

地基加固对隧道下穿铁路路基车致动力响应的影响

胡博韬^{1,2}, 张小会^{1,2}, 王炳龙^{1,2}, 周顺华^{1,2}, 司金标^{1,2}

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804)

摘要: 通过现场测试及数值模拟, 研究了地表铁路行车作用下地铁隧道下穿铁路路基系统的动力响应规律, 分析了下穿节点地基加固体弹性模量、深度等参数对地表振动及地铁隧道结构的影响。研究表明: 车致地表振动频率由列车轮对分布、轨枕间距及行车速度共同决定; 地基加固增加了下穿系统的车致振动响应, 降低了高频振动的衰减速度; 提升加固体模量, 会增大地表振动加速度; 加固深度提升至隧道底部可有效降低隧道的附加动应力。

关键词: 铁路路基; 振动响应; 数值计算; 下穿系统; 地基加固

中图分类号: U451

文献标志码: A

Dynamic Response of Foundation Reinforcement to Underpass System Under Train Load

HU Botao^{1,2}, ZHANG Xiaohui^{1,2}, WANG Binglong^{1,2}, ZHOU Shunhua^{1,2}, SI Jinbiao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Field tests and numerical simulation were carried out to study the dynamic response of the underpass system of tunneling beneath the railway embankment under the train load. A finite element model has been established to study the effect of the elastic modulus of the reinforced soil and reinforcement depth on the vibration acceleration of ground surface and additional stress of tunnel crown. The results show that the main vibration frequencies

of ground surface are caused by the periodic distribution of train wheels, sleeper spacing and specific driving speeds. The amplification of ground surface vibration and the reduction of the attenuation rate of high frequency vibration appear by the reinforced foundation. The vibration acceleration of the ground surface increases with the increase of elastic modulus of the reinforced soil. The reinforcement depth of the foundation exceed to tunnel buried depth, which can effectively reduce the additional dynamic stress of the tunnel.

Key words: railway embankment; vibration response; numerical simulation; crossing project; foundation reinforcement

我国铁路与城市轨道交通的建设与运营均处在飞速发展阶段, 中国内地共计 45 个城市开通城市轨道交通线路 233 条, 运营线路总长度达 7 978 km, 其中地铁 6 302 km, 占比 79%。随着铁路网和地铁线网密度的不断增加, 二者网络的交叉点越来越多, 其中地铁盾构隧道下穿既有铁路路基是一种常用的交叉穿越形式。

地铁盾构隧道开挖造成周围土体应力释放, 进一步引起上方铁路路基不均匀沉降^[1-6]。受铁路列车动荷载影响, 地铁盾构隧道下穿既有铁路施工控制难度增大。为保障下穿施工安全, 通常在下穿施工前对穿越区域地基进行加固处理。众多学者针对下穿区域加固范围、方法和参数等展开研究。黄龙^[7]以宁波轨道交通 1 号线区间隧道下穿北环线为背景, 研究了下穿区域地基采用旋喷桩进行加固的效果, 发现采用规范法计算得到的地基沉降数值偏小,

收稿日期: 2022-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(51761135109); 上海市自然科学基金(22ZR1466500)

第一作者: 胡博韬(1996—), 男, 博士生, 主要研究方向为铁道工程和盾构隧道下穿路基工程。

E-mail: tjtbht@tongji.edu.cn

通信作者: 张小会(1988—), 男, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为铁道工程和耦合系统动力学。

E-mail: 1988xiaohui@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

进一步基于实测数据对规范方法进行了修正。高志刚^[8]基于实际地铁隧道下穿铁路工程,建立下穿体系的三维有限元模型,分析了铁路地基的加固效果,并通过现场监测验证了地基加固方法的适用性。霍军帅^[9]依托苏州某地铁隧道下穿沪宁城际铁路工程,分析了板桩组合结构的加固效果。

目前关于地铁隧道下穿铁路路基区域加固方案的研究主要集中于施工期,然而在运营期,加固后的下穿节点一方面会导致铁路线路支撑刚度在纵向上的不均匀变化,放大邻近地表振动,另一方面由于加固体对地铁隧道的保护作用,会在一定程度上降低地铁隧道结构的附加动应力。相关学者针对动荷载作用下交叉穿越结构体系的动力响应展开了研究:于鹤然^[10]依托六沾线乌蒙山隧道与新梅花山隧道交叉工程,通过三维有限元仿真计算,研究了列车动荷载作用下交叉结构的振动响应规律。黄希^[11]以实测振动荷载施加于交叉盾构隧道的有限元模拟中,同时考虑混凝土非线性特性,研究了不同列车行驶工况下盾构隧道的动力响应及损伤特性。晏启祥^[12]通过三维有限元模拟,对列车荷载作用下近距离交叠隧道的动力响应进行了研究。同时,部分学者通过现场实测及模型试验等方法研究了动荷载下隧道结构及周边土体动力响应规律^[13-21]。既有研究多集中于单一隧道或交叠隧道的车致动力响应,有关地铁隧道下穿铁路路基系统的车致振动研究较少。

因此,本文基于上海地铁 11 号线某区间隧道下穿既有京沪铁路路基工程,结合实地测量和三维有限元模拟,研究了铁路列车行车作用下地铁隧道—铁路路基系统的动力响应规律,进一步针对下穿节点地基加固参数问题,研究了加固体弹性模量、加固深度和局部加固位置对地表振动及地铁隧道结构附加应力的影响。

1 现场测试

1.1 工程概况

上海地铁 11 号线某区间盾构隧道下穿京沪铁路路基工程平面如图 1 所示,京沪铁路为客货共线国铁 I 级双线电气化铁路,下穿节点处京沪铁路线路中心间距为 6.70m,与下穿隧道相交角度为 85°,下穿节点处京沪铁路轨道结构形式为有砟轨道,道床梯形上部宽度 3.1m,道碴厚度 50cm,道砟下部为 50cm 的砂垫层,道床坡度 1:1.75,道床厚度为 0.35m;采用铁路用标准混凝土轨枕,宽 2.6m,间距

0.6m 布置;扣件类型为弹条 III 型扣件,铁路列车通过下穿节点时行驶速度约为 120km·h⁻¹。

上海地铁 11 号线该区间隧道为常规单圆盾构隧道,隧道顶埋深 11.1m,隧道衬砌外径 6.2m,内径 5.5m,上下行线盾构隧道中心间距为 12.4m。

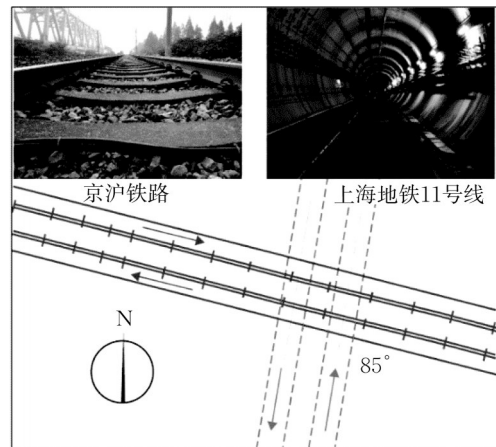


图1 盾构隧道下穿铁路平面图
Fig.1 Intersection of the railway embankment and the metro tunnel

根据施工勘探资料,本场地自地表至 40.0m 深度范围内土层可分为 8 层,其中第②、③、⑤、⑥、⑧层按其土性及土色差异又可分为若干亚层,土层物理力学参数如表 1 所示。

