文章编号:1005-0523(2017)01-0033-07

预制短板浮置板轨道减振特性研究

邹 彦[1],刘 扬[2],马晓云[1],练松良[1]

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804;2. 上海轨道交通技术研究中心,上海 201103)

摘要:浮置板轨道结构具有良好的减振性能和效果,并在城市轨道交通中得到广泛使用。通过现场实测,采集预制短板浮置板和长枕埋入式轨道上各测点振动加速度数据,分析预制短板浮置板的动态特性并对比了减振特性。研究结果显示,隧道内,预制短板浮置板轨道的隔振效果在100 Hz以上区间大于20 dB;地面上,预制短板浮置板轨道在25 Hz频段以上有较好的隔振效果,最大可达25 dB,说明预制短板浮置板具有良好的减振降噪效果。

关键词:城市轨道交通;浮置板;振动加速度;减振特性

中图分类号:U213 文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.01.006

浮置板轨道是将具有一定质量和刚度的混凝土道床板浮置在钢弹簧(或橡胶)隔振器上,构成质量-弹性体隔振系统,利用整个道床在弹性体上进行惯性运动来隔离和衰减列车运行产生的振动。常用的浮置板轨道结构大体上分为橡胶支承式、钢弹簧支承式和纵向浮置板轨道三种[1]。

常规浮置板轨道结构一般采用现场浇注的施工方式,施工进度缓慢。而预制短板浮置板轨道是在预制件厂生产一定结构型式的标准短板(长度为3.6 m或4.8 m),然后通过轨道车和龙门吊车运送到现场进行铺设,并在两个方向进行限位的一种浮置板形式[2]。采用预制短板浮置板轨道结构,可以加快施工进度,解决困扰施工工期的瓶颈问题。

本文通过对现场实测数据,对预制短板浮置板轨道动态特性进行了分析,并对普通长枕埋入式轨道、预制短板浮置板轨道的减振特性进行了对比。

1 动态特性测试

1.1 测试内容

预制短板浮置板板长3.6 m,有6个钢弹簧,弹簧刚度为6.7 kN/mm,板间有2个剪力铰。为了分析其动态特性,选择在地铁线路隧道施工现场进行测试,先在浮置板上激励力的作用位置,用膨胀螺钉固定一铁件。铁件上安装有力传感器,通过力传感器,用两端带螺纹的连接杆将浮置板与电磁激振器联结,便可使激振器的输出力作用于浮置板,推动浮置板产生振动,如图1所示。

然后在浮置板上布置4个加速度传感器,并在浮置板两端的道床上各安装1个加速度传感器,分别用于测试预制短板浮置板的振动响应和浮置板传递至道床的振动。传感器布置见图2所示。

试验开始后,利用电磁激振器输出幅值为1 000 N(频率3~60 Hz)的周期激振动力,使浮置板产生受迫振动,并在数据采集系统中记录并储存浮置板和道床各测点的振动响应加速度。

收稿日期:2016-08-15
基金项目:上海市科委研究项目(14231201002)
作者简介:邹彦(1989—),男,硕士研究生,研究方向为轨道结构动力分析。
通讯作者:练松良(1956—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为轨道结构振动。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



