

地铁列车-宽枕板式减振轨道系统竖向振动分析及减振效果评价*

张生延^{1,2}

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安;

2. 陕西省铁道及地下交通工程重点实验室(中铁一院), 710043, 西安//高级工程师)

摘 要 针对地铁轨道结构设计中不可避免地面活动断裂带与轨道减振降噪地段重合的情形,建立了列车-宽枕板式减振轨道系统竖向振动分析模型,探讨了不同减振轨道结构的动力特性及减振性能。结果表明:以压缩型减振扣件替换普通扣件的轨道结构的减振效果值可达 5.24 dB,满足中等减振轨道的需求,同时满足行车要求;宽枕板下黏贴减振垫可适用于高等减振地段,建议高等减振地段减振垫刚度 $\geq 0.030 \text{ N/mm}^3$;道床底部铺设减振垫可适用于特殊减振地段,建议特殊减振地段减振垫刚度取值可放宽至 0.018 N/mm^3 。

关键词 地铁;列车-宽枕板式减振轨道系统;竖向振动;减振效果

中图分类号 U213.2¹²

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.06.015

Analysis of Vertical Vibration of Metro Train-Wide Sleeper Damping Track System and Evaluation of Vibration Damping Effect

ZHANG Shengyan

Abstract Targeting that metro track structure design is inevitably faced with the situation where the active fault zone coincided with the track vibration reduction and noise reduction section, a vertical vibration analysis model of the train-wide sleeper damping track system is established to discuss the dynamic characteristics and vibration damping effect of different damping tracks. Results show that: the compression damping fastener can replace ordinary fasteners to achieve a damping effect value of 5.24 dB, which can meet the requirements of moderate vibration reduction and satisfy the driving requirements at the same time; adhesive damping pads under wide sleepers can be applied to higher vibration damping areas, suggesting that the stiffness of damping pads in high vibration damping areas is

$k \geq 0.030 \text{ N/mm}^3$; vibration damping pads at the bottom of the track bed can be applied to special vibration damping areas. It is suggested that the stiffness of the damping pad in special vibration damping area can be relaxed to 0.018 N/mm^3 .

Key words metro; train-wide sleeper vibration damping track system; vertical vibration; vibration reduction effect

Author's address China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 710043, Xi'an, China

城市轨道交通工程在建设过程中,不可避免地跨越活动断裂带。断裂带一旦发生错动,将会对土木工程结构的安全性产生重大的影响,轻则导致轨道结构功能性和耐久性降低,重则直接影响列车运行舒适性乃至安全性。此外,城市轨道交通线网往往穿越居民区、学校、医院等重要地带,不可避免地出现活动断裂带设防区域与轨道结构减振降噪段相重合的情况。在保证轨道结构功能性的同时,为满足城市轨道交通建设需求,降低其实施风险,亟需开展城市轨道交通线路穿越活动断裂带区域减振轨道结构的研究。

文献[1-2]从静、动力角度分析了活动断裂带错动对轨道结构受力和变形的影响;文献[3]分析了钢轨嵌入式钢弹簧浮置板轨道的减振性能,并探讨了钢轨支承形式、轨下连续支承参数对轨道结构减振性能的影响;文献[4-11]分析了列车荷载作用下减振扣件、梯形轨枕、减振垫道床的减振性能及减振效果。现有文献主要对轨道结构减振性能作了细致、深入的研究,但对同时考虑活动断裂带与轨道结构减振降噪区域的情况却鲜有研究,现场设计亦缺少一定的理论支撑。为此,本文基于有限元

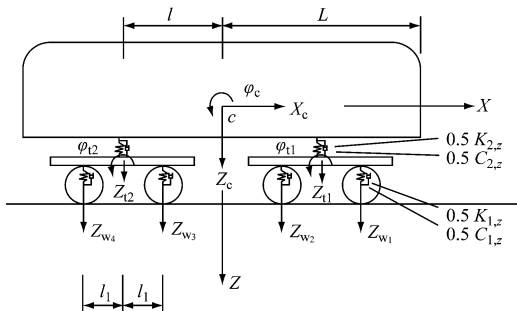
* 中铁第一勘察设计院集团有限公司科研项目(院科 18-03);华东交通大学科研启动基金资助项目(10012003416034);江西省教育厅科学技术项目(GJJ170392)

