

地铁振动下基础隔振效应的实测与分析

楼梦麟¹, 贾宝印¹, 陆秀丽², 俞洁勤¹

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 对地铁附近的装有隔振支座的建筑物进行振动实测, 获得了在地铁振动下基础和地下室地面的振动加速度时程记录. 先在时域内, 分析隔振后加速时程的变化, 得到隔振的大致效果, 然后计算出相应的傅立叶谱和 1/3 倍频程谱, 可以得到隔振后振动在各个频段上的变化. 在此基础上讨论隔振装置对地铁的振动传播的影响. 结果表明: 地铁运行引起的主要振动分量在 45~75 Hz, 隔振装置对地铁振动水平分量的隔振效果显著, 而对垂直分量有放大作用.

关键词: 地铁振动; 现场实测; 振动加速度时程; 傅里立谱; 振级

中图分类号: TU 211.3

文献标识码: A

Base Isolation Building Response to Subway-induced Vibration and Its Analysis

LOU Menglin¹, JIA Baoyin¹, LU Xiuli², YU Jieqin¹

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China; 2. The Architectural Design and Research Institute of Tongji University Group Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Vibration was measured on the buildings with the installed isolation bearings in the vicinity of subway, the records of time-history vibration at foundation and basement were obtained. In the time domain, the changes of acceleration time-history were analyzed after isolation, the general effect of isolation was obtained. After calculating the corresponding Fourier spectrum and one third octave band frequency spectrum, the changes of vibration were obtained in various frequency bands after the isolation. Then the effect of base isolation on the transmission of subway-induced vibration was discussed. Results show that the main components of subway-induced vibration are in the frequency domain from 45 to 75 Hz. The isolation effects of isolation device are notable in horizontal direction of subway-induced vibration, but things

are different in the vertical direction.

Key words: subway-induced vibration; site measurement; time history of vibration acceleration; Fourier spectrum; vibration level

随着城市的不断扩大和现代工业的快速发展, 城市的交通压力也越来越大, 地铁作为一种现代化城市的交通工具的优势也日益明显, 以其具有的不占用地面空间、运量大、速度快、准时等优点已经成为了解决城市交通拥挤的一种重要工具. 与此同时, 人们生活水平的提高、精密仪器的广泛使用, 地铁运行时穿越建筑密集区域所引起环境振动问题也越来越突出, 成为了破坏环境的公害之一^[1-3]. 因此, 研究地铁引起环境的振动及其隔振问题具有重要的理论意义和工程应用价值.

基础隔振是减少地面振动传入上部结构的有效措施之一, 在工程结构减振控制中得到较为广泛的应用^[4]. 隔振技术在减少地铁振动影响方面已在工程中加以实施. 本文通过对某一实际工程中的地铁沿线装有隔振支座的结构进行实测和分析, 了解隔振效果.

1 地铁引起环境振动实测和分析

此次测试的是在上海某地铁沿线附近的建筑物地下室内进行的, 为了减少地铁运行对建筑结构的声乐使用影响, 在结构基础设置了橡胶隔振支座. 该建筑为 6 层基础良好的框架结构(有错层), 其中地下两层, 基础地板厚 0.6 m, 地下室外墙厚 0.4 m, 地下室顶层楼板厚 0.18 m, 其余各层及屋顶楼板厚度

收稿日期: 2010-08-29

基金项目: 上海市科委基础研究重点资助项目(07Jc14051)

第一作者: 楼梦麟(1947—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为结构抗震防灾、土-结构动力分析及环境振动与防治.

E-mail: lml@tongji.edu.cn

均为 0.12 m;地铁埋深为 10 m,其上覆土从下往上依次为淤泥质粉质黏土、粉质黏土、填土;隧道结构型式为圆形双洞隧道结构,半径为 2.75 m,管片厚度为 0.35 m,两隧道距离为 11 m.

1.1 测点布置和测试仪器

测点的布置主要基于 3 个方面的考虑^[5]:①对地铁振动敏感建筑物的位置;②尽量选择周边地面交通影响小的场所;③现场的布线及布点的条件.本次测试是选择在地铁沿线附近装有隔振支座的一座建筑物上进行的,测试仪器采用的是两台 Altus 系列强振动加速仪(工作频率为 250 Hz),该套仪器可以同步测量 2 个拾振点 3 个方向共计 6 条加速度时程.一个测点布置在地下室结构基础上(隔振前),另一个测点布置在地下室地面上(隔振后),可以采集到隔振前后的 L (顺轨道水平向)、 T (横轨道水平向)、 V (垂向)三个方向的加速度时程.测点布置的位置如图 1 所示.