图1 现场试验的轨道激振
Fig.1 Field test of track vibration excitation

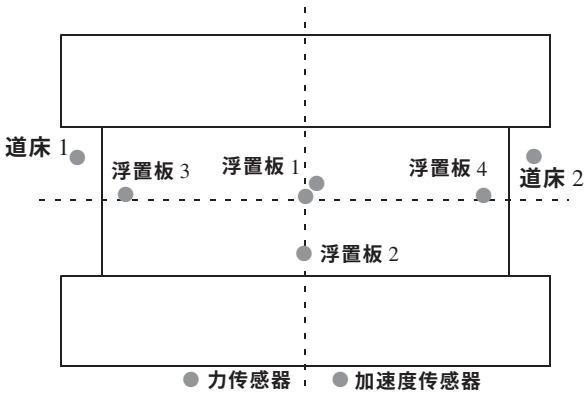


图2 浮置板上传感器布置图
Fig.2 Layout of sensor on floating slab

1.2 测试结果及分析

测试中共记录了10组数据,每组记录数据为10 s以上,其中一个样本的波形图如图3所示。

对测试数据进行处理,得到浮置板和道床的加速度导纳、浮置板的动柔度以及浮置板、道床与激振力之间的相干函数,用以分析浮置板系统的振动特性和隔振性能[3]。图3为其中一组激励和响应信号比较大的测试信号的数据处理结果。

从浮置板的动柔度频率特性曲线图中可知,系统的谐振频率约为11 Hz,隔振器的阻尼比约在0.16左右[4];比较浮置板和道床两者的加速度导纳图可知,在高于谐振频率的频段,浮置板加速度远高于道床加速度,约为后者的50~60倍,显示了浮置板轨道的隔振作用,在5 Hz附近,浮置板加速度约为道床加速度的10倍,反映了浮置板轨道在低于谐振频率的频段隔振效果比较差;由相关函数图可知,浮置板振动响应与激励力之间的相干函数在大部分频率点接近于1,说明浮置板振动的测试结果相当可靠,而道床振动响应与激励力之间的相干函数只在大于约12 Hz以上才达到0.8左右,说明道床在10 Hz以下的振动响应只有一部分是由于激励力而引起的,其余部分是在激振动力作用下产生的其他频率环境振动。

2 隧道内振动测试

2.1 测试内容

为测试预制短板浮置板轨道结构的减振特性,在地铁线路隧道内进行实车运行测试,分别在线路采用普通长枕埋入式轨道结构和预制短板浮置板轨道结构区段内各布置一测试断面进行对比。

测试列车为上海地铁10号线车辆,为A型车6节车辆编组,轴重16 t,设计时速80 km/h,在测试区段连续往返运行,列车往返总共经过长枕埋入式和预制短板浮置板轨道结构区段测试断面25次,平均通过速度为50多公里/小时到60多公里/小时。在列车经过测试断面的20 s左右的时间,用数据采集系统采集测试断面各测点振动加速度。测点分别有两轨的垂向和横向振动加速度,轨下位置和线路中心处浮置板振动加速度,浮置板下道床振动加速度及隧道壁横向和垂向振动加速度[5]。

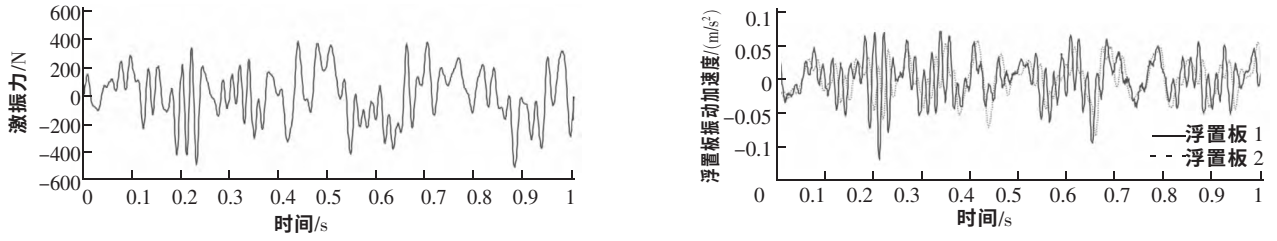
2.2 测试结果及分析

得到测试数据后,先对其时间长度进行截取,以时速62.5 km/h通过长枕埋入式轨道的测试结果和时速62.9 km/h通过预制短板浮置板轨道的测试结果为例,钢轨、浮置板和道床的振动加速度波形分别如图4~图5所示[6]。

