

地铁曲线段 Vanguard 扣件减振效果分析

贾颖绚¹,杜林林²,王文斌³,刘维宁²

(1.北京经济管理职业学院 工程技术学院,北京 100102;2.北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044;
3.中国铁道科学研究院 城市轨道交通中心,北京 100081)

摘 要:为研究 Vanguard 扣件在地铁曲线段的减振效果,以北京地铁 5 号线某曲线段为例,分别对 DTVI₂ 扣件和 Vanguard 扣件下列车运行引起的地表振动响应进行现场测试,并通过建立相应的三维动力学数值模型对比分析了两种扣件在直线段和曲线段的地表动力响应特性和衰减规律.通过分析振动响应峰值、最大垂向计权 Z 振级及插入损失,研究了 Vanguard 扣件的减振效果.根据现场实测以及数值分析结果可知:列车运行引起的地铁曲线段地表动力响应高于直线段,圆曲线和缓和曲线的动力响应特性类似且量值接近;列车运行引起的地表横向及垂向动力响应随距线路中心线横向距离的增加而呈起伏式衰减;列车运行于 DTVI₂ 扣件和 Vanguard 扣件的轨道上时引起的地表垂向振动响应显著的频段分别位于 60 Hz 和 30 Hz 附近;Vanguard 扣件减振效果显著,对曲线段水平向振动响应的减振性能良好.

关键词:地铁振动;曲线段;现场试验;数值模拟;地表动力响应;Vanguard 扣件

中图分类号:U213.53;U231 **文献标志码:**A

Analysis of vibration damping effect of Vanguard fastener in curved segment of subway line

JIA Yingxuan¹, DU Linlin², WANG Wenbin³, LIU Weining²

(1.School of Engineering Technology, Beijing Institute of Economics and Management, Beijing 100102, China;
2.School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
3.Urban Rail Transit Center of CARS, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to study the vibration reduction effect of the Vanguard fastener in curved segment of subway line 5 in Beijing, field tests are conducted to measure the ground surface vibration response when the train moving on track with DTVI₂ fasteners and Vanguard fasteners respectively. The three-dimensional dynamic numerical models are established to comparatively analyze the characteristics of dynamic response of straight line and curved segment of subway line and to obtain the attenuation law of dynamic response of the two fasteners. The damping effect of Vanguard fasteners is researched by analyzing the peak value of vibration response, the maximum Z-weighted vibration level and the insertion loss. According to the results of field measurements and numerical analysis, several conclusions are derived as follows. The ground surface dynamic

收稿日期:2017-01-04
基金项目:国家自然科学基金(51278043)
Foundation item: National Natural Science Foundation of China(51278043)
第一作者:贾颖绚(1978—),女,河北保定人,讲师,博士.研究方向为列车振动对环境的影响.email: yxjia@126.com.
引用格式:贾颖绚,杜林林,王文斌,等.地铁曲线段 Vanguard 扣件减振效果分析[J].北京交通大学学报,2018,42(1):47—54.
JIA Yingxuan, DU Linlin, WANG Wenbin, et al. Analysis of vibration damping effect of Vanguard fastener in curved segment of subway line [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(1): 47—54. (in Chinese)

response of the curve section in subway line is higher than the straight one, and the main response of curved section is the lateral vibration. The dynamic response amplitudes of the curved section and the transition curve section are almost the same. The lateral and vertical dynamic response of the ground surface caused by the train operation is fluctuating with the increase of the horizontal distance from the center line of the track. The significant frequency band of ground surface vertical vibration response induced by the train operation with DTVI₂ fasteners and Vanguard fasteners are located near 60 Hz and 30 Hz respectively. The vibration reduction effect of Vanguard fastener is remarkable, and it has advantages on the lateral vibration reduction in curve section.

Keywords: metro vibration; curved segment; field test; numerical simulation; dynamic response of ground surface; Vanguard fastener

随着轨道交通线网密度的增加,列车运行引起的环境振动对线路周边居民的生产生活产生了显著影响^[1].由于城市内既有建筑布局复杂,为了适应城市现有条件,需设置大量的曲线以满足线路功能需要^[2],据不完全统计,城市轨道交通线路中曲线段约占线路总长的 30%左右^[3].由于曲线超高设置,列车运行于曲线段时产生的未被平衡的离心力或向心力使得曲线段轮轨横向作用力较强^[4],列车运行通过曲线段时引起的环境振动问题十分复杂,亟待研究.