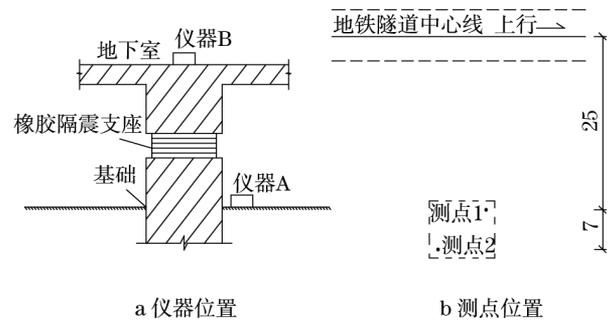


图 1 测点及仪器位置的示意图(单位:m)

Fig. 1 Layout of measuring points and instrument position(unit:m)

1.2 振动实测结果

本次现场监测前后共进行 24 次测试,包括地铁上行通过 12 次,下行通过 12 次.由于实测加速度数据很多,文中只列出部分测试数据的图形,图 2 和图 3 分别为地铁上行和下行时两个测点的加速度三分量时程. A_1 、 B_1 表示仪器 A、B 在测点 1 所测得的数据; A_2 、 B_2 表示仪器 A、B 在测点 2 所测得的数据,以下同.

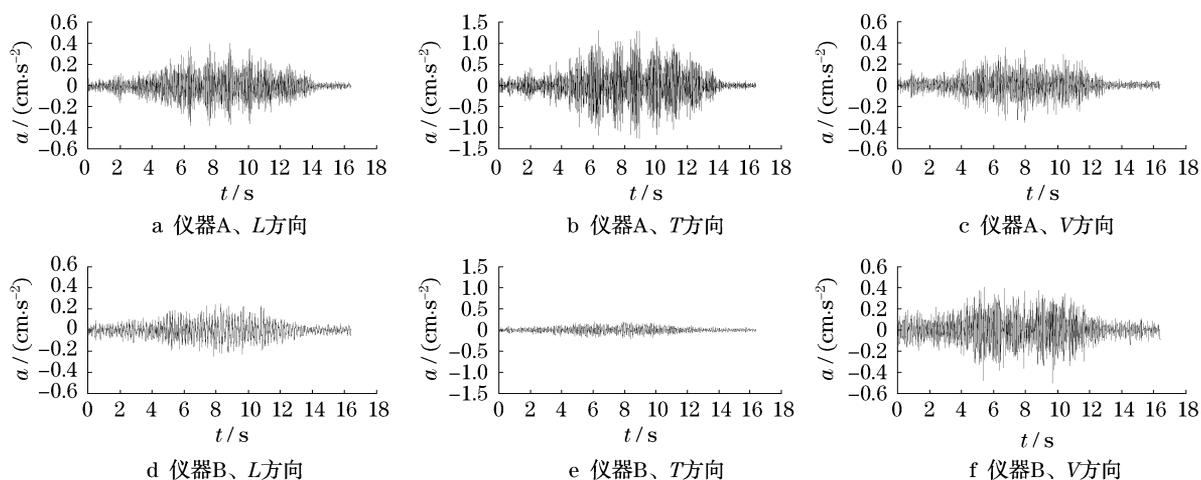


图 2 上行时实测加速度时程(测点 1)

Fig. 2 Time history of acceleration during the passage of the up train (point 1)

分别比较两个测点的加速度时程图,在两个水平方向上,仪器 B 的振动峰值明显小于仪器 A 的,即经隔振后,其加速度得到很大的降低;而在竖向振动加速度分量在隔振后,不仅没有降低,反而增大.

表 1 分别列出了仪器 A、B 在地铁上行和下行时三个方向不同测次的振动峰值加速度以及峰值隔振率 η . 峰值隔振率 η 为隔振后的加速度峰值与隔振前的加速度峰值的比. 其值小于 1 表示具有隔振效果,数值越小效果越好;其值大于 1 表示不仅没有起到隔振效果,反而有放大的作用,数值越大,放大效应越强.