从图5中可以看出,长枕埋入式轨道钢轨垂向振动加速度振幅约为12~20 g,明显比预制短板浮置板轨道约为20~30 g的测试结果小;其横向振动加速度振幅约为5~7 g,也明显小于预制短板浮置板轨道约为10~20 g的测试结果,并且钢轨横向振动明显小于垂向振动。

而从图6~图8的比较中可以看出,长枕埋入式轨道道床的垂向振动加速度振幅可达0.15 g左右,远

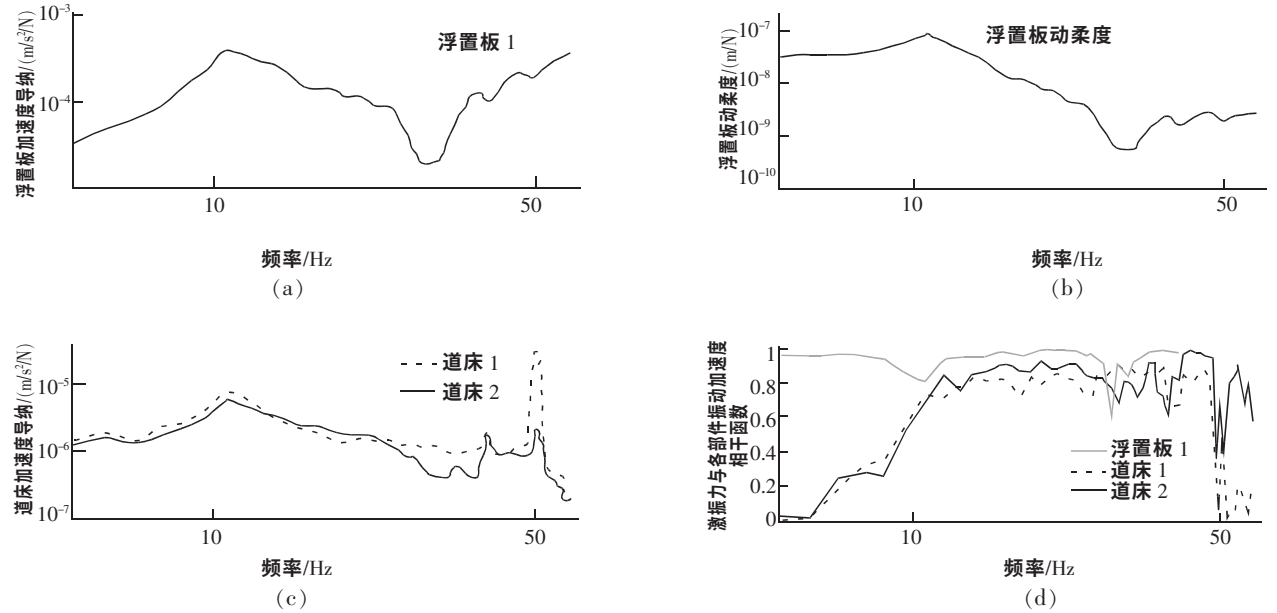
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)　(b)