针对交通引起环境振动问题的研究主要有模型法、经验法和实测法,其中模型法和实测法更为常用.采用模型法对列车运行引起的环境振动问题的研究主要集中于直线段,如 Sheng^[5]采用移动荷载状态激振法,在波频域内建立车轨耦合模型,并对轨道交通引起的地表环境振动进行了分析;马龙祥等^[6]基于轨道系统的周期性支撑特点,建立频域车轨耦合模型及薄片-无限元振动预测模型,有效预测了直线地段列车运行引起的环境振动;Yang 等^[7]利用直线轨道结构的纵向周期性,采用 2D 和 2.5D 方法对比研究了地铁列车运行引起的环境振动响应.采用模型法对列车通过曲线隧道时引起的地表振动传播规律的研究较少,既有研究主要集中于列车曲线通过性能、曲线段车轨性能匹配及轨道动力响应上,如周素霞等^[8]通过建立多体动力学分析模型,研究了缓和曲线线型对车辆动力性能的影响;王开云等^[9]通过建立车轨空间耦合模型,研究了曲线地段轮轨动态性能的匹配;李克飞^[3]通过建立地铁曲线段车轨耦合频域解析模型,研究了曲线段的轨道动力响应特性.目前,对于曲线地段振动传播规律的研究主要采用实测法,如袁扬等^[10-11]通过测试,对北京地铁 15 号线某曲线段振动传播规律进行研究,发现曲线段横向振动强度较大;邹超等^[12]通过对广州地铁车辆段直线、曲线部分进行测试,发现咽喉区曲

线段地表横向振动水平高于垂向.对地铁车辆段咽喉区附近的环境振动进行评价时,应同时考虑横、竖向振动;孙晓静等^[13]通过对京哈客运混跑曲线段进行测试,发现曲线段地表横向振动强度较大,货运列车引起的低频振动响应较大.但这些研究集中于曲线段振动传播规律的研究,对控制和降低曲线地段环境振动水平鲜有考虑.目前,控制轨道交通引起环境振动常用 3 种方法:振源减振、传播路径减振、受振体隔振,其中,振源减振更为常用.采用高性能的减振扣件是振源减振中较为常见的减振措施,Vanguard 扣件通过弹性支撑件扣压钢轨轨腰,使钢轨处于悬空状态,具有较低的垂向支撑刚度^[14-15].针对 Vanguard 扣件的减振效果,王平山等^[16]通过测试发现,直线段轨道交通引起的环境振动中,垂向振动占主要成分,Vanguard 扣件对垂向振动的减振效果显著;申道明等^[17]通过数值模拟和现场实测对不同轨道形式的减振效果进行了研究,发现 Vanguard 扣件减振效果较好,可用于对减振要求较高的区域.但以往针对 Vanguard 扣件减振效果的研究集中于直线段,在曲线段的减振效果研究较少.

本文作者选取北京地铁 5 号线刘家窑至宋家庄曲线区段,分别测试采用 DTVI₂ 扣件和采用 Vanguard 扣件的地表振动响应,并建立三维动力有限元分析模型,研究该区段采取减振措施前后列车运行引起的地表振动响应特性.基于实测和数值模拟分析,研究曲线地段地表振动的衰减规律及曲线段 Vanguard 扣件的减振效果.

1 Vanguard 扣件减振效果测试分析

1.1 测试区间工程概况

北京地铁 5 号线刘家窑至宋家庄区段为曲线隧道段,线路附近居民区房屋未能按照规划予以拆除,由于该区段轨道未采取任何减振措施,线路开通后

列车运行引起的环境振动严重影响了居民生活^[18]. 经实测发现列车振动引起的环境响应较大,超出了国家相关环境振动标准^[19]. 通过现场调查,发现附近居民住宅的玻璃被振裂,若房屋墙体裂缝进一步延展,将产生安全隐患^[20]. 为了降低该区段的振动水平,地铁公司在设计单位的配合下,决定采用英国潘得路公司的专利技术 Vanguard 扣件对该区段进

行整改. 因此,在不改变轨距与道床结构,确保地铁不停运的前提下,地铁公司对该区段近 8 km 的线路进行了轨道扣件更换. 该区间线路原采用 DTVI₂ 扣件,扣件垂向刚度为 40~80 kN/mm,如图 1(a)所示;改进后,线路采用 Vanguard 扣件,扣件垂向刚度为 8~12 kN/mm,如图 1(b)所示.

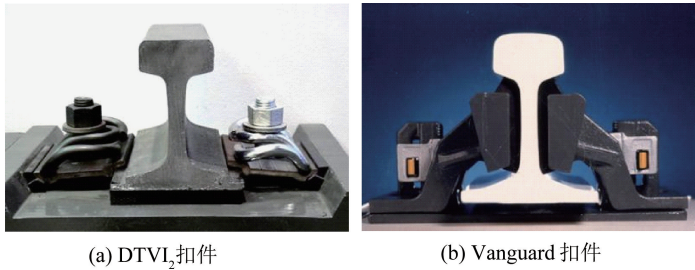


图 1 两种扣件结构
Fig.1 Structures of the two fasteners

1.2 测试断面选取及测点布置

为研究不同线型条件下 Vanguard 扣件对振动的衰减情况,测试时在圆曲线、缓和曲线、直线段各选取 1 个测点. 同时,为保证不同测试数据具有可比性,要求各测点的轨面埋深接近,综合考虑测试场地开阔性及居民反映强烈的地点,最终将测点布设在位于圆曲线段的北京昆业制衣有限公司(测点 1)、位于缓和曲线段的丰恒宾馆对面民房(测点 2)和位于直线段的市客二分公司五间楼汽车站(测点 3),测点平面布置见图 2,各测点的详细参数见表 1. 测点 1 的地质情况见图 3,各测点的轨面埋深基本相同.