由表 1~表 4 可知:对测点 1 的水平方向的振动加速度而言,不论是上行还是下行, L 方向和 T 方向的振动加速度有较大的差异: T 方向的峰值大于 L 方向,约为 2~3 倍,经过隔振之后,两个方向的峰值都得到有效的降低,其中 T 方向的峰值降低的幅值尤为明显,其峰值隔振率约为 L 方向的 1/3,而两个方向隔振后的峰值近似相等,标准差在隔振前 L 方向明显小于 T 方向,隔振之后, L 方向大于 T 方向,说明 L 方向的值离散程度要大于 T 方向, T 方向的隔振效应更稳定. 经过隔振之后,垂向峰值加速度变大,隔振支座不仅没有对垂向振动起到降低的作用,

反而使其放大,隔振率大都在 100% 以上;对测点 2 的水平振动加速度而言,无论上行还是下行,在隔振前, L 方向和 T 方向的值近似相等, L 方向的值略大一些,经过隔振之后,两个方向的峰值得到有效的降

低, L 方向的隔振效果优于 T 方向,从隔振前后及隔振率的标注差的变化来看, T 方向的隔振性能更稳定,这和测点 1 的所得结论一致.然而,隔振支座在垂向上不但无隔振作用,而且峰值加速度反而增大.

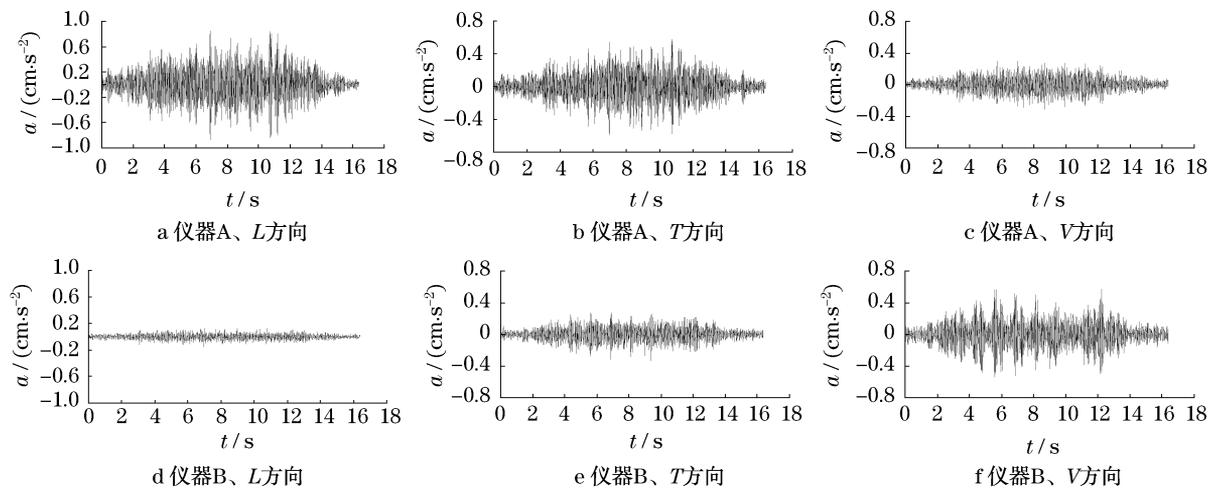


图 3 下行时实测加速度时程(测点 2)

Fig. 3 Time history of acceleration during the passage of the down train (point 2)

表 1 上行时位于测点 1 峰值加速度及峰值隔振率

Tab.1 Peak acceleration and isolation rate at point 1 induced by the up train

测次	仪器 A 峰值加速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)			仪器 B 峰值加速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)			峰值隔振率 $\eta/\%$		
	L 方向	T 方向	V 方向	L 方向	T 方向	V 方向	L 方向	T 方向	V 方向
1	0.397	1.302	0.498	0.250	0.205	0.501	62.8	15.7	100.7
2	0.376	0.946	0.422	0.186	0.195	0.432	49.5	20.6	102.3
3	0.591	1.628	0.406	0.255	0.210	0.346	43.1	13.0	85.2
4	0.239	0.682	0.210	0.136	0.121	0.286	56.8	17.8	136.5
5	0.506	1.154	0.366	0.241	0.201	0.459	47.7	17.4	125.3
6	0.458	1.281	0.560	0.232	0.170	0.412	50.8	13.2	73.5
7	0.259	0.684	0.373	0.187	0.224	0.572	72.3	32.7	153.2
平均值	0.404	1.097	0.405	0.212	0.189	0.430	54.7	18.6	111.0
标准差	0.118	0.322	0.102	0.041	0.032	0.088	9.3	6.3	26.4