图 3　激励力及浮置板测点 1、2 的加速度信号

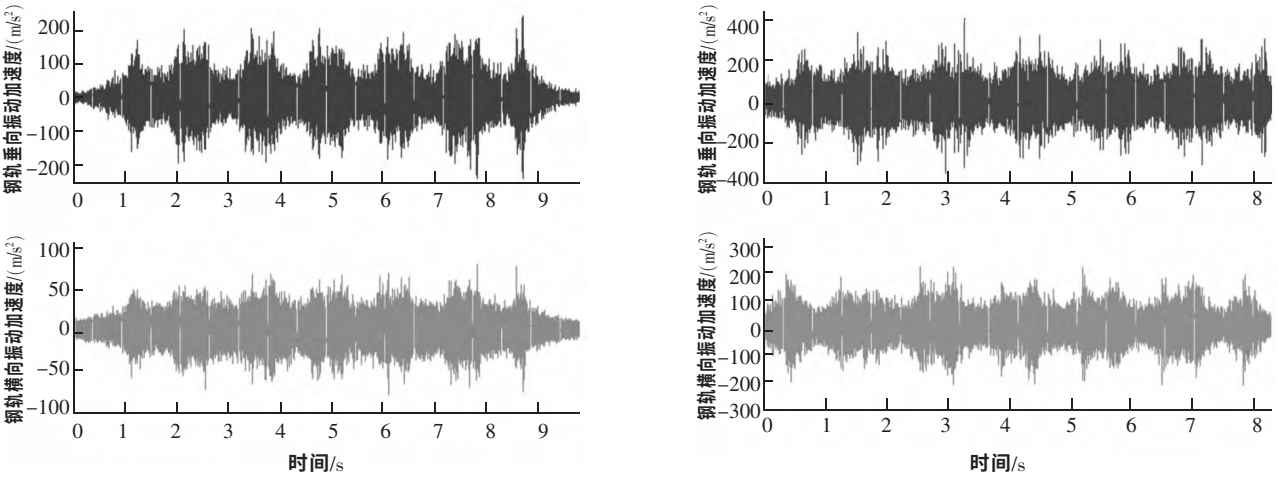
Fig.3　Exciting force and acceleration signal of measuring point 1&2 on floating slab



(a)　(b)　(c)　(d)

图 4　浮置板和道床的加速度导纳、浮置板动柔度以及相干函数

Fig.4　Accelerance of floating slab and ballast bed, receptance of floating slab and coherence



(a) 长枕埋入式轨道　　(b) 短板浮置板轨道

图 5　钢轨垂向与横向振动加速度

Fig.5　Vertical and lateral vibration acceleration of rail

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

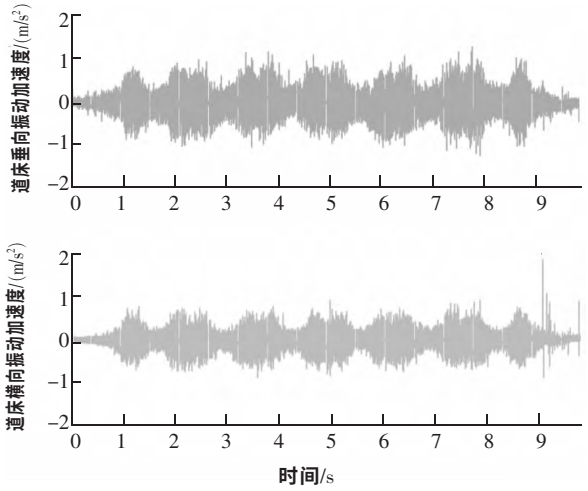


图6 长枕埋入式轨道道床中间垂向与横向振动加速度

Fig.6 Vertical and lateral vibration acceleration of ballast bed of long sleeper buried track

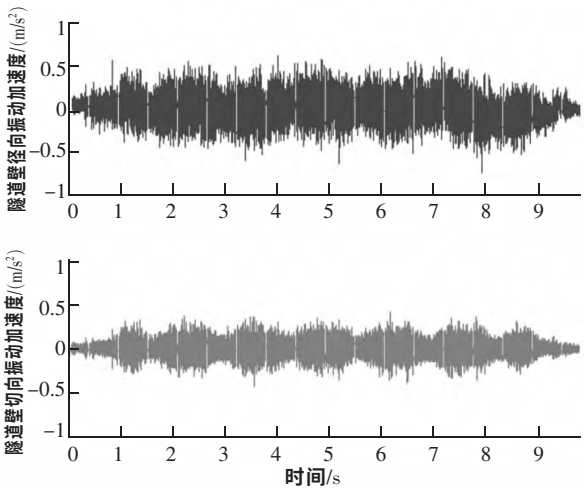


图7 长枕埋入式轨道隧道壁振动加速度

Fig.7 Vibration acceleration of tunnel of long sleeper buried track

大于预制短板浮置板轨道的道床加速度振幅0.01 g；隧道壁横向加速度振幅最大为0.05 g左右、垂向加速度振幅最大为0.03 g左右，也大大高于预制短板浮置板轨道隧道壁的横向加速度振幅0.003 g、垂向加速度振幅0.003 g。

