡胶层数	形状系数 S_1	形状系数 S_2
I 型	6.6	13	9.1	2.8
II 型	16.7	5	3.6	2.4

间的关系^{[3]72-73},得到的 I 型和 II 型橡胶支座的 E_c 分别为 250 MPa 和 50 MPa。根据式(1)、(2)计算得到 I 型和 II 型支座的竖向刚度分别为 116.9 kN/mm 和 22.07 kN/mm。

试验按图 1 所示的构造要求共制作了 12 个厚层橡胶支座试件, I 型和 II 型支座各 6 个。采用如图 2a 所示的屏显液压万能试验机对其竖向刚度进行测试。测试现场照片如图 2b 所示。



(a) 屏显液压万能试验机

(b) 测试现场

图 2 支座竖向刚度测试的仪器及现场

Fig. 2 Testing instrument and site of rubber isolators

两个试件的加载曲线如图 3 所示,由图可知, II 型支座的割线刚度远小于 I 型支座。结合表 2 中所有试件竖向刚度实测值的最大 K_{Vmax} 、最小 K_{Vmin} 及平均值 K_{Vave} 可知, I 型和 II 型支座的竖向刚度实测值与理论值的最大误差均不超过 10%, 平均值的误差控制在 7% 以内, 因此, 上述厚层橡胶支座的设计合理。

表 2 试件的竖向刚度测试结果

Table 2 Vertical stiffness testing results of specimens

支座类型	$K_{Vmax}/(kN \cdot mm^{-1})$	$K_{Vmin}/(kN \cdot mm^{-1})$	$K_{Vave}/(kN \cdot mm^{-1})$	K_{Vave} 与理论值的相对误差
I 型	115.1	107.4	112.1	4.1%
II 型	24.1	21.3	23.5	6.1%

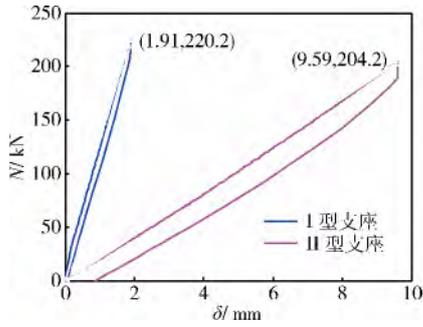


图3 典型试件的竖向压力-位移曲线
Fig. 3 Vertical load-displacement curves of specimens

2 现场基础隔振试验

为了检验厚层橡胶支座的实际隔振效果,同时分析地铁邻近建筑应用基础隔振措施提高室内舒适度的可行性及有效性,在上海市某地铁隧道的正上方修建了总高度为5.6 m的两层砌体结构足尺模型,其具体方位如图4、5所示。建筑物基础底部与地铁隧道顶端的垂直距离仅为8 m,列车型号为C型,平均运行速度约为30 km/h,地铁运行时将诱发建筑物强烈的竖向振动。

图5中的足尺模型结构按建筑抗震设计规范进行结构设计,其总质量约为52 t,现浇楼盖;墙体采用烧结多孔砖及M5混合砂浆砌筑,周边设置圈梁及构造柱;地基为上海市典型的软土地场条件,覆盖层剪切波速为125 m/s。

根据隔振支座的布置方式设计了4种试验工况,分别对应不同的竖向自振频率,如表3所示。其中工况2~4中的混凝土短柱与上部结构脱离,仅工况3采用3个I型橡胶支座支承。

模型结构的北视图、东视图及东侧的隔振支座布置照片如图6所示。

在基础顶面、首层楼面中点和二层楼面中点共布置3个测点,采用Lance LC0132LT高灵敏度压电式传感器及SVSA动态数据采集仪进行测试,采样频

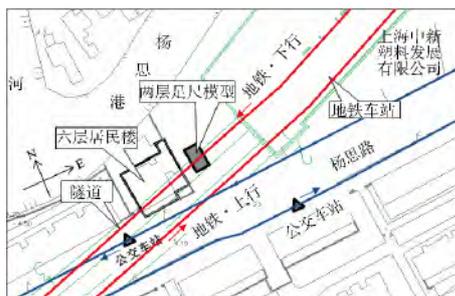


图4 两层足尺模型所处场地情况
Fig. 4 Experimental full-scale two-story model and place

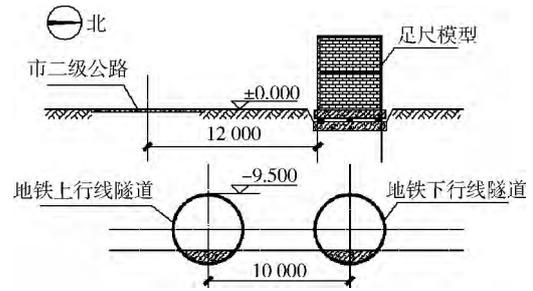


图5 两层足尺模型与地铁隧道的位置关系
Fig. 5 Locations of full-scale two-story model and tunnel

表3 试验工况及对应的竖向自振频率设计值

Table 3 Experimental cases and design vertical resonance frequencies

工况	工况描述	各工况对应的支座布置方式	竖向1阶自振频率 f/Hz
1	非隔振	6个钢筋混凝土短柱支承	37.0
2	6个I型支座		16.1
3	3个I型支座		12.5
4	6个II型支座		8.9