表 2 上行时位于测点 2 峰值加速度及峰值隔振率

Tab.2 Peak acceleration and isolation rate at point 2 induced by the up train

测次	仪器 A 峰值加速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)			仪器 B 峰值加速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)			峰值隔振率 $\eta/\%$		
	L 方向	T 方向	V 方向	L 方向	T 方向	V 方向	L 方向	T 方向	V 方向
8	0.870	0.729	0.333	0.185	0.373	0.756	21.3	51.1	227.2
9	0.956	0.616	0.278	0.292	0.335	0.744	30.5	54.3	267.3
10	0.787	0.729	0.464	0.509	0.435	1.502	64.6	59.7	323.6
11	0.938	0.644	0.282	0.265	0.347	1.048	28.2	53.9	371.8
12	0.924	0.704	0.403	0.284	0.252	0.528	30.8	35.8	131.2
平均值	0.895	0.684	0.352	0.307	0.348	0.916	35.1	60.0	264.2
标准差	0.061	0.046	0.072	0.108	0.059	0.337	15.2	8.1	82.7

表 3 下行时位于测点 1 峰值加速度及峰值隔振率

Tab.3 Peak acceleration and isolation rate at point 1 induced by the down train

测次	仪器 A 峰值加速度/(cm·s ⁻²)			仪器 B 峰值加速度/(cm·s ⁻²)			峰值隔振率 η/%		
	L 方向	T 方向	V 方向	L 方向	T 方向	V 方向	L 方向	T 方向	V 方向
1	0.317	1.125	0.440	0.229	0.248	0.462	72.3	22.1	104.9
2	0.274	0.892	0.380	0.213	0.221	0.335	77.9	24.8	88.0
3	0.172	0.584	0.213	0.120	0.156	0.502	69.5	26.7	235.6
4	0.239	0.910	0.281	0.136	0.186	0.574	56.9	20.4	204.5
5	0.236	1.010	0.229	0.153	0.141	0.308	65.0	13.9	134.4
6	0.347	1.106	0.260	0.182	0.214	0.566	52.4	19.3	217.6
平均值	0.264	0.938	0.301	0.172	0.194	0.458	65.7	21.2	164.2
标准差	0.057	0.181	0.082	0.040	0.037	0.104	8.8	4.1	57.4

表 4 下行时位于测点 2 峰值加速度及峰值隔振率

Tab.4 Peak acceleration and isolation rate at point 2 induced by the down train

测次	仪器 A 峰值加速度/(cm·s ⁻²)			仪器 B 峰值加速度/(cm·s ⁻²)			峰值隔振率 η/%		
	L 方向	T 方向	V 方向	L 方向	T 方向	V 方向	L 方向	T 方向	V 方向
7	0.870	0.594	0.315	0.150	0.328	0.570	17.3	55.2	181.0
8	0.938	0.639	0.339	0.470	0.347	0.924	50.1	54.4	272.6
9	0.518	0.344	0.205	0.123	0.214	0.337	23.8	62.3	164.6
10	0.848	0.643	0.345	0.363	0.375	0.747	42.9	58.2	216.5
11	0.620	0.537	0.306	0.205	0.362	0.498	33.0	67.5	162.4
12	0.788	0.540	0.306	0.165	0.279	0.577	21.0	51.7	188.4
平均值	0.764	0.550	0.303	0.246	0.318	0.609	31.4	58.2	197.6
标准差	0.147	0.101	0.046	0.127	0.055	0.186	11.9	5.3	38.0

1.3 实测结果的频谱分析

利用快速傅里叶变换可得到各个测点的地铁振动的 3 个方向的加速度时程的傅里叶幅值谱. 图 4

和图 5 为图 2 和图 3 的实测加速度时程数据所对应的傅立叶幅值谱,反映了隔振前后加速度时程中各频率分量的变化情况.