为了分析预制短板浮置板更多的振动特性，对上述截取得到的信号进行处理，先对各趟次轨道板振动加速度数据分别进行三分之一倍频分析，然后再求取进行平均值，得到各测点振动加速度的1/3倍频程谱[7]。长枕埋入式轨道和浮置板轨道的钢轨的振动加速度1/3倍频程谱见图9~图10。从图中可以看出，长枕埋入式轨道钢轨的振动频谱虽然与预制短板浮置板轨道基本相同，但是钢轨横向振动在400~1 200 Hz峰值区间明显小于垂向振动。

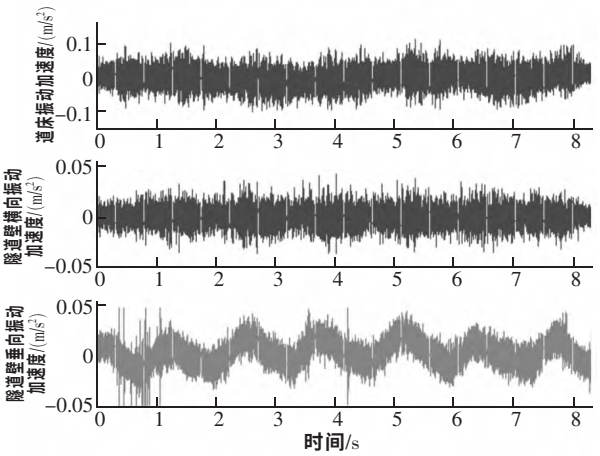


图8 短板浮置板道床与隧道壁振动加速度

Fig.8 Acceleration of ballast bed and tunnel of short floating slab track

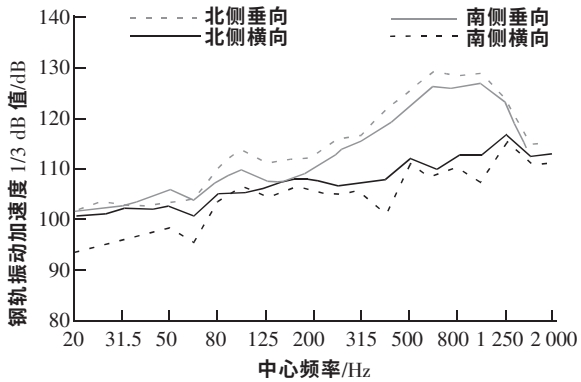


图9 长枕埋入式轨道钢轨振动加速度1/3倍频程谱

Fig.9 Rail acceleration of 1/3 octave spectrum of long sleeper buried track

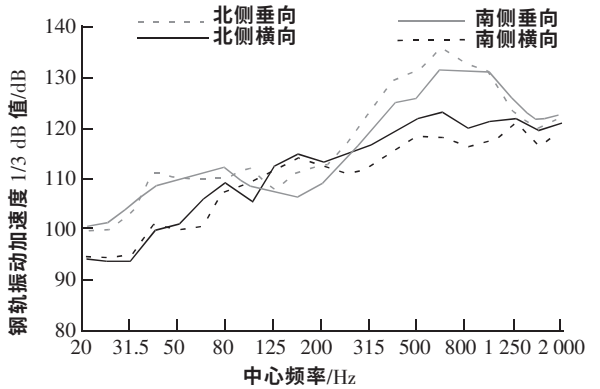
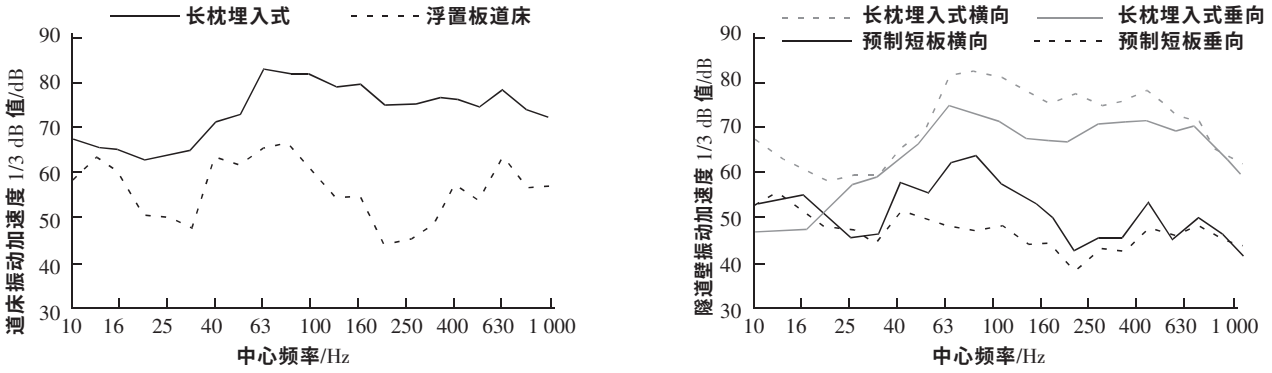


图10 浮置板轨道钢轨振动加速度1/3倍频程谱