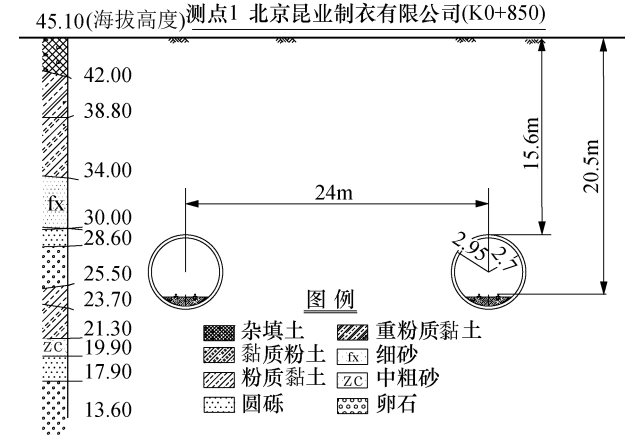


图 3 测点 1 地质情况(单位:m)
Fig.3 Geological condition of site 1(unit:m)

1.3 测试仪器及参数

现场测试时,需同时测试评价人体感受的振动加速度指标和反映建筑物开裂的速度指标,因此,采用 20 通道的 Wavebook/516E 型高速便携式数据采集器和 LC0130T 系列压电式加速度传感器测试加速度指标,采用 LC0205-8 双积分信号调理器测试速度和位移指标. 加速度传感器主要参数为:量程 0.12 g,灵敏度 37.89 V/g,谐振频率 2.1 kHz,频率范围 0.2~600 Hz,质量 420 g,直径 45 mm,高度 55 mm. 数据采集的采样频率为 1 280 Hz,每次测试记录 10 组水平和 10 组垂向有效数据,选取其中 6 组数据的平均值进行数据处理和分析.

1.4 测试结果及数据分析

1.4.1 更换扣件前后地表振动响应

为了对比曲线段 Vanguard 扣件的减振效果,分别对 DTVI₂ 扣件和 Vanguard 扣件下的地表振

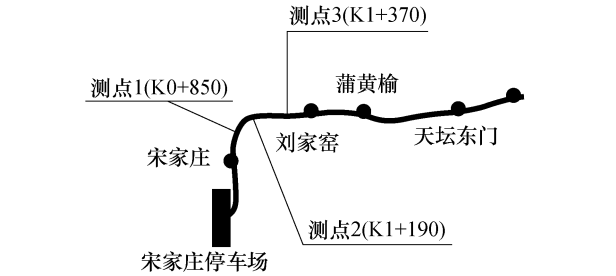


图 2 测点平面布置
Fig.2 Plane arrangement of measuring points

表 1 测点参数					
Tab.1 Measurement sites parameters					
测点号	桩号	扣件型式	轨面埋深/ m	线间距/m	线路型式
1	K0+850	DTVI ₂ Vanguard	20.5	24	圆曲线,曲线半径为 400 m
2	K1+190	DTVI ₂ Vanguard	21.7	32	缓和曲线
3	K1+370	DTVI ₂ Vanguard	20.6	28	直线

动响应进行现场测试.图 4 给出了测点 1 的 DTVI₂ 扣件和 Vanguard 扣件的地表垂向速度时程曲线,表 2 为各测点的地表垂向速度峰值和垂向计权 Z 振级.

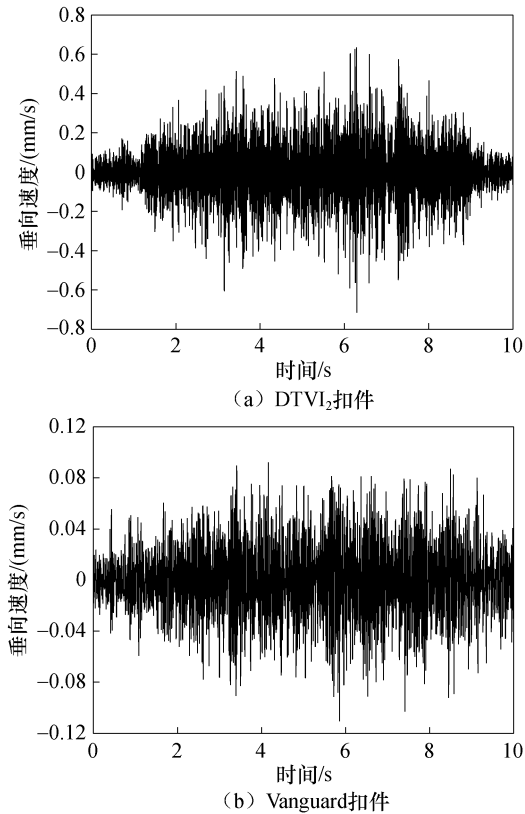


图 4 地表垂向速度时程曲线
Fig.4 Time history curves of ground surface vertical velocity

表 2 各测点地表垂向速度峰值和计权 Z 振级			
Tab.2 Peak values of ground surface vertical velocity and Z-weighted vibration level of the measuring-points			
测点号	扣件形式	垂向速度峰值/(mm/s)	垂向计权 Z 振级/dB
1	DTVl ₂	0.716	77
	Vanguard	0.106	61
2	DTVl ₂	0.354	75
	Vanguard	0.084	60
3	DTVl ₂	0.311	65
	Vanguard	0.059	57

根据数据分析可得以下结论.