表 1 下穿节点岩土体物理力学参数					
Tab.1 Parameters of the soil					
层序	地层名称	层厚/ m	重度/(kN· m ⁻³)	压缩模 量/MPa	剪切波速/ (m·s ⁻¹)
①1	填土	0.8	17.0	4.5	140
②1	褐黄色粉质黏土	1.1	19.7	6.3	197
②2	灰黄色粉质黏土	1.9	17.5	3.7	131
③1	灰色粉质黏土	6.2	17.2	2.7	105
⑤ 1-1	灰色黏土	4.0	17.7	3.3	124
⑥1	暗绿色粉质黏土	3.8	18.6	6.6	211
⑥2	草黄色黏质粉土 夹粉质黏土	4.6	19.2	7.2	232
⑧ 1-1	灰色黏质粉土	8.88	19.3	7.5	245

为控制下穿点地基变形、保证盾构掘进施工安全,对穿越位置进行了铁路线路主动加固。加固措施及范围如下:铁路两侧采用二重管高压旋喷桩加固;旋喷桩之间为主加固区,采用劈裂注浆加固;旋喷桩外侧各 10m 为次加固区,采用压密注浆加固。旋喷桩加固区自地面至⑥₂层内 1m,桩长 18.28m,主加固区和次加固区加固深度为③₁层顶至⑥₁层顶,即地面以下 3.8m~14.0m。旋喷加固区由 3 排直径为

1.5m的旋喷桩相互咬合形成,咬合量为0.2m,旋喷桩起加固、隔断及控制变形的作用。加固区的技术要求如下:①旋喷加固28d后,无侧限抗压强度不小于1.0MPa;②主加固区,注浆加固后 $P_s \geq 1.0$ MPa;③次加固区,注浆加固后 $P_s = 1.0$ MPa。主加固区与次加固区之间在强度及刚度上要求逐渐降低,形成过渡。加固区平、剖面见图2。

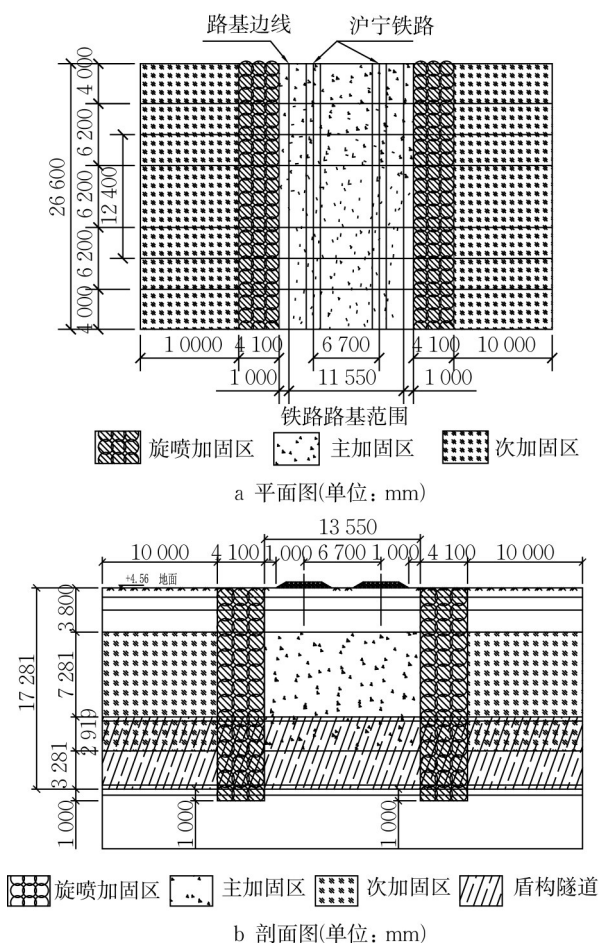


图2 加固区范围

Fig.2 View of the reinforced area

1.2 测点布置

本次测试以振动加速度作为测试物理量,在铁路轨枕、路肩及临近地表布置加速度传感器,沿隧道中轴线上方地表布置测点A1~A5,其中,A1点位于铁路轨枕中心,A2点位于路肩边缘,A3位于路基坡脚外侧,A2~A5测点距京沪铁路线路中心线分别为3.2、8、13和23m。测点平面布置如图3所示。各测点传感器现场安装及固定方式如图4所示,现场测试进行连续数据采集,数据采样频率为5000Hz。

1.3 测试结果分析

以测试数据中某一典型客车通过的振动加速度

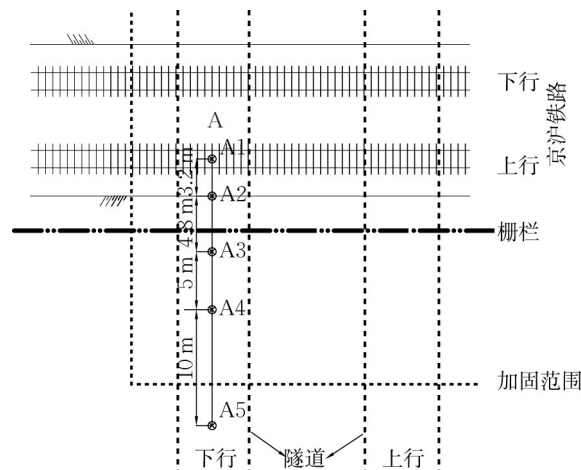


图3 加速度传感器平面布置示意图

Fig.3 Arrangement of the acceleration sensor

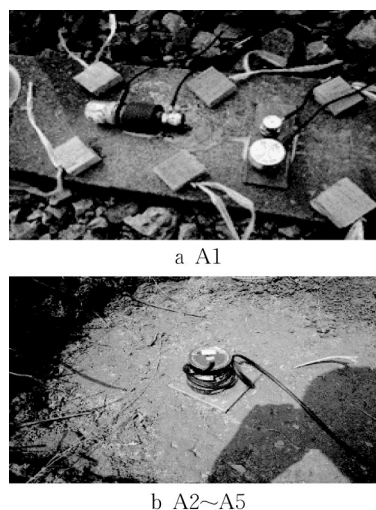


图4 传感器现场安装及固定方式

Fig.4 In-situ arrangement of the sensors.