分析软件,建立列车-宽枕板式减振轨道系统竖向振动分析模型,分析活动断裂带地段宽枕板式减振轨道的适应性,以为城市轨道交通设计提供参考。

1 地铁列车-宽枕板式减振轨道系统竖向振动分析模型

1.1 地铁车辆竖向振动模型

列车选取地铁B型车,可将其简化为1个车体、2个转向架、4个轮对和两系悬挂系统。车体和转向架考虑竖向、点头共计2个自由度,轮对仅考虑竖向自由度,则单节车辆系统的竖向振动模型共计10个自由度。车辆模型示意图见图1。



注: φ_c 为车体的点头自由度; φ_{u1} 、 φ_{u2} 为转向架的点头自由度; Z_c 为车体的竖向自由度; Z_{u1} 、 Z_{u2} 为转向架的竖向自由度; Z_{w1} 、 Z_{w2} 、 Z_{w3} 、 Z_{w4} 为轮对的竖向自由度; $K_{1,z}$ 、 $C_{1,z}$ 分别为一系弹簧竖向刚度及阻尼; $K_{2,z}$ 、 $C_{2,z}$ 分别为二系弹簧竖向刚度及阻尼; X_c 为车体纵向自由度; L 为车辆长度之半; l 为车辆定距之半; l_1 为固定轴距之半。

图1 地铁车辆竖向振动模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vertical vibration model of metro vehicle

1.2 宽枕板式减振轨道竖向振动模型

针对活动断裂带的特点,中铁第一勘察设计院集团有限公司研发了适用于非减振地段的宽枕板式固化道床结构。该结构在确保轨道结构日常功能需求的前提下,能满足活动断裂带发生瞬时空间变形时的快速、便捷修复,并已成功应用于乌鲁木齐地铁1号线。非减振轨道结构典型断面如图2所示。

宽枕板式减振轨道是在宽枕板固化道床的基础上演化而来的,由钢轨、扣件系统、宽轨枕、聚氨酯固化道床、减振垫层组成。

1) 钢轨采用60 kg/m钢轨,采用C3D8R减缩实体单元模拟。

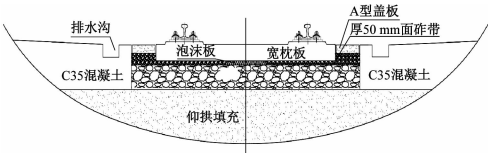


图2 非减振轨道结构典型断面图

Fig. 2 Typical cross-sectional view of non-vibration damped track structure

2) 钢轨与轨枕间通过连接器单元模拟扣件的支承和约束作用,扣件间距为568 mm;考虑扣件竖向、横向及纵向刚度。

3) 宽轨枕、聚氨酯固化道床等均采用C3D8R减缩实体单元,宽枕板板缝96 mm。

列车-宽枕板式减振轨道系统有限元模型如图3所示。轨道结构各部件结构参数如表1所示。

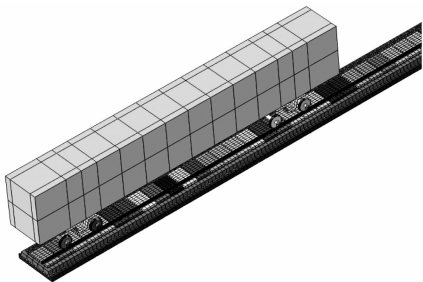


图3 列车-宽枕板式减振轨道系统有限元模型

Fig. 3 Finite element model of train-wide sleeper plate vibration damping track system

表1 轨道结构材料参数

Tab. 1 Material parameters of track structure		
名称	参数	取值
钢轨	弹性模量/MPa	2.06×10^5
	泊松比	0.30
宽枕板	弹性模量/MPa	3.65×10^4
	泊松比	0.20
	长度/m	2.20
	宽度/m	1.04
	厚度/m	0.20
扣件	竖向刚度/(N/m)	30×10^6
	横向刚度/(N/m)	25×10^6
	纵向刚度/(N/m)	30×10^6
	竖向阻尼/(Ns/m)	30×10^3
聚氨酯固化道床	横向阻尼/(Ns/m)	25×10^3
	厚度/m	0.35
	弹性模量/MPa	55.00