1)在不同的线路条件下,各测点地表动力响应的量值和特性发生变化.从测点 1、测点 2 到测点 3,即列车从圆曲线经缓和曲线过渡到直线段的过程中,DTVl₂ 扣件下地表垂向速度峰值由 0.716 mm/s 过渡为 0.354 mm/s,最终降为 0.311 mm/s,Vanguard 扣件下地表垂向速度峰值由 0.106 mm/s 过渡为 0.084 mm/s,最终降为 0.059 mm/s.可见,列车在曲线隧道段运行时引起的地表振动响应比直线地段大,列车在缓和曲线运行时引起的地表振动量

级位于二者之间.在各种线型条件下,Vanguard 扣件均有效降低了振动响应峰值.

2)DTVl₂ 扣件下测点 1、2、3 的地表垂向计权 Z 振级分别为 77 dB、75 dB、65 dB,圆曲线的垂向计权 Z 振级和缓和曲线接近,较直线段大 12 dB,且高于标准规定的控制限值(交通干线两侧夜间 72 dB,白天 75 dB)^[19];采用 Vanguard 扣件替换普通扣件后,测点 1、2、3 的垂向计权 Z 振级为 61 dB、60 dB、57 dB,满足了城市区域环境振动标准的要求,与 DTVl₂ 扣件相比,分别减少了 16 dB、15 dB、8 dB,采用 Vanguard 扣件后圆曲线段仅超过直线段 4 dB,这充分说明 Vanguard 扣件减振效果显著,对于曲线地段的环境振动具有良好的减振效果.

1.4.2 Vanguard 扣件减振效果评价

为了进一步研究 Vanguard 扣件的减振特性和效果,对测试得到的加速度、速度及位移进行了插入损失分析.定义 DTVl₂ 扣件和 Vanguard 扣件之间的插入损失为

$$IL = 20 \times \lg(\frac{\bar{R}_{DTVl_2}}{\bar{R}_{Vanguard}})$$

(1)

式中: \bar{R}_{DTVl_2} 、 $\bar{R}_{Vanguard}$ 分别为采用 DTVl₂ 扣件、Vanguard 扣件地段地表动力响应量的有效值,包括加速度、速度和位移; IL 为插入损失,dB.如 $IL > 0$,说明 Vanguard 扣件处于减振工作状态;如 $IL < 0$,说明 Vanguard 扣件没有起到减振效果.

图 5 给出了测点 1 的 DTVl₂ 扣件和 Vanguard 扣件的垂向速度频谱曲线;图 6 为 1/3 倍频程下,两种扣件下地表的速度级及插入损失;表 3 为各测点的插入损失峰值统计.对图 5、图 6 和表 3 进行分析,得出以下结论.

1)由图 5 可知,地表的振动频率主要在 100 Hz 以内频段,采用 DTVl₂ 扣件和 Vanguard 扣件区段的地表垂向动力响应显著的频段分别位于 60 Hz 和 30 Hz 附近.

2)图 6 及表 3 表明,Vanguard 扣件的减振效果显著,动力响应的主要频段内,除垂向位移,各参数的 $IL > 0$,最大可达 37 dB.在大部分的主要频段内,加速度级插入损失为 18~28 dB,速度级的插入损失为 20~37 dB,水平位移级的插入损失为 15~35 dB,垂向位移级的插入损失为负值 $IL < 0$,为 -25~-22 dB,这说明与 DTVl₂ 扣件相比,Vanguard 扣件对水平向位移起到减振作用,但放大了垂向位移振动量.在 2~30 Hz 频段内的局部区间,各插入损失也出现负值,表明 Vanguard 扣件对该频段的减振效果不佳.