数据为例进行分析,客车编组为1节机车和16节车厢,列车通过测试断面的速度为 $120\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$,整车通过时间约13s,各测点振动加速度时程曲线如图5所示。其中,轨枕中心振动加速度最大值 $79.8\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$,路肩垂向振动加速度最大值 $0.683\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$,地表各测点垂向振动加速度最大值在 $0.017\sim 0.079\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。由图5可知,A1~A3测点距离线路较近,振动加速度曲线中能够观察到明显的车辆或转向架作用特征。振动传播至A4点经过了大幅衰减,时程曲线已经没有了明显的车辆作用特。随着距铁路中心线距离的增加,地表振动呈现先快速衰减,后缓慢衰减的规律。A1测点位于轨枕中心,本文主要针对临近地表振动响应进行分析,故后续分析中主要针对A2~A5测点的振动响应进行研究。

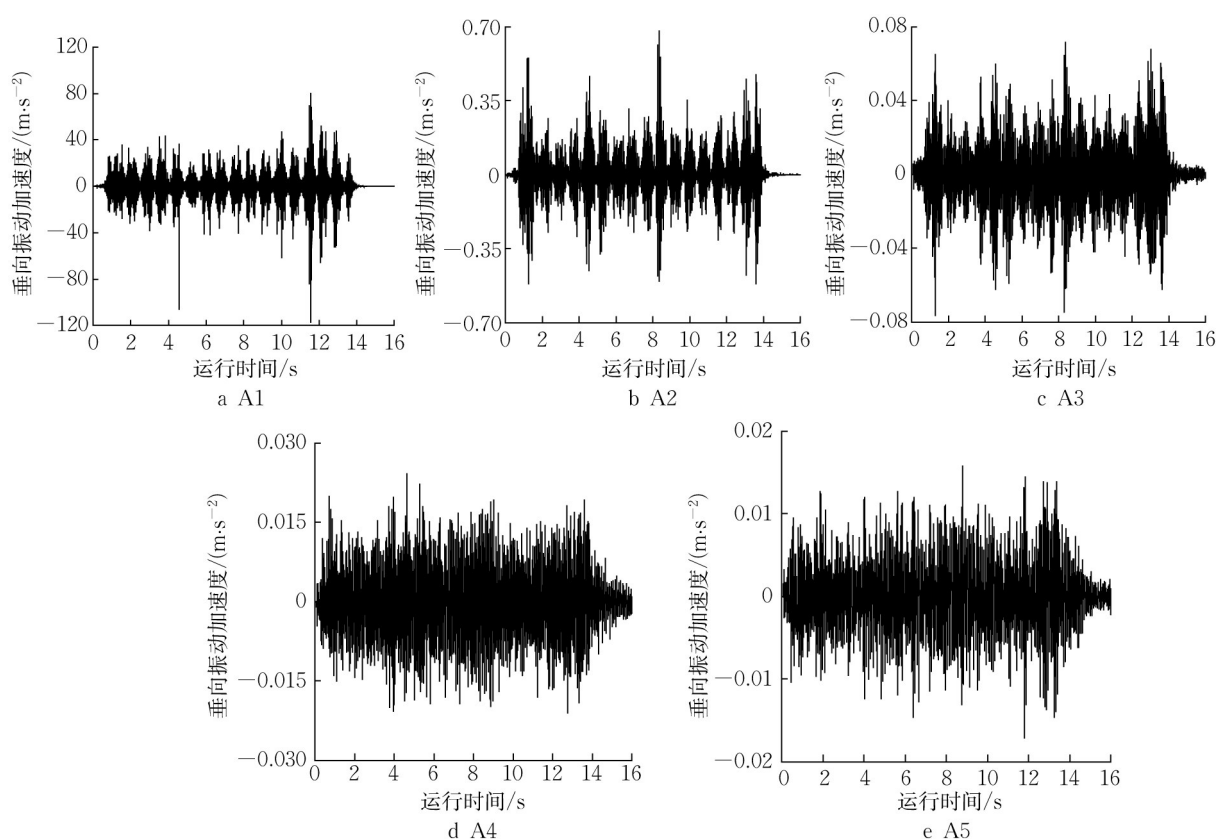


图 5 各测点振动加速度时程曲线

Fig.5 Time history curve of acceleration of measuring pints

2 地基加固对下穿系统振动的影响

现场测试能够真实反映列车运行引起的铁路及地表某些点位的振动响应,但受测点布置范围及密度的限制,测得的振动响应数据有限,通过路基—土体—隧道三维有限元模拟,研究地基加固对下穿系统振动响应的影响规律。

2.1 有限元模拟

2.1.1 路基—土体—隧道有限元模型

建立铁路路基—土体—隧道有限元网格图如图 6 所示,模型沿隧道方向长 100m,铁路方向长 96m,竖向高度为 70m,铁路线路中心线距较近模型边界 38.5m,与现场测点对应的点位距模型边界最近为 39.5m。既有研究表明,对于采用集中质量矩阵的有限元模型,当最小剪切波长 λ_{\min} 大于 6~8 个单元长度时,能获得较高的计算精度^[22];杨永斌^[23]研究了网格划分尺寸对单位简谐荷载作用下半无限域动力响应的影响,结果表明,当单元长度 $L \leq \lambda_{\min}/12$,可得到足够精确的结果。基于此,模型中重点研究区域网格尺寸为 0.25m,逐渐过渡到远场网格尺寸 4m,同时模型边界施加黏弹性边界条件,减小模型

边界对振动波的反射。

模型中涉及到的道床、隧道等材料采用线弹性本构模型,岩土体采用摩尔库伦本构,由于隧道采用整体建模,考虑模拟纵向接头刚度的影响,对隧道刚度进行折减,刚度折减系数取 0.8,结构材料参数如表 2 所示。为方便建模及控制网格数量,将参数相近的加固体及土体参数进行合并处理,地基土层参数如表 1 所示,土体及加固体的阻尼特性采用 Rayleigh 阻尼描述,根据现场实测地表振动加速度频率分布情况,令 5Hz 和 100Hz 时的阻尼比为 0.05,可得到阻尼系数 $\alpha=2.991\ 993$, $\beta=1.515\ 761 \times 10^{-4}$ 。

2.1.2 荷载模拟

本文在轨枕上扣件对应位置施加时程力,扣件力的获取采用雷晓燕^[24]提出的竖向分析动力计算模型。将车辆—轨道耦合系统分解为上部列车子系统和下部轨道子系统。铁路列车使用附有二系弹簧阻尼的车辆模型,每节列车包含车体、两个转向架和 4 个轮对,车体和转向架考虑沉浮振动和点头振动,轮对考虑沉浮振动,单节列车共 10 个自由度,轨道结构从上到下依次建立钢轨、轨枕和道砟 3 层有砟轨道单元模型。铁路列车采用与现场部分列车对应的