(a) 北视图 (b) 东视图及支座布置

图6 足尺模型的现场照片与支座布置

Fig. 6 Full-scale model and isolators' plan layout

率设置为200 Hz,涵盖了人体敏感的4~80 Hz区间。按昼间和夜间各测量不少于10趟列车运行引起的振动加速度时程。

3 隔振效应分析

从峰值加速度、Z振级及1/3倍频程分频振级分析各工况下的隔振效应。

峰值加速度能直观反映基础隔振结构的隔振效应。10趟列车经过时引起的各测点峰值加速度的平均值如表4所示。

表 4 各测点的峰值加速度平均值

Table 4 Average values of measured acceleration under conditions

测点位置	$a_{PG\ ave} / gal$			
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
基础顶面	6.6	8.3	6.1	5.0
首层楼面中点	2.7	1.2	0.7	0.5
二层楼面中点	15.1	3.2	2.4	1.2

测试结果表明,在工况 2~4 的基础测点峰值加速度相对于工况 1 变化不大的前提下,首层和二层楼面中点的峰值加速度均明显减小,且当隔振频率越低时,减小幅度越大。因此,基础隔振结构的竖向隔振效果明显。

Z 振级是根据人体对不同频率竖向振动的敏感程度,在计权时间内对加速度有效值进行加权修正后的舒适度宏观评价指标。根据建筑物的用途及所处的环境分为不同的功能区,设有不同的振级限值。

取 10 趟列车经过时各楼面测点的 Z 振级,取平均值后与 2 类振动环境功能区的限值进行对比,具体见表 5。由表 5 可见: 1) 对于首层楼面,工况 1 下 Z 振级小于规范^[12]限值约 4 dB,工况 2 较工况 1 减小了 2~3 dB,工况 3、4 较工况 1 分别减小 7 dB 和 8~9 dB; 2) 对于二层楼面,工况 1 下 Z 振级超过规范限值 7~10 dB,室内振感强烈,工况 2 较工况 1 减小了 11~14 dB,在限值以内,工况 3、4 下分别较工况 1 减小 14 dB 和 18~19 dB。

表 5 各层楼面测点的 Z 振级平均值

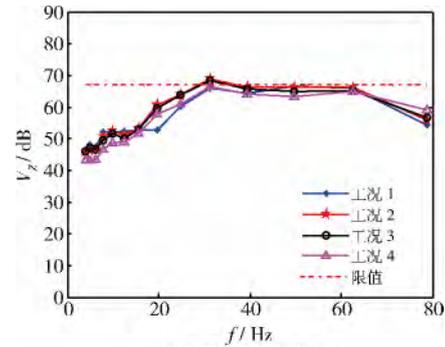
Table 5 Average values of each floorslab's Z VLs

测点位置	Z 振级	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	限值
首层	昼间 $\bar{V}_{Z,1} / dB$	66	64	59	57	70
	夜间 $\bar{V}_{Z,1} / dB$	63	60	—	55	67
二层	昼间 $V_{Z,2} / dB$	77	66	63	59	70
	夜间 $V_{Z,2} / dB$	77	63	—	58	67

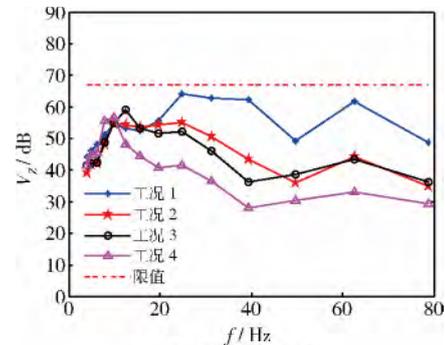
上述实测结果表明,应用厚层橡胶支座的基础隔振方案,对地铁环境振动有明显的隔振效果,且当隔振频率越低时,效果越明显。另外由表 5 可知,非隔振时首层和二层楼面的 Z 振级相差约 11~14 dB,但在应用基础隔振方案后,两者的 Z 振级数值接近,说明工况 2~4 的隔振结构竖向振动近似为整体运动。