Fig.10 Rail acceleration of 1/3 octave spectrum of short floating slab track

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) 道床　　(b) 隧道壁

图 11　两种轨道结构道床及隧道壁振动加速度 1/3 倍频程谱比较

Fig.11　Ballast bed and tunnel acceleration of 1/3 octave spectrum of two kinds of tracks

图 11 为两种不同轨道的道床垂向与隧道壁振动加速度 1/3 倍频程谱比较图。从图中可以看到，在 100 Hz 以上，预制短板浮置板道床的振动加速度远小于长枕埋入式轨道的振动加速度，前者小于后者平均 20 dB 以上。两种轨道结构隧道壁振动加速度的对比情况与道床情况基本相似。但在 100 Hz 以下，情况更为复杂。在 12.5 Hz 处，预制短板浮置板轨道的道床振动与隧道壁振动加速度均大于长枕埋入式轨道 8~10 dB 左右。其原因在于：只有振动频率高于浮置板–隔振器系统固有频率的 1.4 倍时，预制短板浮置板轨道才起隔振作用；但在其固有频率附近，振动反而增大。预制短板浮置板系统的固有频率大约为 12~13 Hz，因此起隔振作用的起始频率约为 17~18 Hz。通过两种轨道对应部件振动加速度的比较，可以得出在 20~100 Hz 区间，预制短板浮置板轨道的隔振效果约为 6~20 dB。