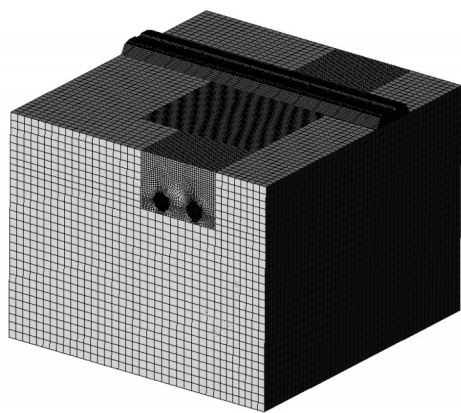


图6 铁路—隧道下穿有限元网格图

Fig. 6 Three-dimension finite element of intersection

表2 结构材料参数

Tab. 2 Parameters of the material

材料	弹性模量/MPa	泊松比
道砟	450	0.30
隧道	27 600	0.20
整体式道床	31 500	0.20
铁路轨枕	31 500	0.20
加固体	300	0.25
路基填土	110	0.30

YZ22车型进行分析,列车模型参数如表3所示。

表3 铁路列车模型参数

Tab.3 Train model parameters

符号	名称	YZ ₂₂
M_c/kg	车体质量	38 500
M_t/kg	构架质量	2 980
M_w/kg	轮对(簧下)质量	1 350
$J_c/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	车体点头惯量	2.446×10^6
$J_t/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	构架点头惯量	3 605
$K_{pz}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	一系悬挂刚度(每轴)	2.14×10^6
$K_{sz}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	二系悬挂刚度	2.535×10^6
$C_{pz}/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	一系悬挂阻尼(每轴)	4.9×10^4
$C_{sz}/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	二系悬挂阻尼	1.96×10^5
l_c/m	车辆定距之半	8.4
l_t/m	转向架轴距之半	1.2
R/m	车轮滚动圆半径	0.457 5

数值模拟中高低不平顺采用波长范围在2~100m的长波不平顺和波长范围在0.35~0.5m的短波不平顺叠加。长波不平顺功率谱密度函数由中国铁科院提出的 $60\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ 跨区间无缝线路轨道不平顺功率谱密度函数计算得到。短波不平顺功率谱密度函数借鉴中国铁科院对石太线轨道垂向不平顺的实测研究成果^[25-26]。

计算模型中考虑了3节相同的车厢,有砟轨道长320m,列车从距离模型边界80m的位置开始运行,运行总长度150m,列车振动荷载如图7所示。

把扣件支反力作为激励,加载到有限元模型中铁路轨枕扣件上,共194个扣件位置施加时程力,扣件力加载位置距模型边界最近为19.2m,采用动力隐式积分算法求解铁路列车行驶的振动响应,时间步长取为0.002s。

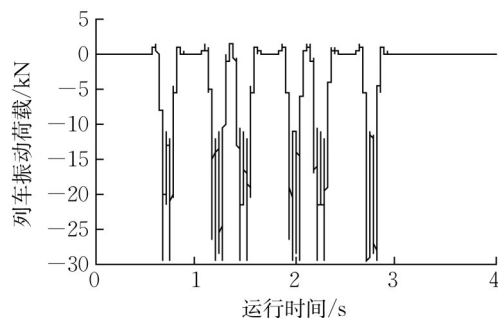


图7 列车振动荷载时程图

Fig.7 Time history curve of the train load

2.2 计算结果分析

为验证有限元模拟的正确性,图8中对比了路肩及地表测点振动加速度功率谱计算值与实测值。从图8中可看出,列车运行引起的振动经碎石道床及土体消散后频率显著降低,通过土体向外传播的频率主要是60Hz以下的振动。路肩(A2)振动能量主要集中在50~60Hz内;A3~A5振动能量主要集中在10~20Hz、50~60Hz两个频带内,且随着振动传播距离的增加,主要振动频带能量由高频(50~60Hz)转向低频(10~20Hz)。

铁路路肩及地表实测垂向振动功率谱峰值出现在11.9Hz、13.1Hz、15.6Hz、16.8Hz附近。而测试工况中2400mm固定轴距的车厢占多数,由轮轴沿不同车厢分布激励产生的振动频率为1.3Hz,相邻车厢的相邻转向架上轮轴激发的频率为3.1Hz、4.0Hz和5.6Hz,机车同一转向架上轮轴激发的频率为7.9Hz、15.2Hz、16.5Hz,车厢同一转向架相邻轮轴激发的频率为13.7Hz。由列车运行速度和车体构造参数计算得到的振动频率与实测频率在0~20Hz内的峰值点基本一致。

对于测试工况,当列车以 $120\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度运行时,轮轴通过间隔0.6m的相邻轨枕引起周期性激励的频率为55.1Hz,而图8中路肩和地表测点垂向振动加速度在50~60Hz频带内的峰值位于55Hz附近,二者基本吻合。考虑到既有线在长期的运营维护中轨枕间距存在一定的偏差,实测数据功率谱分析的频率分辨率也会引起一定误差,由此导致实测由轮轴经过相邻轨枕激发的振动频率是以55.1Hz为中心的一