1/3 倍频程分频振级可用于从频率区间的角度分析建筑物的室内舒适度,对应于不同的功能区也具有不同的振级限值。取昼间 10 趟列车经过时各楼面测点的 1/3 倍频程分频振级,取分频振级的平均后如图 7 所示。

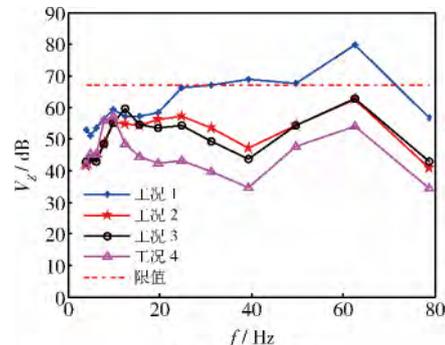
图 7a 中的测试结果表明,各工况下由地铁运行



(a) 基础顶面测点



(b) 首层楼面测点



(c) 二层楼面测点

图 7 各测点的 1/3 倍频程分频振级曲线

Fig. 7 Average values of frequency VLs

引发的基础顶面竖向振动在各频率处的振级大小接近 30~63 Hz 处的分频振级大小基本相同。说明采用基础隔振后,地铁振动输入至整体结构的竖向振动能量变化不大,因此可以按照非隔振结构在基础测点上实测的振级大小预测基础隔振的效果。

应用力锤作冲击激振测得的楼板第 1 阶竖向自振频率为 63 Hz,由图 7 可知,在基础处的输入振动近似为白噪声的前提下,各工况的振级峰值主要分布于楼板竖向自振频率处。且当隔振频率与楼板的第 1 阶竖向自振频率相距越远时,楼板的隔振效果越明显,这与结构动力学中振动传递率的理论相符^[13]。由此可知,控制整体结构的竖向隔振频率与楼板竖向第 1 阶自振频率的比例大小,是设计地铁环境振动作用下基础隔振结构的关键。

由图 7b、7c 可知,采用基础隔振后,1/3 倍频程

分频振级的极值主要分布于两处,即整体结构的第1阶竖向自振频率处和楼板的竖向自振频率处,前者极值可能会大于后者,根据Z振级与1/3倍频程分频振级的转换关系^[3]可知,基础隔振结构的舒适度将由低频振动控制。

4 建筑物安全性影响分析

随着基础隔振结构竖向自振频率的降低,地铁振动作用下结构的动力响应也将以低频成分为主,进而对建筑物的安全性产生一定影响。为了分析其影响程度,参照德国DIN 4150-2规范^[14]中的质点峰值速度值,选取竖向对模型结构的安全性进行评估。

应用Morlet小波变换原理^[3]给出工况1下某趟地铁列车经过时二层楼面测点上的竖向振动加速度时程、小波时频谱及功率谱如图8所示。由图8可知,地铁环境振动主要使建筑物表现出冲击振动特性,因此本文应用规范^[14]中“非连续振动”标准对模型结构进行评估。

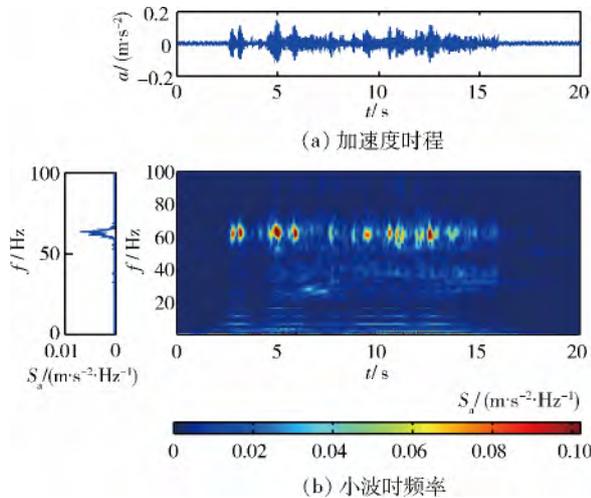


图8 二层楼面的实测竖向振动

Fig. 8 Measured vertical vibration at 2nd floor

运用频域积分方法,由基础测点的竖向振动加速度时程得到其速度时程,选取10趟列车通过时基础测点竖向峰值速度,具体见表6。

由表6可知:1)非隔振时结构的竖向振动远小于建筑的敏感安全振动限值:3~10 mm/s;2)在应用基础隔振方案后,10~50 Hz区间的竖向振动出现增大现象,1~10 Hz和50~100 Hz区间的振动则出现了减小现象。