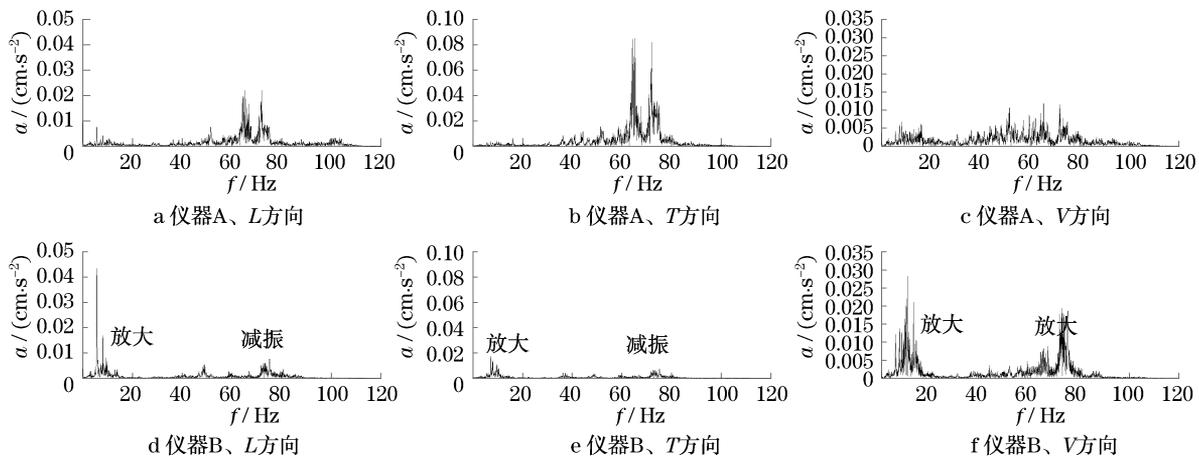


图 4 上行实测加速度傅里叶谱(测点 1)

Fig.4 Fourier spectrum of the acceleration during the passage of the up train (point 1)

由图 4 和图 5 可知,不论是在测点 1、2 还是上、下行,在两个水平方向上,未隔振之前,振动的频率在 100 Hz 以下,主要频率成分集中在 45~75 Hz 的

范围内,经过隔振之后,45~75 Hz 的范围内的主要振动分量显著减少,测点 1 在高频段上的振动分量减少程度强于测点 2, T 向尤为明显,但在 10 Hz

邻近范围内的振动分量且有较大程度的放大,但这一放大效应要小于高频分量的减少效应,因此总体上 L 、 T 方向的加速度时程中的峰值加速度是减少的;而在 V 方向上,隔振前竖向加速度的频率分布较为广泛,经过隔振之后,10 Hz 和 60 Hz 邻近频率

范围的振动分量不仅没有减弱,反而得到增大,这与隔振支座的性质有关.其他组测试所得到的数据进行快速傅里叶变换之后得到的幅值谱的分布大多有类似情况,不再列举.

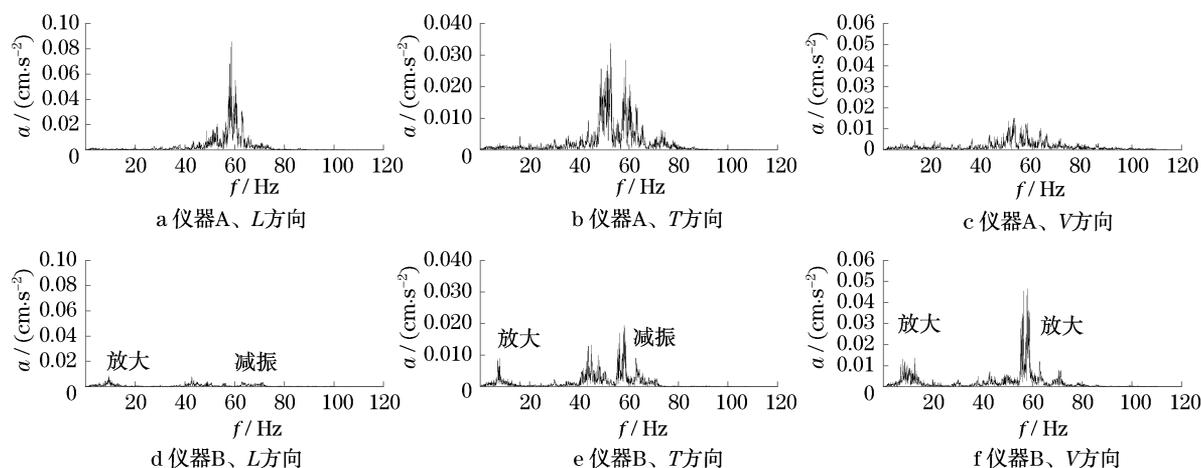


图 5 下行实测的加速度傅立叶谱(测点 2)

Fig. 5 Fourier spectrum of the acceleration during the passage of the down train (point 2)

2 振动振级

2.1 振动振级的计算方法

根据我国颁布的《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》^[6],加速度振级的定义为

$$L_a = 20 \lg \left[\frac{a_e}{a_0} \right] \quad (1)$$

式中: L_a 为振动加速度级, dB; a_e 为振动加速度有效值, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; a_0 为基准加速度值, $a_0 = 10^{-6} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$. 在评价地铁振动对环境的影响,常常将振动加速度级转化为振级.其定义为

$$VL_z = 10 \lg \left[\sum_{i=1}^{20} 10^{(L_{a,i} - W_i) / 10} \right] \quad (2)$$

式中: $L_{a,i}$ 为第 i 个中心频率上所测得的振动加速度级, dB; W_i 为该频率上的计权因子.