个频带。因此,对于该段有砟轨道,路肩及地表垂向振动峰值频率主要由列车轮轴的空间周期分布及轮

轴通过相邻轨枕激发,车致地表振动的频率主要集中在 10~20Hz 和 50~60Hz 两个振动频带内。

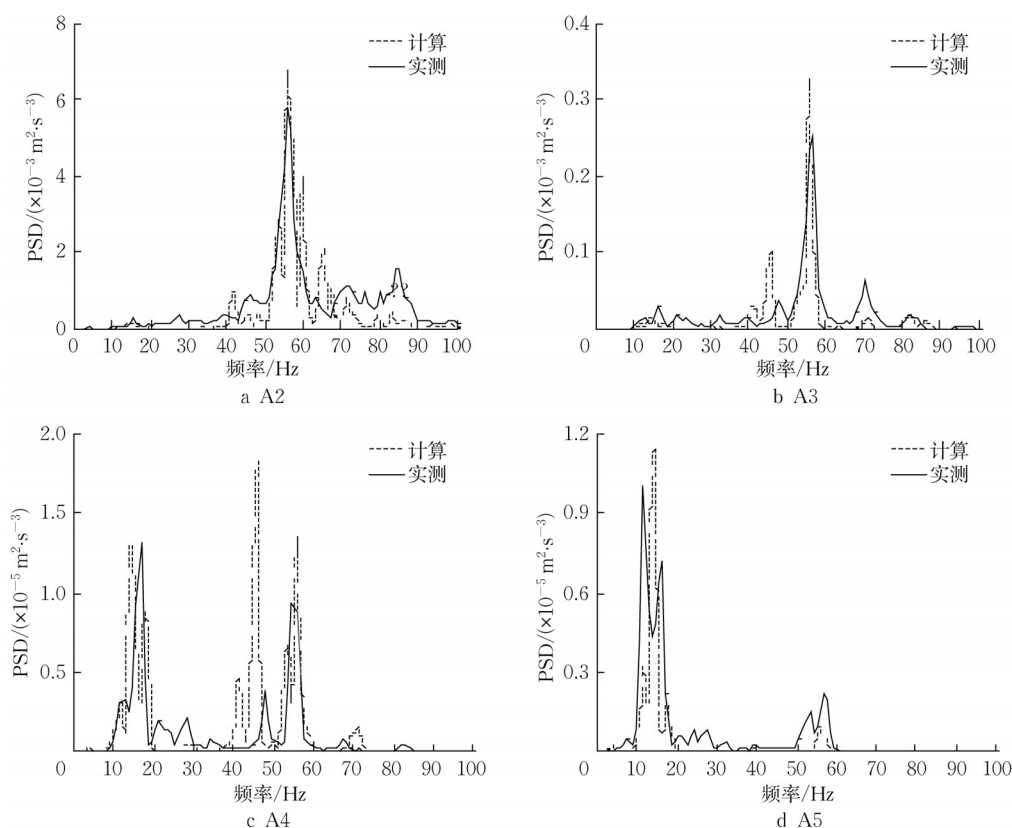


图 8 计算与实测振动加速度功率谱对比

Fig.8 Comparison of the power spectrum distribution

各测点振动加速度功率谱计算值与实测值在 10~20Hz、50~60Hz 两个主要频带内吻合较好,这两个频带内振动能量幅值随传播距离的衰减规律也基本一致。

图 9 对比了实测点位与有限元模型中地表垂向振动加速度时程数据,有限元计算中列车为 3 节相同车厢,故运行时间短于实测数据,从振动幅值、振动频率及时程曲线整体上看,计算结果与实测结果较为吻合。

表 4 为各测点主要振动频带能量占比实测与计算结果对比,可知,随着振动传播距离的增加,10~20Hz 振动能量占比逐渐增加,而 50~60Hz 振动能量则迅速降低。A2 和 A3 测点 10~20Hz 振动能量占比小于 2%,而其 50~60Hz 振动能量占比分别超过 35% 和 15%,而在 A5 测点 10~20Hz 振动能量超过 60%,而其 50~60Hz 振动能量占比小于 5%。总体而言,实测值和数值计算值在主要频率振动能量占比方面吻合较好。

对比分析各测点垂向振动加速度频率特性及主要频带能量占比,有限元模拟与现场实测的动力响应基本一致,验证了模拟的正确性。鉴于此,数值模拟可用于下穿节点地基加固对系统动力响应影响的相关研究。

3 地基加固参数对下穿系统动力响应的影响

使用车辆—轨道耦合动力模型及下穿节点路基—土体—隧道三维有限元模拟,从加固模量、加固深度及区域加固埋深出发,对下穿节点地基加固影响系统动力响应的规律进行研究,选取下穿节点路基和地表垂向振动加速度及地铁隧道拱顶竖向附加动应力作为量化判断标准。

3.1 地基加固体弹性模量

为探究加固体弹性模量对下穿系统振动响应的影响,结合现场实测选取加固体弹性模量值为 300MPa,补充未加固、500MPa、700MPa 及 1 000MPa 加固体弹性模量结果进行定性分析。

图 10 为路基和地表垂向振动加速度最大值随距铁路线路中心线距离的变化关系,由图可知,随着距铁路中心距离增加,下穿系统路基和地表垂向振动加速度曲线可分为 3 个阶段:振动加速度随距离增加而快速降低;振动加速度出现局部放大现象;加

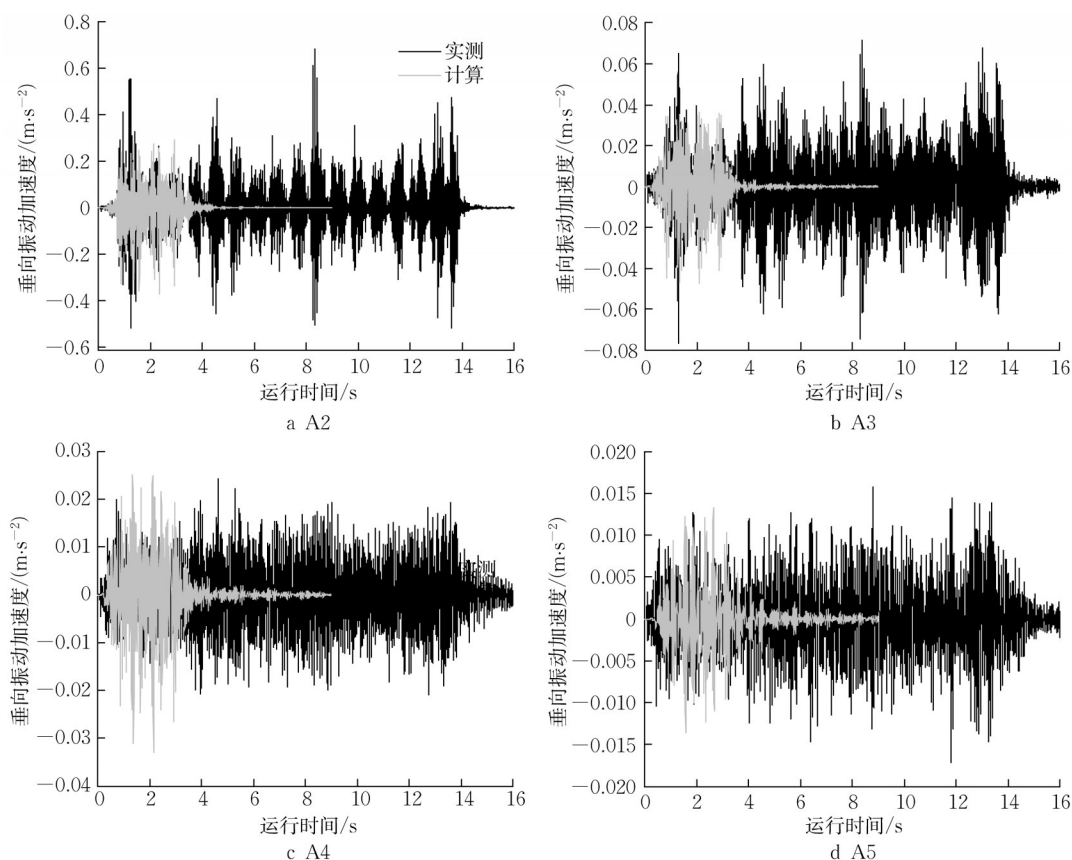


图9 计算与实测振动加速度时程曲线对比

Fig.9 Comparison of the vertical vibration acceleration

表4 主要振动频带能量占比对比

Tab. 4 Comparison of the energy of vibration band

频率	方法	A2	A3	A4	A5
10~20Hz	实测/%	0.8	1.8	17.7	63.2
	计算/%	0.8	1.8	19.4	69.7
50~60Hz	实测/%	37.2	15.7	8	0.8
	计算/%	42.4	24.1	12.3	0.8