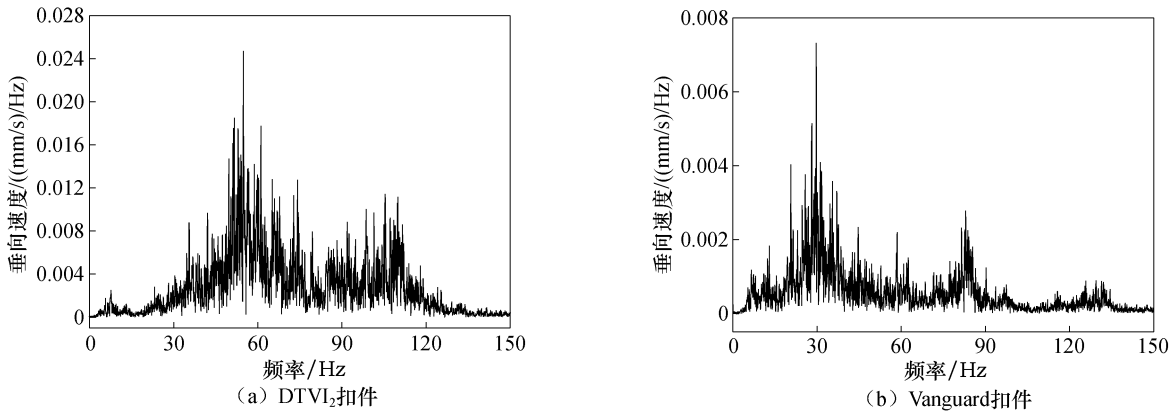


图 5 垂向速度频谱曲线

Fig.5 Frequency curves of vertical velocity

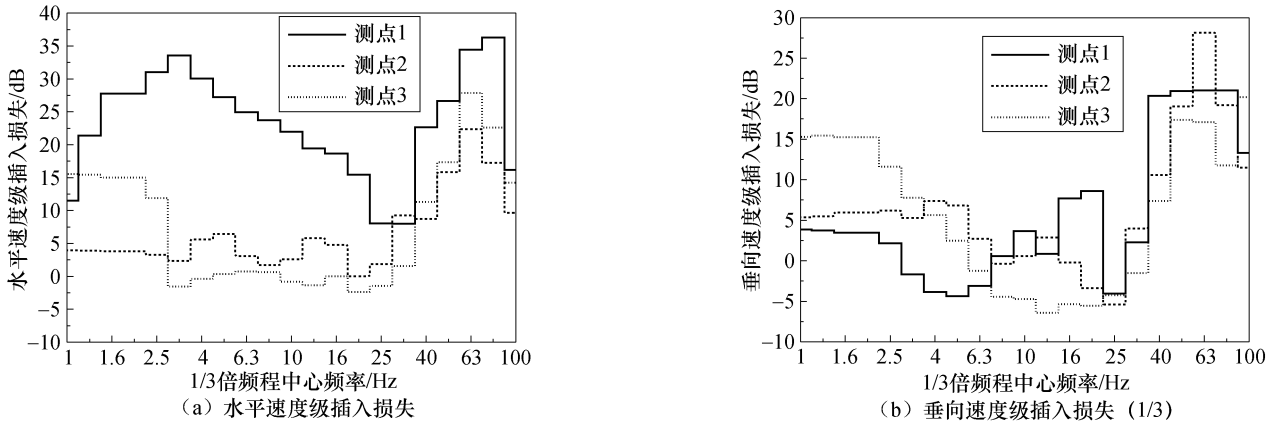


图 6 测点地表 1/3 倍频程的速度级插入损失

Fig.6 One-third octave band RMS spectrum and insertion losses of velocity level in measured sites

表 3 测点的动力响应插入损失峰值

Tab.3 Peak value of insertion loss of dynamic response of the measuring-points dB

测点号	加速度插入损失		速度插入损失		位移插入损失	
	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向
1	22	21	37	22	35	−25
2	24	28	22	27	15	−22
3	22	18	27	20	20	−24

2 Vanguard 扣件减振效果数值分析

为分别研究轨道设置 DTVI₂ 扣件和 Vanguard 扣件时,列车在曲线段和直线段运行引起的环境振动传播规律和衰减特性,采用 MIDAS/GTS 软件建

立三维动力学模型.为简化工作量,略去缓和和曲线段,分别建立了圆曲线处测点 1 和直线处测点 3 的模型,进行有限元数值模拟和计算分析.

2.1 有限元模型

2.1.1 单元类型及参数的选取

有限元模型的长×宽×高为 300 m×150 m×100 m,共划分 325 076 个单元.地层结构材料参数见表 4,地层采用 8 节点 6 面体的实体单元模拟,隧道衬砌采用板壳单元模拟,采用弹簧-阻尼吸收边界.瑞利阻尼系数取 $\alpha=0.578,\beta=0.004\ 26$,积分步长 $\Delta t=0.005\text{ s}$.所建立的有限元模型如图 7 所示.

表 4 地铁 5 号线宋家庄—刘家窑简化地层参数

Tab.4 Simplified soil parameters in Songjiazhuang—Liujiayao of Subway Line 5

土层编号	厚度/m	密度/(g/cm ³)	动弹性模量 E_d /MPa	动泊松比 μ_d	剪切波速 V_s /(m/s)	压缩波速 V_p /(m/s)	动剪切模量 G_d /MPa
土层 1	4	1.60	138.00	0.320	163.60	350.00	50.37
土层 2	21	2.06	514.86	0.296	278.77	536.12	155.99
土层 3	75	2.13	698.07	0.273	366.20	650.65	263.50

2.1.2 材料参数的选取

参照地铁 5 号线宋家庄—刘家窑工程施工设计

中的地层情况,建模简化为 3 层土层,土层从地表到地下编号依次为土层 1、土层 2、土层 3,每层土层的



图 7 有限元模型

Fig.7 Finite element models

参数按实际土层厚度加权平均,具体见表 4.结构材料参数,具体见表 5.