3　地面振动测试

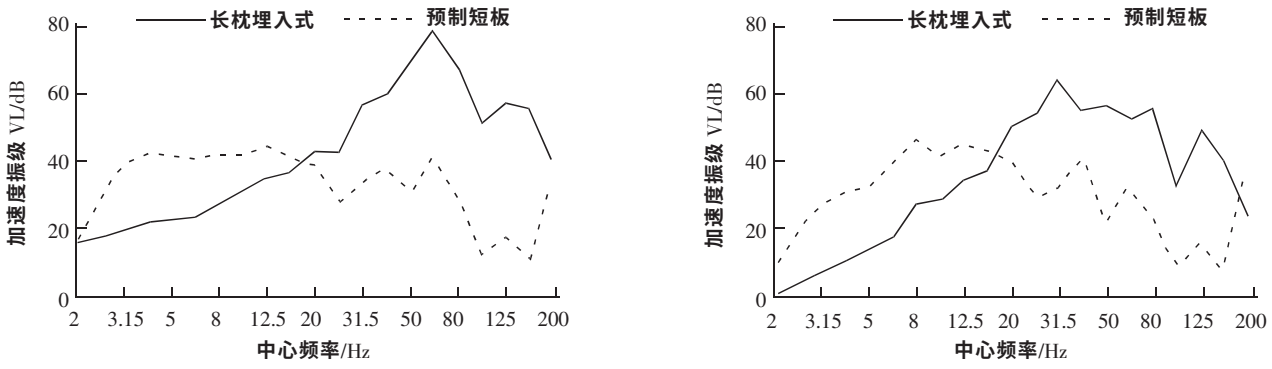
3.1　测试内容

为进一步分析预制短板浮置板的减振特性，分别选取长枕埋入式轨道、预制短板浮置板各区段隧道正上方地面作为测试断面，在距离轨道中心线 0，10，20 m 地面处布置加速度传感器。列车往返经过测试断面 25 次，拾取经过时地面的垂向和横向加速度信号。通过地面振动测量数据的分析对比，评估浮置板对地面环境振动的隔振效果。

3.2　测试结果及分析

3.2.1　1/3 倍频分析

为分析轨道结构类型对地面的振动能量的分布大小的影响，对每趟列车的振动数据进行三分之一倍频分析，然后再取平均值，得到振动能量在分析频段上的分布情况，以车速为 60 km/h 时距地面 0 m 数据，结果如图 12 所示。



(a) 垂向　　(b) 横向

图 12　地面 0m 处振动 1/3 倍频程谱

Fig.12　1/3 octave spectrum of vibration on the ground at 0m

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

从图中可以看出,长枕埋入式轨道地面振动频率一般分布在25~80 Hz的范围内,预制短板浮置板区段地面环境振动一般分布在4~20 Hz的范围内;长枕埋入式轨道地面振动水平随距轨道中心线距离的增大而减小;相对长枕埋入式轨道区段地面振动而言,预制短板浮置板在20 Hz以上的频段具有良好的减振效果,最大可达25 dB,但在2.5~16 Hz的范围内对地面振动水平起轻微放大的作用。

3.2.2 Z振级分析

列车经过各测试断面后,根据其运行速度分为50,60,70 km/h三档,并对各测点拾取的垂向振动加速度信号进行振级评价,评价方法主要参考《城市区域环境振动控制标准》(GB10070-88)[8]。对每一档车速下的数据取平均值,得到相同车速条件下不同轨道结构对地面环境振动水平的影响规律,部分结果如图13所示。

从图中可以看出,车速提高对地面各测点的振级影响不大;从振级的最大值上看,列车在长枕埋入式轨道区段引起的环境振动水平比预制长板浮置板轨道更高,距轨道中心线0,10,20 m地面处,预制短板浮置板的减振效果为12,5.4,1.1 dB,进一步说明预制短板浮置板轨道的减振效果优于长枕埋入式轨道。