速度幅值逐步降低并趋于零。结合频谱分析可知,振动传播初期,振动传播过程中的高频成分较多,传播过程中在土体阻尼的滤波作用下,高频成分快速衰减,所以振动加速度值下降较快,振动传播至一定距离后,地表振动主要集中在低频振动,低频振动衰减缓慢,曲线走势平缓。

与未加固工况相比,当加固模量为300MPa时,振动加速度最大值增大7.5%。随着加固体弹性模量增加,振动加速度整体呈现增大趋势,加固模量增大导致隧道下穿系统刚度增大,距离增至13m后,各工况振动加速度峰值曲线均趋于收敛,加固体参数对地表振动水平的影响主要体现在近轨道区域内。

选取加固区内A2、加固区外A5位置进行1/3倍频程振动级分析,由图11可知,不同加固模量下测点振动频率均集中于12.5~25Hz及50~63Hz。加固

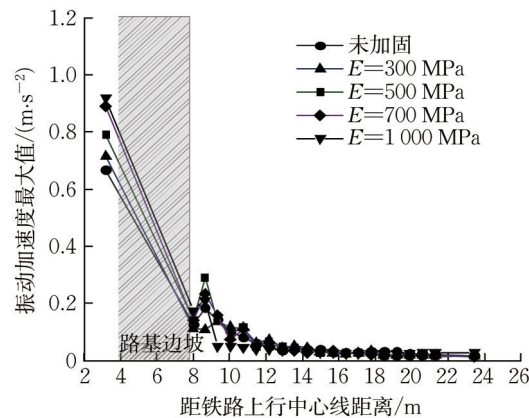


图10 不同加固模量下地表振动加速度随距离的变化

Fig.10 Comparison of vibration acceleration of different reinforcement modulus

模量增大使A2测点低频振动能量减少,结合振动传播规律可知,土体加固使下穿系统刚度增大,高频振动衰减速度减慢。随着距铁路中心线距离的增大,50~63Hz振动加速度级显著降低,12.5~25Hz较少,即高频振动衰减幅度明显大于低频振动。

为研究加固体弹性模量变化对下部隧道拱顶竖向附加动应力的影响,选取铁路轨枕上的A1测点对

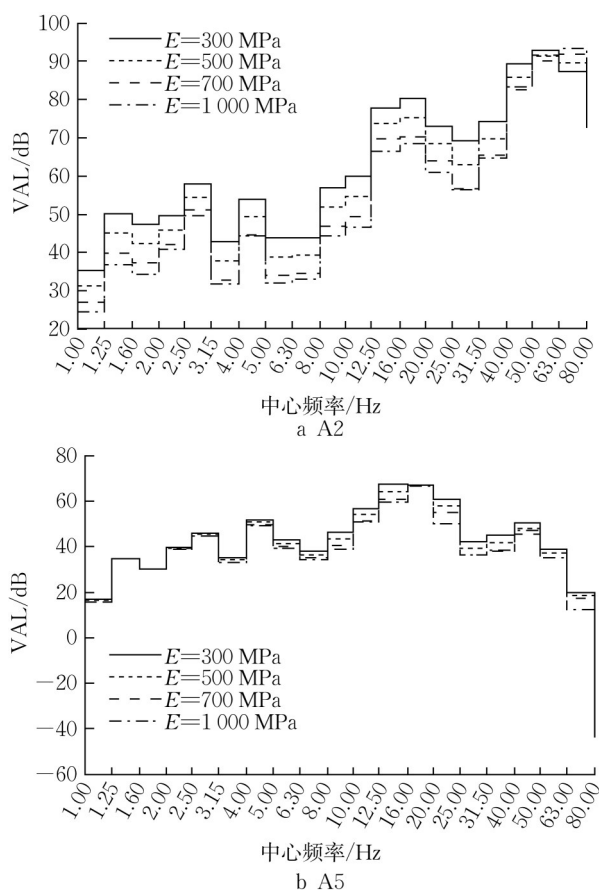


图 11 不同加固模量下 1/3 倍频程地表竖向振动加速度级
Fig.11 One-third octave band spectra of vertical acceleration level of different reinforcement modulus

应的地铁隧道断面为研究断面,图 12 为各弹性模量下隧道拱顶附加动应力最大值变化曲线,由图可知,在列车运行通过观测断面的过程中,地铁隧道拱顶附加动应力呈现逐渐增加、振荡变化、逐渐减小的规律。加固体弹性模量从 300MPa 增加到 1 000 MPa,地铁隧道拱顶应力最大值减小 45.16%。综合来看,提高地基加固弹性模量增大地表竖向振动,但可有效减小隧道结构附加动应力,需要综合考虑环境振动控制与隧道结构安全进行设计。

3.2 地基加固深度

为探究下穿系统地基加固深度对铁路运行引起的环境振动和下穿隧道的结构附加动应力的影响,在加固体弹性模量设置为 300MPa 时,设置 3 种不同加固深度:5m、11m(加固至隧道拱顶)、17m(加固至隧道底)。

图 13 为路基和地表振动加速度最大值随距离变化曲线,地表振动加速度最大值随加固深度的增加而增大。由图 14 可知,不同加固深度下各测点振动频率集中于 12.5~25Hz 及 50~63Hz。当加固深

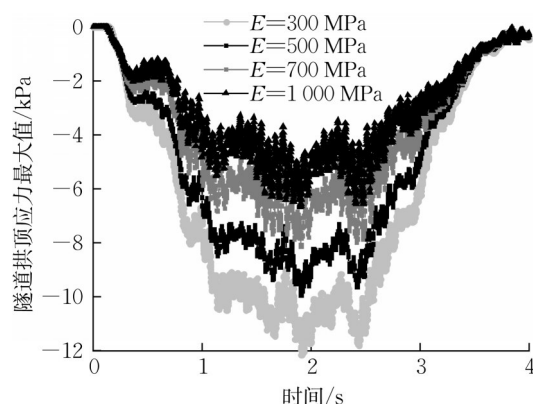


图 12 不同加固模量隧道拱顶附加应力最大值
Fig.12 Comparison of additional stress of different reinforcement modulus

度由 5m 增至 11m 时,加固区内 12.5Hz~25Hz 频率范围内增加了 15~20dB,50~63Hz 地表振动加速度级基本不变,加固深度增大使低频振动衰减变慢。加固区外,加固深度变化对地表振动影响不大。