表 5 隧道及基础结构材料参数

Tab.5 Material parameters of tunnel and base structure			
结构名称	密度/(g/cm ³)	动弹性模量/GPa	动泊松比 μ_d
隧道衬砌	2.5	42	0.3
基础	2.5	40	0.3

2.1.3 车辆荷载的模拟

地铁列车荷载采用本文作者前期研究成果中的车轨耦合的解析模型进行计算^[21].由车辆和轨道参数计算得到轮轨接触力,再由钢轨位移和复合刚度得到枕底反力的解析解.解析计算时 DTVI₂ 型扣件的刚度取 $k_r=7.8\times10^7$ N/m,阻尼取 $c_r=5.0\times10^4$ N·s/m;Vanguard 先锋扣件的刚度取 $k_r=4.2\times10^6$ N/m,阻尼取 $c_r=5.0\times10^4$ N·s/m.

2.2 数值模拟结果分析

将模型计算与现场测试的加速度有效值进行对比,见表 6.计算结果和实测结果在变化趋势和量值上具有一致性,说明本文所建立的动力有限元模型可用于地铁列车对地表引起的振动响应的传播特性和衰减规律的预测和分析.

表 6 计算与实测加速度有效值对比

Tab.6 Comparison between predicted and measured acceleration effective values				
扣件类型	测点位置	加速度方向	计算结果/(m/s ²)	测试结果/(m/s ²)
DTVI ₂	测点 1	水平	0.053	0.042
		垂向	0.050	0.041
	测点 3	水平	0.016	0.017
		垂向	0.014	0.012
Vanguard	测点 1	水平	0.006	0.003
		垂向	0.005	0.005
	测点 3	水平	0.004	0.001
		垂向	0.007	0.005

提取数值模型中距离振源 100 m 内的地表动力响应的数据进行分析,图 8 为 Vanguard 扣件下与振源间距离 d 不同时,地表的 1/3 倍频程的速度曲线.图 9 是地表加速度有效值随距离增加的衰减曲线.

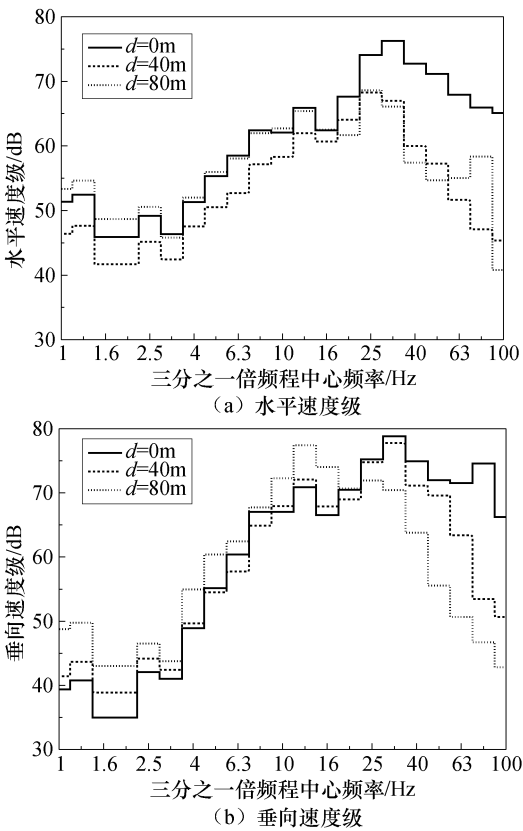


图 8 地表 1/3 倍频程速度曲线

Fig.8 Ground velocity curves of one-third octave band spectrum

1)图 8 表明,Vanguard 扣件的地表动力响应峰值主要集中在 30 Hz 附近,0~30 Hz 以内频段,地表 1/3 倍频程速度级是递增的,30 Hz 以上频段是递减的,且衰减梯度较大,可见,Vanguard 扣件对 30 Hz 以上频段的振动具有良好的减振效果.