2.2 实测结果振级分析

2.2.1 单个典型测次 1/3 倍频程振级分析

利用 1/3 倍频程知识可以计算出仪器 A、B 在测点 1、2 的三个方向的振级,将在同一个测点同一个方向上的两台仪器测得的数据的振级曲线画在同一个图中进行比较.图 6 为地铁上行时两个测点 L 、 T 、 V 三个方向的振级比较图,图 7 为地铁下行时两个测点 L 、 T 、 V 三个方向的振级比较图,共列出 4 个测次的振级分布.

2.2.2 多个测次 1/3 倍频程平均振级分析

将仪器 A、B 在测点 1、2 所得到的全部数据进行 1/3 倍频程计算得到振级,再把测点 1、2 的振级分别按照上行和下行分别进行平均,最后得到 1/3 倍频程平均振级.如图 8 和图 9 所示.

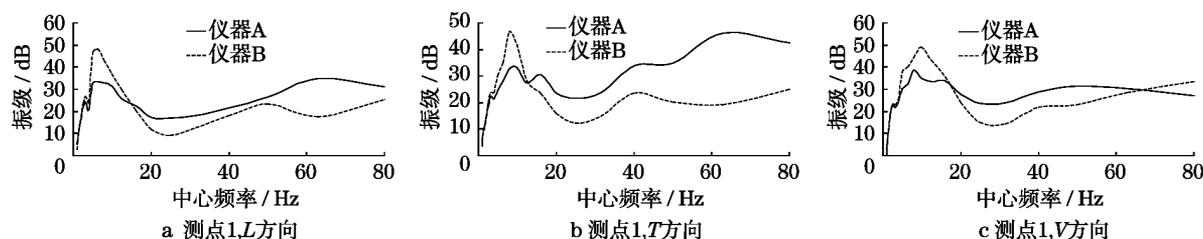


图 6 上行时三个方向 1/3 倍频程振级比较

Fig. 6 The one-third octave average acceleration level in three directions induced by the up train

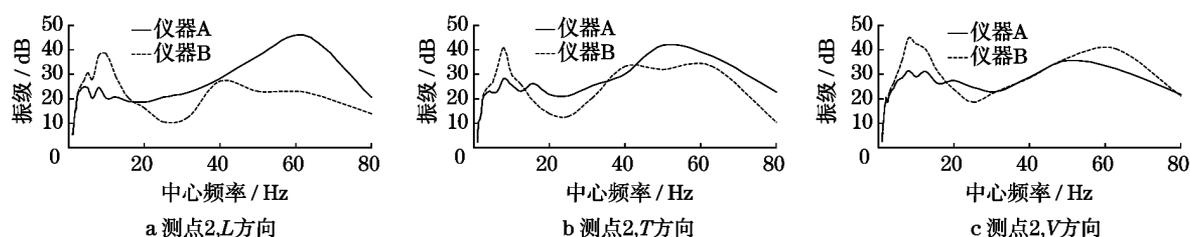


图 7 下行时三个方向 1/3 倍频程振级比较

Fig. 7 The one-third-octave average acceleration level in three directions induced by the down train

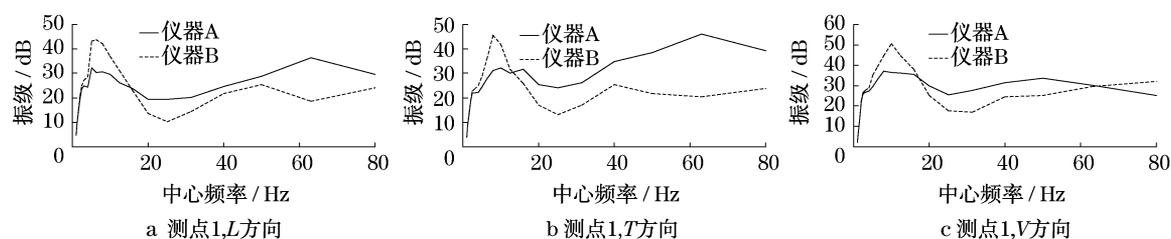


图 8 上行时三个方向 1/3 倍频程平均振级比较

Fig. 8 The one-third-octave average acceleration level in three directions induced by the up train