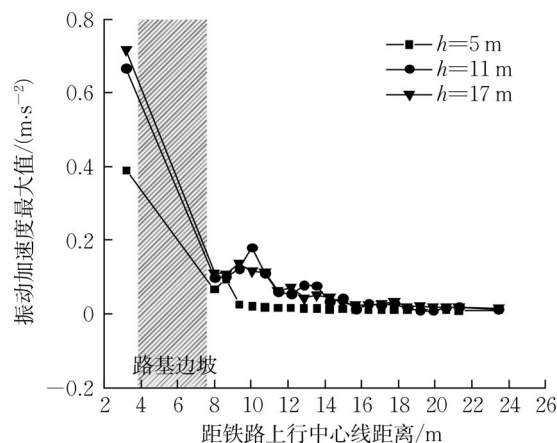


图 13 不同加固深度地表振动加速度最大值对比
Fig.13 Comparison of vibration acceleration of different reinforcement depth

图 15 为地铁隧道拱顶竖向附加动应力最大值变化曲线,由图可知,随加固深度的增加,下穿隧道顶部附加动应力最大值由 15.67kPa 减小至 12.16kPa,降低约 22.4%。综合分析可知,地基加固至隧道底部提升了下穿系统整体刚度,地表振动响应增大,但改善了隧道结构受力,降低上部铁路列车运行对下穿隧道结构的动力影响,保障下穿节点盾构隧道的长期服役性能。

3.3 局部加固范围

铁路路基加固方式分为两种,其一为整体地基加固,即从地基表面开始向下进行加固,其二为局部加固^[27],即对地基表面下某一深度范围内的土体进

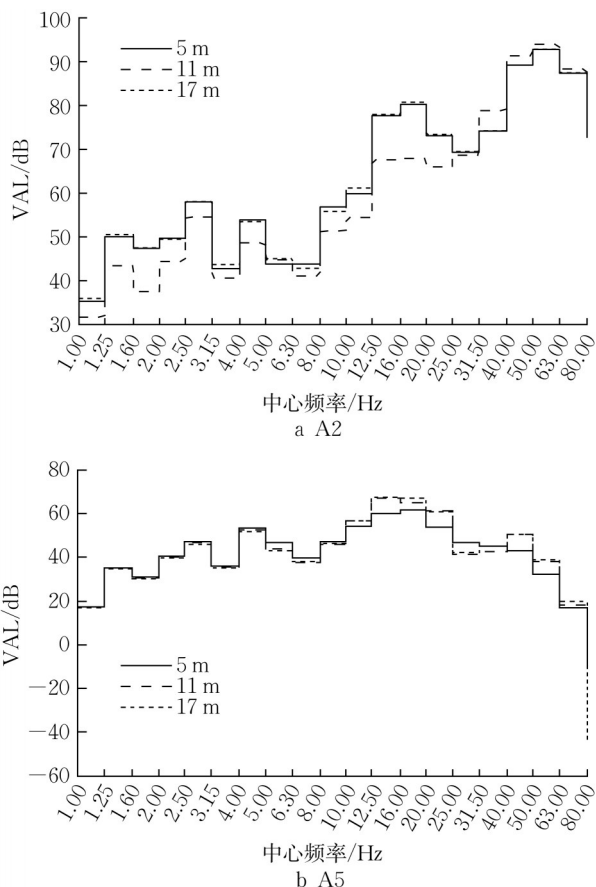


图 14 不同加固深度 1/3 倍频程地表竖向振动加速度级
Fig.14 One-third octave band spectra of vertical acceleration level of different reinforcement depth

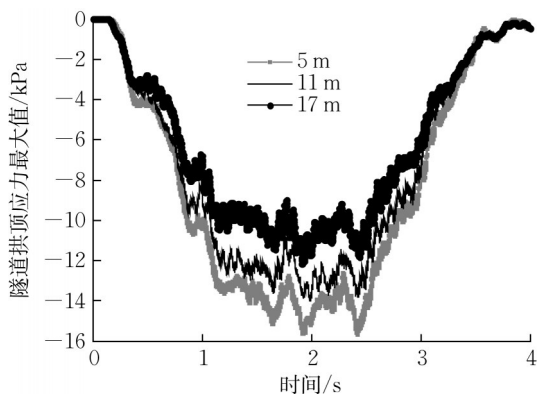


图 15 不同加固深度隧道拱顶附加应力最大值
Fig.15 Comparison of additional stress of different reinforcement depth

行加固,所形成的加固块体对振动传播产生影响。为探究局部加固深度对振动传播的影响,设置加固范围为:0~2m、4~6m、6~8m、8~10m。

由图 16 可知,随着局部加固范围逐渐靠近隧道,地表振动加速度最大值先增大后减小,加固范围为 0~2m 时,列车行车振动引起的地表振动加速度

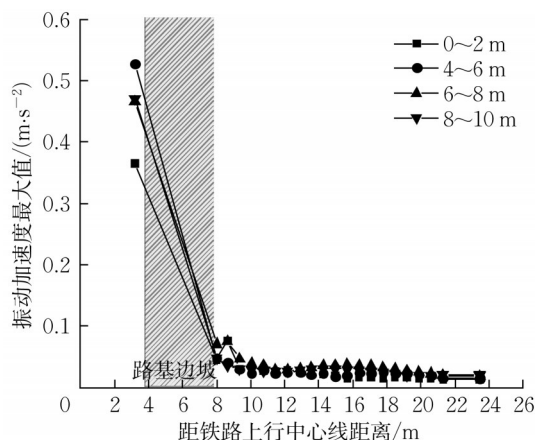


图 16 不同加固范围地表振动加速度最大值对比
Fig.16 Comparison of vibration acceleration of different reinforcement scope

最小。对 A2、A5 测点进行 1/3 倍频分析,由图 17 可知,各测点振动加速度频率集中于 12.5~25Hz 及 50~63Hz。加固区内,低频地表振动加速度级随局部加固深度的增大先增加后减小。从 A2 至 A5 测点,50Hz~63Hz 频率范围内振级衰减了 80~100dB,