2)图 9 曲线显示,两种类型扣件在直线段和曲线段的地表振动响应都随离开振源距离的增加呈减小趋势,在两种不同的扣件型式下,相同振源埋深的测点 1 和测点 3 中,距振源 80 m 范围内曲线段的动力响应普遍高于直线段,且水平振动量大,DTVI₂ 扣件的这种特性最为明显,因此,应重视曲线段水平振动的影响.Vanguard 扣件下的加速度有效值远小于 DTVI₂ 扣件下的加速度有效值,且曲线段和直线

段的动力响应的差异缩小,因此,Vanguard 扣件在曲线段具有良好的减振性能。

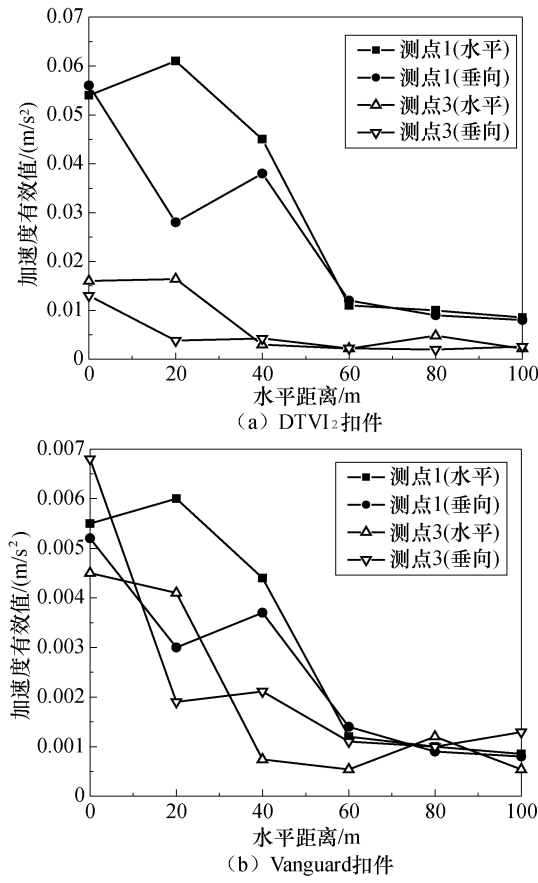


图 9 地表加速度有效值随距离增加的衰减曲线

Fig.9 Attenuation curves of ground acceleration RMS along the increasing distance

3)地表振动衰减曲线中,距振源越近,振动响应的衰减梯度越大;在 60 m 范围内,两种扣件型式下动力响应随距离变化均出现起伏,水平向和垂向的加速度有效值分别于 20 m 和 40 m 附近出现放大现象;距离振源 60 m 以上,曲线段和直线段的动力响应趋于一致.因此,需特别关注振动放大区域对地铁周边建筑和居民的影响,并采取相应减振措施。

3 结论

本文基于现场实测法和数值模拟法,对北京地铁 5 号线圆曲线段、缓和曲线段和直线段分别采用 DTVI₂ 扣件和 Vanguard 扣件时的地表振动响应特性、振动传播规律及 Vanguard 扣件的减振性能进行研究,得出以下结论。

1)列车在直线段和曲线段运行引起的地表振动存在差异,曲线段的动力响应普遍高于直线段,圆曲线和缓和曲线振动量值接近,需重视曲线段对地表动力响应的增大现象。

2)Vanguard 扣件的减振效果显著,更换 Vanguard 扣件后,原有振动超标地段降低到控制标准以内,Vanguard 扣件最大减振量达到 37 dB.DTVI₂ 扣件比 Vanguard 扣件在曲线段的动力放大现象更为明显,Vanguard 扣件水平向和曲线段的减振量大于垂向与直线段的减振量。

3)地铁列车运营传递到地面的主要振动频率在 100 Hz 以内,DTVI₂ 扣件和 Vanguard 扣件下地表垂向振动峰值频率分别为 60 Hz 和 30 Hz,Vanguard 扣件在 30 Hz 以上频段具有优良的减振效果。

4)地铁列车的地表动力响应随离开振源距离的增加而减弱,且水平和垂向振动均呈起伏式衰减,在距振源 60 m 以上,曲线段和直线段的动力响应趋于一致。

参考文献 (References):

[1] 刘维宁,马蒙,刘卫丰,等.我国城市轨道交通环境振动影响的研究现状[J].中国科学:技术科学,2016,46(6):547-559.
LIU Weining, MA Meng, LIU Weifeng, et al. Overview on current research of environmental vibration influence induced by urban mass transit in China[J]. Scientia Sinica Technologica, 2016, 46(6): 547-559. (in Chinese)

[2] 顾保南,姜晓明,程曜彦,等.论城市轨道交通最小曲线半径标准的选择[J].同济大学学报(自然科学版),2003,31(4):428-431.
GU Baonan, JIANG Xiaoming, CHENG Yaoyan, et al. Study on radius standard of urban rail transit in China [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2003, 31(4): 428-431. (in Chinese)

[3] 李克飞.基于变速及曲线车轨耦合频域解析模型的地铁减振轨道动力特性研究[D].北京:北京交通大学,2012.
LI Kefei. Study on the dynamic characteristics of metro vibration mitigation track based on the frequency-domain analytical model of coupled vehicle & track in variable-speed and curved sections[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)

[4] ZHANG H, LIU W, LI K, et al. Analytical solution for dynamic response of curved rail subjected to moving train[J]. Journal of Vibroengineering, 2014, 16(4): 2070-2081.