结合图7a可知,地铁运行时基础测点以20 Hz以上的高频振动为主,当结构的竖向第1阶自振频率位于20 Hz附近时将使得该处的振动幅值增加,因此表6中隔振结构峰值速度在10~50 Hz区间出现了

表6 各工况下基础测点的竖向峰值速度

Table 6 Values of PPV of each case

f/Hz	$v_p / (mm \cdot s^{-1})$			
	工况1	工况2	工况3	工况4
1~10	0.10	0.07	0.08	0.07
10~50	0.14	0.29	0.18	0.20
50~100	0.19	0.20	0.17	0.13

增大现象。考虑到在输入能量一定的前提下,整体结构(包括基础)的振动速度与其动能有关,增加整体建筑物的质量时,峰值速度也将随之降低,因此可以预见地铁环境振动不会对现代建筑结构的安全性构成明显影响。

5 结论

1) 厚层橡胶支座的竖向刚度实测值与理论值的最大误差均不超过10%,每组橡胶支座竖向刚度平均值误差控制在7%以内,支座的构造设计是可行的。

2) 基础隔振措施可使各层楼板的Z振级最大减小约19 dB,隔振频率越低时,室内舒适度的提高效果越明显。

3) 可按非隔振结构在基础部位实测的分频振级预测基础隔振效果。合理控制隔振频率与楼板的竖向第1阶自振频率之间的比例关系,是设计基础隔振结构的关键。

4) 基础隔振措施虽能明显减小楼板的竖向高频振动,但也同时放大了整体结构的竖向低频振动,舒适度由低频振动控制。

5) 基础隔振措施使部分频率区间的峰值速度出现一定增大现象,但地铁振动对现代结构的安全性不会构成明显影响。

参考文献

- [1] 夏禾. 交通环境振动工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-5. (XIA He. Traffic induced environmental vibrations and control [M]. Beijing: Science Press, 2010: 1-5. (in Chinese))
- [2] Eitzenberger Andreas. Train-induced vibrations in tunnels: a review [R]. Luleå: Division of Mining and Geotechnical Engineering, Luleå University of Technology, 2008: 1-2.
- [3] 盛涛. 城市交通环境振动实测及减振隔振方法研究 [D]. 上海: 同济大学, 2013. (SHENG Tao. In-situ measurements of environmental vibration caused by urban transit and measure study on vibration isolation and reduction [D]. Shanghai: Tongji University, 2013. (in Chinese))
- [4] Vogiatzis Konstantinos. Environmental ground borne noise and vibration protection of sensitive cultural

- receptors along the Athens Metro Extension to Piraeus [J]. *Science of Total Environment*, 2012, 439(11): 230-237.
- [5] 罗锴, 雷晓燕, 刘庆杰. 地屏障在铁路环境振动治理工程中的应用研究 [J]. *铁道工程学报*, 2009, 26(1): 1-6. (LUO Kun, LEI Xiaoyan, LIU Qingjie. Research on the application of ground barrier in reducing the vibration along high-speed railway [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2009, 26(1): 1-6. (in Chinese))
- [6] Fiala P, Degrande G, Augusztinovicz F. Numerical modelling of ground-borne noise and vibration in buildings due to surface rail traffic [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 301(3): 718-738.
- [7] 何文福, 刘文光, 杨彦飞, 等. 厚层橡胶隔震支座基本力学性能试验 [J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 12(3): 258-263. (HE Wenfu, LIU Wenguang, YANG Yanfei, et al. The basic mechanical properties of thick rubber isolators [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 12(3): 258-263. (in Chinese))
- [8] Talbot J P, Hunt H E M. Isolation of buildings from rail-tunnel vibration: a review [J]. *Building Acoustics*, 2003, 10(3): 177-192.
- [9] Sanayei Masoud, Maurya Pradeep, Moore J A. Measurement of building foundation and ground-borne vibrations due to surface trains and subways [J]. *Engineering Structures*, 2013, 53(8): 102-111.
- [10] Heckl M, Hauck G, Wettschreck R. Structure-borne sound and vibration from rail traffic [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, 193(1): 175-184.
- [11] 日本建筑学会. 隔震结构设计 [M]. 刘文光, 译. 北京: 地震出版社, 2006: 31-34.
- [12] GB 10070—1988 城市区域环境振动标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1989. (GB 10070—1988 Standard of environmental vibration in urban area [S]. Beijing: China Standards Press, 1989. (in Chinese))
- [13] Chopra A K. Dynamics of structures: theory and applications in earthquake engineering [M]. New Jersey: Prentice Hall/Pearson Education Press, 2011: 90-91.
- [14] DIN 4150-2 Vibrations in buildings: part 2: effects on persons in buildings [S]. Berlin: Beuth Verlag, 1976.