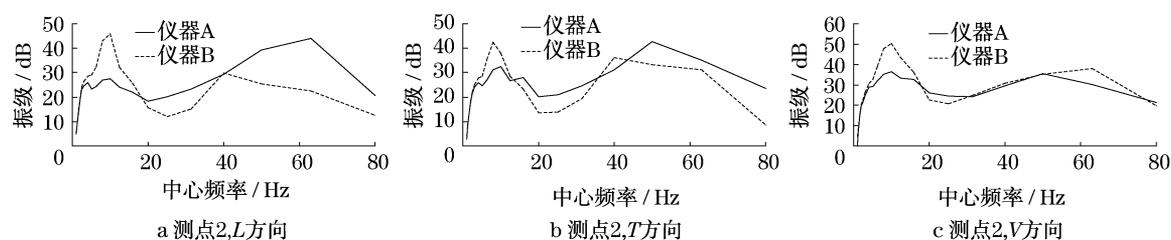


图 9 下行时三个方向 1/3 倍频程平均振级比较

Fig. 9 The one-third-octave average acceleration level in three directions induced by the down train

对多测次 1/3 倍频程平均振级进行分析: L 方向上,在 20~80 Hz 的中心频率范围内都可起到隔振的作用,在中心频率是 63 Hz 尤为显著,说明在高频段中心频率的隔振作用是有效果的,但在中心频率为 5~15 Hz 的范围内,隔震支座未起到隔振作用,反而将振动加速度级放大了;在 T 方向上,同样对高频中心频率的振动隔振作用是很明显的,但对低频(5~15 Hz)振动反而放大了,这与 L 向是一致的,在这两个方向(水平方向)上,位于测点 1 的隔振支座的隔振效果是优于测点 2 的, T 向表现得更为明显;在 V 方向上,经隔振之后,不仅 5~15 Hz 范围内低频振动加速度级得到放大,而且高频上隔振效果甚微.而分析单个典型 1/3 倍频程振级的结论基本上与对多测次 1/3 倍频程平均振级分析结论是一致的.

地铁运行引起的房屋振动主要为高频振动^[7],而高频范围内,隔震支座在 T 、 L 方向上的隔振效果是显著的,因此隔振支座可以对地铁运行引起的水

平振动起到了隔振减振作用,但是放大了 5~15 Hz 频段的振级.

3 基础隔振分析

在大多数情况下,基础隔震体系可视为单质点体系进行分析,由此可以得到在地铁振动下的结构体系加速度隔振率 R_a ^[8],即隔振结构加速度反应 \ddot{x}_s 与地面输入加速度 \ddot{x}_g 之比:

$$R_a = \frac{\ddot{x}_s}{\ddot{x}_g} = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta\omega/\omega_0)^2}{[1 - (\omega/\omega_0)^2]^2 + (2\zeta\omega/\omega_0)^2}} \quad (3)$$

式中: ω/ω_0 为迫振频率与结构基频之比; ζ 为阻尼比.可以看出,加速度的隔振率不仅与阻尼比有关,更与频率比有关.当阻尼比一定的时候,隔振率只与频比有关,当 $\omega/\omega_0 = \sqrt{2}$ 时,隔振率 $R_a = 1$,表示为既不衰减,也不放大;当 $\omega/\omega_0 > \sqrt{2}$ 时,隔震率 $R_a < 1$,表示起到隔振作用,越小起到的隔振作用越明显;

$\omega/\omega_0 < \sqrt{2}$ 时, 隔振率 $R_a > 1$, 表示振动放大, $\omega/\omega_0 = 1$, 会发生共振. R_a 与 ω/ω_0 的关系见图 10.