[5] SHENG Xiaozhen. Ground vibrations generated from trains [D]. Southampton: University of Southampton, 2001.

[6] 马龙祥,刘维宁,刘卫丰,等.地铁列车振动环境影响预测的薄片有限元-无限元耦合模型[J].岩石力学与工程学报,2016,35(10):2131-2141.
MA Longxiang, LIU Weining, LIU Weifeng, et al. Sliced finite element-infinite element coupling model for predicting environmental vibration induced by metro

- train[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10):2131–2141.(in Chinese)
- [7] YANG Y B, LIANG X, HUNG H H, et al. Comparative study of 2D and 2.5 D responses of long underground tunnels to moving train loads[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 97: 86–100.
- [8] 周素霞, 薛蕊. 缓和曲线线型对地铁车辆动力学参数的影响[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(3): 24–29.
ZHOU Suxia, XUE Rui. Influence of transition curves act on subway wheel-rail wear[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(3): 24–29.(in Chinese)
- [9] 王开云. 提速和高速铁路曲线轨道轮轨动态相互作用性能匹配研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
WANG Kaiyun. Study on performance matching of wheel-rail dynamic interaction on curved track of speed-raised and high-speed railways[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.(in Chinese)
- [10] 袁扬. 地铁列车振动环境响应预测的人工单点列脉冲激励方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
YUAN Yang. Study on the artificial single-point pulse excitations method for metro train-induced environmental vibration prediction [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [11] 袁扬, 刘维宁, 刘卫丰. 基于现场测试的曲线段地铁地面振动传播规律[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(4): 133–138.
YUAN Yang, LIU Weining, LIU Weifeng. Propagation law of ground vibration in the curve section of metro based on in-situ measurement[J]. China Railway Science, 2012, 33(4): 133–138. (in Chinese)
- [12] 邹超, 汪益敏, 王朝晖, 等. 地铁车辆段咽喉区地面振动传播规律实测与分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(16): 200–206.
ZOU Chao, WANG Yimin, WANG Zhaohui, et al. Field measurement and analysis of ground vibration in the throat area of metro depot[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(16): 200–206.(in Chinese)
- [13] 孙晓静, 马蒙, 刘维宁, 等. 客、货列车通过既有线路曲线段的振动响应测试分析[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(3): 76–81.
SUN Xiaojing, MA Meng, LIU Weining, et al. Test and analysis of vibration response induced by passenger and freight trains passing curved track section of existing line[J]. China Railway Science, 2016, 37(3): 76–81.(in Chinese)
- [14] 杨宏伟. 新型减振 Vanguard 扣件短轨枕轨道工程施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2006(3): 37–39.
YANG Hongwei. Construction technology of short sleeper ballast track with new type vibration reducing fastener[J]. Railway Construction Technology, 2006(3): 37–39.(in Chinese)
- [15] 郭春华. 地铁运营线路既有弹性短轨枕扣件地段更换 Vanguard(先锋)扣件施工工艺[J]. 科技传播, 2013, 5(2): 135.
GUO Chunhua. Technology of Vanguard (pioneer) fasteners substitute the short sleeper ballast on metro line [J]. Public Communication of Science & Technology, 2013, 5(2): 135.(in Chinese)
- [16] 王平山, 张善莉. 地铁运行引起的建筑室内振动研究及减振扣件性能评价[J]. 建筑结构, 2013, 43(13): 1–6.
WANG Pingshan, ZHANG Shanli. Research on the subway-induced building vibration and evaluation on the performance of the damping fastener[J]. Building Structure, 2013, 43(13): 1–6.(in Chinese)
- [17] 申道明, 薛松涛. 3 种轨道结构下地铁引起多层住宅室内振动模拟与实测[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(10): 2033–2041.
SHEN Daoming, XUE Songtao. Measurement & simulation on the subway induced ground-borne vibration in multi-story residence under three track structures[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(10): 2033–2041.(in Chinese)
- [18] 刘维宁, 马蒙. 地铁列车振动环境影响的预测、评估与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
LIU Weining, MA Meng. Prediction, evaluation and control of environmental vibration induced by metro rail transit [M]. Beijing: Science Press, 2014.(in Chinese)
- [19] 城市区域环境振动标准: GB 10070—88[S]. 北京: 中国计划出版社, 1988.
Standard of vibration in urban area environment: GB 10070—88[S]. Beijing: China Planning Press, 1988.(in Chinese)
- [20] 王文斌, 刘维宁, 贾颖绚, 等. 更换减振扣件前后地铁运营引起地面振动的研究[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(1): 87–92.
WANG Wenbin, LIU Weining, JIA Yingxuan, et al. Research on the vibration of the ground caused by metro train operation before and after changing the damping fasteners[J]. China Railway Science, 2010, 31(1): 87–92.(in Chinese)
- [21] 贾颖绚. 地铁列车振源模型及地表振动响应研究[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2016.
JIA Yingxuan. Study on vibration source model and surface vibration response of metro train[M]. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 2016.(in Chinese)