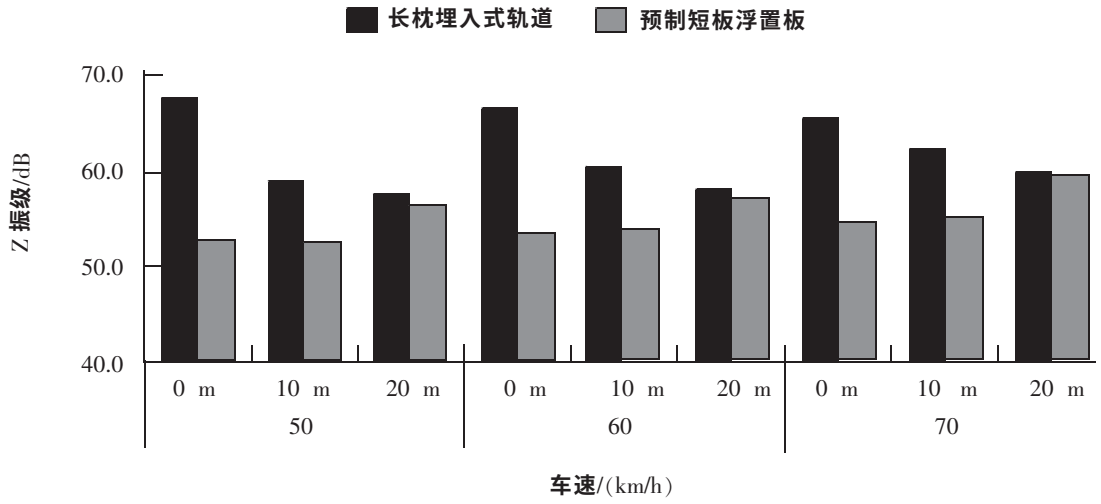


图13 不同轨道结构类型Z振级(最大值)

Fig.13 Z vibration level of two types of track (max)

4 结论

1) 预制短板浮置板轨道的隔振机理,是以自身振动处于较高水平为代价,从而达到降低基底与隧道振动的效果;且只有在振动频率高于浮置板–隔振器系统固有频率的1.4倍(16~17 Hz)时,预制短板浮置板轨道才起隔振作用。

2) 隧道内,通过对比长枕埋入式轨道各测点的振动加速度幅值和1/3倍频程谱可知,预制短板浮置板轨道具有良好的减振效果:在20~100 Hz区间,预制短板浮置板轨道的减振效果约为6~20 dB;而在100 Hz以上,浮置板轨道的减振效果平均大于20 dB。

3) 从地面振动测试可知,车速的变化对地面振动的影响并不大,总体上各测点的振动水平随距轨道中心线的距离增大而减小;预制短板浮置板在20 Hz以上的频段具有良好的减振效果,最大可达25 dB;进一步说明预制短板浮置板轨道的减振效果优于长枕埋入式轨道。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献：

[1] 曲腾飞，耿传智. 新型预制短板浮置板轨道施工工艺探讨[J]. 城市轨道交通研究，2014(7)：89–92.

[2] 盛涛，张善莉，单伽锃，施卫星. 地铁振动的传递及对建筑物的影响实测与分析[J]. 同济大学学报：自然科学版，2015(1)：54–59.

[3] 翟杰群. 地铁振动传播的现场测试与数值分析[D]. 上海：同济大学，2007：10–11.

[4] 蒋崇达，雷晓燕. 地铁运营下钢弹簧浮置板轨道减振分析[J]. 华东交通大学学报，2012，29(5)：23–28.

[5] 黄洋. 浅谈城市地铁钢弹簧浮置板整体道床施工技术[J]. 黑龙江科技信息，2015(2)：115.

[6] 高世兵. 钢弹簧浮置板减振轨道在城市地铁中的应用[J]. 铁道工程学报，2008(3)：88–91.

[7] 张莉，刘鹏辉，杨宜谦，王巍. 杭州地铁 1 号线浮置板轨道减振效果对比分析[J]. 铁道建筑，2013(10)：80–83.

[8] 洪俊青，刘伟庆. 地铁对周边建筑物振动影响分析[J]. 振动与冲击，2006(4)：142–145.

Research on the Damping Characteristic of Precast Short Board Floating Slab Track

Zou Yan[1], Liu Yang[2], Ma Xiaoyun[1], Lian Songlian[1]

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Technology Research Center of Shanghai Rail Transit, Shanghai 201103, China)

Abstract: Floating slab track is very effective in decreasing the vibration, which has been made full use in urban rail transit. In order to study the dynamic characteristics of floating slab, and compare its damping characteristics with long sleeper buried track, the vibration acceleration data of precast short board floating slab and long sleeper buried track are collected by field test. The results show that the damping effect of precast short board floating slab track is greater than 20 dB at the section more than 100 Hz in tunnel, and up to 25 dB at the section more than 25 Hz on the ground. It proposes that precast short board floating slab is a highly efficient measure which can achieve the expected damping effect.

Key words: urban rail transit; floating slab; vibration acceleration; damping characteristic

（责任编辑　王建华）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net