1.3 接触条件及边界条件的设置

宽枕板式减振轨道各部件间的接触条件设置如下:

1) 减振垫与宽枕板、固化道床之间或减振垫与固化道床、仰拱间采用绑定约束,即认为三者变形一致。

2) 聚氨酯固化道床及其下部基础采用绑定约束,不考虑二者之间的分离。

设置模型边界条件如下:

1) 约束上部轨道结构的纵、横向位移,其竖向可产生自由变形,以减轻边界效应的影响;而基础底面则采用全约束处理。

2) 为进一步避免边界效应对计算结果的影响,模型长度取 200 m。

1.4 轨道结构竖向相互作用力计算

本文的轮轨接触模型采用 Hertz 接触理论,轮轨间的竖向作用力 $p(t)$ 为:

$$p(t) = \left[\frac{1}{G} \Delta Z(t) \right]^{3/2} \quad (1)$$

$$\Delta Z(t) = Z_{w,j}(t) - Z_r(x_{r,j}, t) \quad (2)$$

式中:

G —轮轨接触常数;

t —时间;

$\Delta Z(t)$ —轮轨间的弹性压缩量;

$Z_{w,j}(t)$ 、 $Z_r(x_{r,j}, t)$ ——分别为第 j 位车轮和钢轨在时刻 t 的位移。

1.5 轨道不平顺

基于三角级数法及 Matlab 程序生成的轨道不平顺随机样本,如图 4 所示。轨道不平顺波长范围为 1 ~ 50 m。

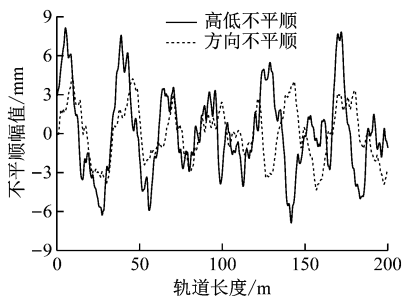


图 4 竖向激振源

Fig. 4 Vertical excitation source

结合现有减振轨道研究成果及经验,宽枕板式减振轨道减振方案有 3 种,分别为中等减振、高等减振和特殊减振。

1) 中等减振:选用压缩型减振扣件,轨道结构

高度为 793 mm。

2) 高等减振:宽枕板式减振轨道与固化道床间加铺减振垫层,轨道结构高度为 820 mm。

3) 特殊减振:固化道床与隧道仰拱间加铺减振垫层,轨道结构高度为 820 mm。

1.6 列车-宽枕板式减振轨道模型的验证

为验证模型的正确性,本文采用与文献[1]相同的计算参数,仿真系统各部件的动力响应,计算结果见表 2。由表 2 可见,本文建立的列车-宽枕板式减振轨道系统竖向振动分析有限元模型是合理、可靠的。

表 2 列车-宽枕板式减振轨道系统竖向振动分析结果对比
Tab.2 Comparison of vertical vibration analysis results of train-wide sleeper plate vibration damping track system

参数	不同计算方法下的取值	
	本文所提计算方法	文献[1]中的计算方法
车体竖向加速度/(m/s ²)	0.28	0.24
轮轨竖向力/kN	74.82	73.56
钢轨竖向位移/mm	0.90	0.70
道床竖向位移/mm	0.26	0.22

1.7 列车-宽枕板式减振轨道系统减振效果评价方法

列车-宽枕板式减振轨道系统减振效果评价方法建议采用的中心频率为 4 ~ 200 Hz。评价指标包括减振效果值 $\Delta V_{L,a}$,以及辅助指标减振效果的最大值 $\Delta V_{L,max}$ 和最小值 $\Delta V_{L,min}$ 。具体计算公式如下^[12]:

$$\Delta V_{L,a} = 10 \ln \left(\sum_{i=1}^n 10^{\left(\frac{V_{L,q,i}}{10} \right)} \right) - 10 \ln \left(\sum_{i=1}^n 10^{\left(\frac{V_{L,h,i}}{10} \right)} \right) \quad (3)$$

$$\Delta V_{L,max} = \max_{i=1 \rightarrow n} (V_{L,q,i} - V_{L,h,i}) \quad (4)$$

$$\Delta V_{L,min} = \min_{i=1 \rightarrow n} (V_{L,q,i} - V_{L,h,i}) \quad (5)$$