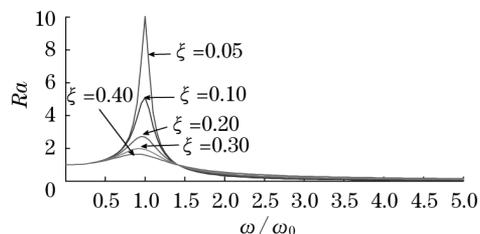


图 10 隔振结构 R_a 与 ω/ω_0 的关系曲线
Fig. 10 The relationship between R_a and ω/ω_0 of the vibration isolation structure

本次测试的建筑结构的水平向的自振频率范围约为 4~5 Hz, 而地铁水平向的主要频率在 45~75 Hz 范围内, $\omega/\omega_0 \gg \sqrt{2}$, 由图 10 可知, $R_a \ll 1$, 因此橡胶隔振支座在水平方向对地铁振动起到隔振作用; 由于没有测试到建筑物的竖向的自振频率, 查阅相关文献: 经对几种常用的夹层橡胶垫的力学性能进行计算, 其竖向固有周期为 $T_{vs} = 0.05 \sim 0.08$ s^[8], 即固有频率为 $\omega_{vs} = 78.5 \sim 125.6$ Hz, 而垂向地铁振动的频率主要在 40~80 Hz, 略小于上部结构自振频率, 故 $\omega/\omega_0 < 1$, $R_a > 1$, 处于图 10 中放大区, 不能起到隔振作用, 这与“一般夹层橡胶垫隔震结构, 对竖向地震作用甚微, 但不影响结构的安全; 若用于竖向隔振(环境振动等), 则要对夹层橡胶垫的设计提出特殊设计要求^[9]”的结论是一致的. 所以隔振支座对地铁水平方向的振动起到了隔振作用, 而对垂向的振动反而有放大的作用.

4 结论

(1) 利用量测到的由地铁运行引起的装有隔振支座的房屋的振动加速度时程进行分析, 表明在两个水平方向加速度上隔振效果是显著的, 在测点 1, T 向加速度的隔振效果优于 L 向加速度, 在测点 2, L 向优于 T 向, 总的来说, T 向的隔振性能更稳定; 而在 V 向加速度上基本上没有起到隔振作用, 反而存在放大效应.

(2) 两水平方向加速度在未隔振之前, 振动的主要频率集中分布在在 45~75 Hz 的频段上, 测点 1 高能频段的分布频率大于测点 2, 经过隔振后, 该频段上的幅值降低很大, 测点 1 的 T 向更为显著. 但是在 20 Hz 以下(约在 10 Hz 左右)低频段上的幅值却有所放大, 只是低频段上的放大效应要比高频段上

的减小效应要低的多; V 向加速度的在未隔振之前各个频段的幅值都比较小, 而隔振之后却有所放大, 在 10 和 60 Hz 左右表现的最为突出, 这是与隔振支座的性质有关.

(3) 从 1/3 倍频程加速度振级来讲, 两水平方向加速度在 20~80 Hz 的中心频率范围内都起到有效的隔振作用, 在 63 Hz 的中心频率上的隔振效果最好, 而在较低的中心频率段上, 加速度振级却增大了; V 向加速度在隔振后, 其隔振效果并不明显, 在较低的中心频率段上也与 L 、 T 向相似, 有所放大.

(4) 上述结果表明: 地铁振动的垂向隔振技术值得深入研究.

参考文献:

- [1] Lai C G, Callerio A, Faccioli E, et al. Prediction of railway-induced ground vibrations in tunnels[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2005(127):503.
- [2] Balendra T, Chua H, Lo K W, et al. Steady-state vibration of subway-soil-building system [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1989, 115(1):145.
- [3] Kurzweil L G. Ground-borne noise and vibration from underground rail systems[J]. Journal and Vibration, 1979, 66(3):363.
- [4] 唐家祥, 刘再华. 建筑结构基础隔震[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993. 495 - 503.
TANG Jiaxiang, LIU Zaihua. Base isolation of building structure [M]. Wuhan: Huazhong University of Technology Press, 1993. 495 - 503.
- [5] 楼梦麟, 贾旭鹏, 俞洁勤. 地铁运行引起地面的振动的实测及传播规律[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(3):282.
LOU Menglin, JIA Xupeng, YU Jieqin. Field measurement and analysis of ground vibration induced by subway trains [J]. Journal Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(3):282.
- [6] 中国建筑科学研究院. GB/T50355—2005 住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
China Academy of Building Research. GB/T50355—2005 Standard of limit and measurement method of vibration in the room of residential buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [7] 楼梦麟, 李守继. 地铁引起建筑物振动评价研究[J]. 振动与冲击, 2006, 26(8):68.
LOU Menglin, LI Shouji. Evaluation of buildings' vibration induced by underground trains [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 26(8):68.
- [8] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997.
ZHOU Fulin. Engineering structure vibration control [M]. Beijing: Seismological Press, 1997.