式中:

n ——1/3 倍频程中心频率的个数;

$V_{L,q,i}$ ——非减振轨道竖向振动加速度在 1/3 倍频程第 i 个中心频率上的分频振级;

$V_{L,h,i}$ ——减振轨道竖向振动加速度在 1/3 倍频程第 i 个中心频率上的分频振级。

2 列车-宽枕板式减振轨道系统竖向振动分析

2.1 中等减振轨道

列车以 80 km/h 速度运行时,列车-宽枕板式减

振轨道系统的振动响应如表 3 所示。由表 3 可见：

1) 与非减振轨道相比,中等减振轨道车体竖向加速度略有增大。

2) 与非减振轨道相比,中等减振轨道钢轨竖向加速度约增大 0.55 m/s^2 ,增幅约 3.2%;道床竖向加速度减小 0.07 m/s^2 ,减幅约 30%;基底竖向加速度减小 0.20 mm/s^2 ,减幅约 35%。由此可见,扣件刚度的减小增大了钢轨竖向加速度,但降低了轨下结构的加速度响应;基底竖向加速度降幅明显,表明减振扣件明显抑制了振动的传递。

3) 与非减振轨道相比,中等减振轨道钢轨竖向位移增大 0.75 mm ,增幅达 52%;而宽枕板竖向位移基本保持不变。由此可见,扣件刚度的减小明显增大了钢轨竖向位移,表明其对钢轨位移影响显著。

表 3 列车-中等减振轨道系统竖向振动响应

Tab.3 Vertical vibration response of train-medium vibration damping track system

参数	不同类型减振轨道参数取值	
	中等减振轨道	非减振轨道
车体竖向加速度/(m/s^2)	0.22	0.19
钢轨竖向加速度/(m/s^2)	17.79	17.24
道床竖向加速度/(m/s^2)	0.16	0.23
基底竖向加速度/(mm/s^2)	0.37	0.57
钢轨竖向位移/mm	2.17	1.42
宽枕板竖向位移/mm	0.14	0.14

图 5 为基底竖向加速度时程曲线。对其进行 1/3 倍频频谱转换,并按式(1)一式(3)计算得到, $\Delta V_{L,a}$ 为 5.24 dB, $\Delta V_{L,max}$ 为 22.30 dB。

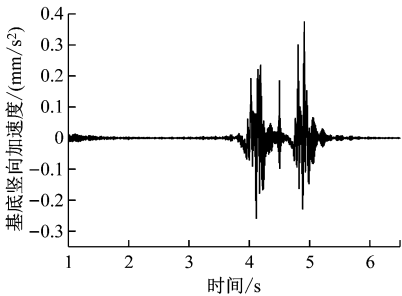


图 5 基底竖向加速度时程曲线

Fig.5 Time-history curve of vertical acceleration of base

综上所述,以压缩型减振扣件替代普通扣件所形成的适配中等减振地段轨道结构的减振效果可达 5 dB。

2.2 高等减振轨道

列车以 80 km/h 速度运行,且减振垫刚度 k 为 0.018 N/mm^3 时,列车-高等减振轨道系统竖向振动响应如表 4 所示。由表 4 可见：

1) 与非减振轨道相比,高等减振轨道车体竖向加速度略有增大。

2) 与非减振轨道相比,中等减振轨道钢轨竖向加速度减小 2.7 m/s^2 ,减幅约 16%;道床竖向加速度有所增大,增幅约 13%;基底竖向加速度减小 0.30 mm/s^2 ,减幅约 52%。由此可见,宽枕板与固化道床间铺设减振垫明显降低了基底竖向加速度。

3) 与非减振轨道相比,钢轨竖向位移增大 1.92 mm ,增大约 1.35 倍;道床竖向位移增大 2.22 mm ,增大约 15.86 倍。由此可见,铺设减振垫明显增大了宽枕板的竖向位移。

表 4 列车-高等减振轨道系统竖向振动响应结果

Tab.4 Vertical vibration response results of train-high vibration damping track system

参数	不同类型轨道参数取值	
	高等减振轨道	非减振轨道
车体竖向加速度/(m/s^2)	0.22	0.19
钢轨竖向加速度/(m/s^2)	14.54	17.24
道床竖向加速度/(m/s^2)	0.26	0.23
基底竖向加速度/(mm/s^2)	0.27	0.57
钢轨竖向位移/mm	3.34	1.42
宽枕板竖向位移/mm	2.36	0.14

图 6 为不同 k 的条件下,列车-高等减振轨道竖向振动响应随 k 的变化规律。由图 6 可见：

1) 轮轨竖向力随 k 的增大呈逐渐增大的趋势,但增幅较小。

2) 钢轨、宽枕板竖向位移随 k 的增大逐渐减小。

3) 道床、基底竖向加速度随 k 增大逐渐增大。

图 7 为不同 k 的条件下的基底竖向加速度分频振级曲线。不同 k 下高等减振轨道的减振效果见表 5。由表 5 可见：

1) 不同 k 的条件下,基底竖向加速度振级在频域上表现为相同的变化趋势。当中心频率小于 50 Hz 时,铺设减振垫地段轨道结构的振动与普通地段的振动相当;当中心频率大于 50 Hz 时,铺设减振垫地段轨道结构的振动小于普通地段的振动。

2) $\Delta V_{L,a}$ 、 $\Delta V_{L,max}$ 随 k 的增大呈逐渐减小趋势。

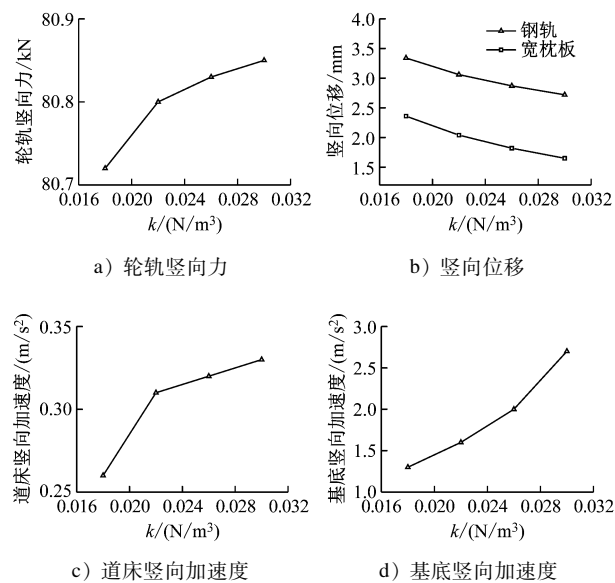


图6 高等减振轨道道床和轮轨竖向响应随 k 变化曲线

Fig.6 Curve of high vibration damping track bed and wheel-rail vertical response changing with k

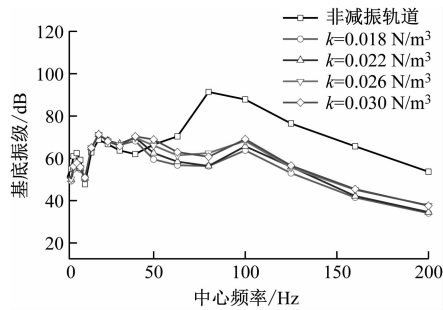


图7 高等减振轨道的基底竖向加速度分频振级
Fig.7 Frequency division vibration level of base vertical acceleration of high vibration damping track

表5 不同 k 下高等减振轨道的减振效果
Tab.5 Vibration reduction effect of high vibration damping track at different k values

$k/(N/mm^3)$	$\Delta V_{L,a}/dB$	$\Delta V_{L,max}/dB$	$\Delta V_{L,min}/dB$
0.018	14.15	29.20	-6.19
0.022	13.59	29.14	-7.83
0.026	13.10	27.38	-7.96
0.030	12.73	25.52	-8.35

3) $\Delta V_{L,min}$ 随 k 的增大呈逐渐增大趋势。

综上,宽枕板与道床间插入减振垫,其减振效果可达10 dB及以上,可适用于高等减振轨道地段。本文建议 $k\geq 0.030\text{ N/mm}^3$,此时钢轨竖向位移可控制在3 mm以下。

2.3 特殊减振轨道

列车以80 km/h速度运行, k 为 0.018 N/mm^3 时,列车-特殊减振轨道系统竖向振动响应如表6所示。由图6可见:

- 1) 与非减振轨道相比,特殊减振轨道车体竖向加速度略有增大。
- 2) 与非减振轨道相比,钢轨最大竖向加速度增大 5.40 m/s^2 ,增幅约31%;道床竖向加速度增大 0.92 m/s^2 ,增大约4倍;基底最大竖向加速度减小 0.44 m/s^2 ,减幅约77%;道床底部铺设减振垫可明显降低基底竖向加速度。
- 3) 与非减振轨道相比,钢轨竖向位移增大 0.94 mm ,增幅约66%;宽枕板竖向位移增大 1.16 mm ,增大约7.28倍;宽枕板竖向位移增大显著。

表6 列车-特殊减振轨道系统竖向振动响应
Tab.6 Vertical vibration response of train-special vibration reduction track system

参数	不同类型轨道参数取值	
	特殊减振轨道	非减振轨道
车体竖向加速度/(m/s^2)	0.21	0.19
钢轨竖向加速度/(m/s^2)	22.64	17.24
道床竖向加速度/(m/s^2)	1.15	0.23
基底竖向加速度/(mm/s^2)	0.13	0.57
钢轨竖向位移/mm	2.36	1.42
宽枕板竖向位移/mm	1.39	0.14

图8为不同 k 的条件下,列车-特殊减振轨道竖向振动响应随 k 的变化规律。由图8可见:

- 1) 轮轨竖向力随 k 的增大呈逐渐增大的趋势。
- 2) 钢轨、宽枕板竖向位移随 k 的增大呈逐渐减小的趋势。
- 3) 道床、基底竖向加速度随 k 增大呈逐渐减小的趋势。

图9为不同 k 的条件下的基底竖向加速度分频振级曲线。不同 k 的条件下特殊减振轨道的减振效果见表7。由表7可见:

- 1) 不同 k 的条件下,基底竖向加速度振级在频域上表现为相同的变化趋势。当中心频率小于50 Hz时,铺设减振垫地段的振动与普通地段的振动相当;当中心频率大于50 Hz时,铺设减振垫地段的振动小于普通地段的振动。
- 2) $\Delta V_{L,a}$ 、 $\Delta V_{L,max}$ 随 k 的增大呈逐渐减小趋势。

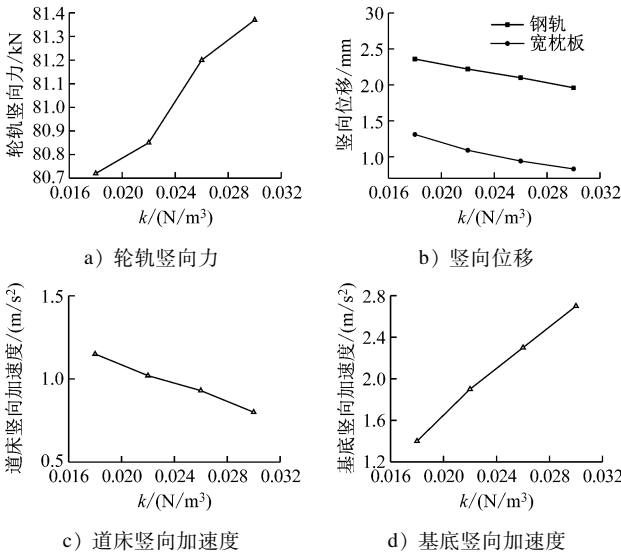


图 8 特殊减振轨道道床和轮轨竖向响应随 k 变化曲线

Fig. 8 Curve of special vibration reduction track bed and wheel-rail vertical response changing with k

3) $\Delta V_{L,\min}$ 随 k 的增大呈逐渐增大趋势。表 7 未表现出此规律,主要是由于 $\Delta V_{L,\min}$ 所对应的中心频率不同。

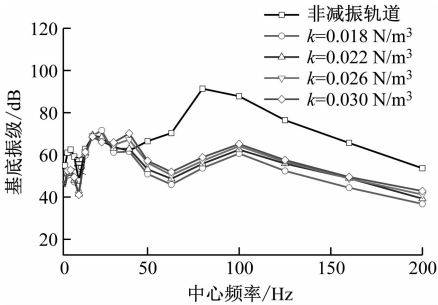


图 9 特殊减振轨道的基底竖向加速度分频振级

Fig. 9 Frequency division vibration level of base vertical acceleration of special vibration damping track

表 7 不同 k 下特殊减振轨道的减振效果			
Tab.7 Vibration reduction effects of special vibration reduction track at different k values			
$k/(N/mm^3)$	$\Delta V_{L,a}/dB$	$\Delta V_{L,max}/dB$	$\Delta V_{L,min}/dB$
0.018	17.01	37.62	-4.94
0.022	16.04	35.56	-1.53
0.026	15.55	34.19	-5.25
0.030	14.85	32.51	-8.16

综上,道床与基底间插入减振垫,其减振效果可达 15 dB 及以上。本文建议特殊减振轨道地段 k 可放宽至 0.018 N/mm^3 以下,此时,钢轨竖向位移可控制在 4 mm 以下。

3 结论

- 1) 以压缩型减振扣件替换普通扣件后, $\Delta V_{L,a}$ 可达 5.24 dB,可满足中等减振需求,同时满足行车要求。
- 2) 宽枕板下黏贴减振垫可适用于高等减振地段,但考虑到高等减振地段的减振效果需求,同时兼顾轨道结构安全位移储备,建议高等减振地段 $k \geq 0.030\text{ N/mm}^3$,钢轨竖向位移可控制在 3 mm 以下, $\Delta V_{L,a}$ 可控制在 10 dB。
- 3) 道床底部铺设减振垫可适用于特殊减振地段。建议特殊减振地段 k 可放宽至 0.018 N/mm^3 ,钢轨竖向位移可控制在 4 mm 以下,此时 $\Delta V_{L,a}$ 可达 15 dB 以上。

参考文献

[1] 郝晓成. 地铁隧道内聚氨酯固化道床力学行为及减振性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
HAO Xiaocheng. Study on mechanical behavior and vibration reduction performance of polyurethane foam solidified ballast in subway tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.

[2] 蔡向辉, 于鹏, 周红丽, 等. 活动断裂带地区地铁新型轨道结构动力响应研究[J]. 铁道标准设计, 2017(12): 14.
CAI Xianghui, YU Peng, ZHOU Hongli, et al. Research on dynamic response of metro track structure in active fault zone[J]. Railway Standard Design, 2017(12): 14.

[3] 石培泽. 钢轨嵌入式钢弹簧浮置板轨道减振性能分析[J]. 铁道建筑, 2019(10): 114.
SHI Peize. Analysis of vibration reduction performance of rail embedded steel spring floating slab track[J]. Railway Engineering, 2019(10): 114.

[4] 马蒙, 李明航, 吴宗臻, 等. 地铁列车与定点锤击荷载下浮置板轨道减振效果对比试验研究[J]. 中国铁道科学, 2019(5): 28.
MA Meng, LI Minghang, WU Zongzhen, et al. Comparative experimental study on vibration reduction effect of floating slab track under metro train and fixed point hammering loads[J]. China Railway Science, 2019(5): 28.

[5] 韦凯, 牛澎波, 赵泽明, 等. 改进 bang-bang 控制的磁流变阻尼钢弹簧浮置板轨道基频的减振效果[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019(7): 1750.
WEI Kai, NIU Pengbo, ZHAO Zeming, et al. Damping effect of fundamental frequency of steel spring floating slab track based on magneto-rheological dampers with improved bang-bang control[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019(7): 1750.

(下转第 87 页)