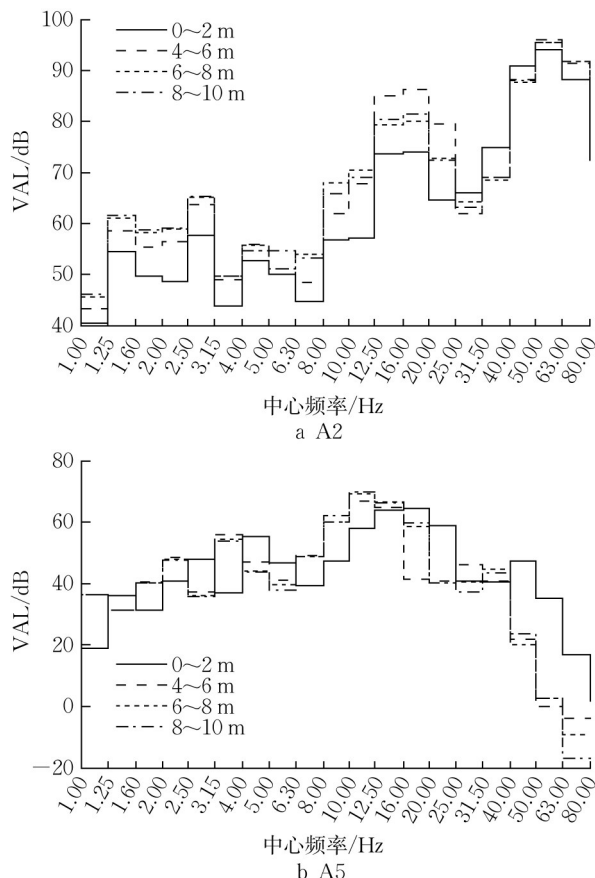


图 17 不同区域加固范围 1/3 倍频地表竖向振动加速度级
Fig.17 One-third octave band spectra of vertical acceleration level of different reinforcement scope

12.5~25Hz 范围内衰减了 10~25dB,即高频振动衰减幅度明显大于低频振动,

图 18 为不同局部加固深度隧道拱顶竖向附加动应力变化曲线,随局部加固深度的增加,隧道拱顶附加动应力先增大后减小。当加固范围为 8~10m 时,加固体与隧道结构协同受力,减小了列车动荷载引起的隧道结构附加应力。综合来看,从地基表面开始加固可有效控制地表振动及隧道附加振动响应,保障隧道结构安全。

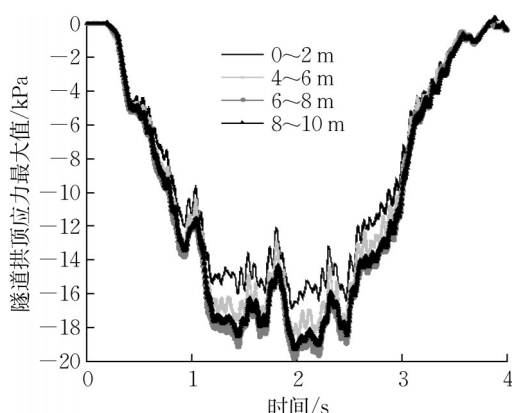


图 18 不同加固范围拱顶竖向附加应力最大值

Fig.18 Comparison of additional stress of different reinforcement depth

4 结论

本文依托上海地铁 11 号线地铁盾构隧道下穿既有京沪铁路路基工程,通过现场实测,分析了铁路列车运行引起的路肩及临近地表的振动加速度响应。建立与实际工程对应的三维有限元模型,通过与实测结果的对比分析,验证了有限元模拟的可靠性。在此基础上,以邻近铁路地表振动加速度及下穿隧道附加动应力最大值作为评价指标,分析了地基加固对下穿系统动力响应的影响,得到以下结论:

(1)铁路列车运行引起的地表振动主要频率集中在 10~20Hz 和 50~60Hz 频带内,这主要由列车轮对的周期分布、轨枕间距及特定的行车速度共同激发。随着距铁路中心距离的增加,50~60Hz 地表振动迅速衰减,10~20Hz 地表振动衰减缓慢。

(2)地基加固加剧了下穿系统车致振动响应。当加固模量为 300MPa 时,铁路路肩地表振动加速度最大值较未加固时增大 7.5%。加固体模量增大使铁路列车运行引起的地表振动加速度峰值增大,而隧道拱顶竖向附加动应力降低,地基加固增大了下穿系统刚度,降低了高频振动衰减速度。

(3)随着加固深度的增大,地表振动加速度增大,加固至隧道底可有效减小隧道拱顶附加动应力,利于保障隧道结构长期服役安全。加固体厚度一定时,随着局部加固深度的增大,地表振动加速度先增大后减小,隧道拱顶竖向附加应力增大,从地基表面开始加固可有效控制地表振动及隧道动力响应。因此,地铁隧道下穿铁路路基节点的加固设计需要优化地基加固方法、加固范围等参数,保障施工期工程安全和降低运营期车致环境振动影响。

作者贡献声明:

胡博韬:处理数据,撰写文稿;
张小会:确定文稿,修改文稿;
王炳龙:现场实测数据;
周顺华:论文框架指导;
司金标:有限元模型建立。

参考文献:

- [1] 雷震宇,周顺华,许恺.铁路下穿式结构施工受轮轨作用力的影响分析[J].中国铁道科学,2003,24(6):70.
LEI Zhenyu, ZHOU Shunhua, XU Kai. Dynamic analysis of wheel/rail interaction during construction of tunnel under Railway[J]. China Railway Science, 2003, 24 (6):70.
- [2] 吕培林,周顺华.软土地区盾构隧道下穿铁路干线引起的线路沉降规律分析[J].中国铁道科学,2007,28(2):12.
LV Peilin, ZHOU Shunhua. Analysis on upper rail settlement in soft ground resulting from shield tunneling across main rail line[J]. China Railway Science, 2007, 28(2):12.
- [3] 杜虎.不良地层盾构区间穿越既有铁路技术研究[J].铁道工程学报,2020,37(4):63.
DU Hu. Research on the technology of shield tunneling through existing railway in weak stratum [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(4):63.
- [4] 缪林昌,王非,吕伟华.城市地铁隧道施工引起的地面沉降[J].东南大学学报(自然科学版),2008(2):293.
MIU Linchang, WANG Fei, LV Weihua. Ground surface settlement due to urban tunnel construction [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2008(2):293.
- [5] 周顺华,高渠清,崔之鉴.开挖应力释放率计算模型[J].上海力学,1997(1):91.
ZHOU Shunhua, GAO Quqing, CUI Zhijian. The algorithmic model of the release ratio of excavation stress [J]. Shanghai Journal of Mechanics, 1997, 18(1):91.
- [6] DI H G, ZHOU S H, YAO X P, et al. In situ grouting tests for differential settlement treatment of a cut and cover metro tunnel in soft soils[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80:6415
- [7] 黄龙,周顺华,宫全美.软土地区盾构隧道下穿新建铁路的地基处理方案研究[J].城市轨道交通研究,2013,16(2):56.
HUANG Long, ZHOU Shunhua, GONG Quanmei. Analysis

- on foundation treatment in soft soil crossed underground by shield tunneling[J]. *Urban Mass Transit*, 2013, 16(2): 56.
- [8] 高志刚, 冯超. 地铁隧道下穿既有铁路施工时的地基加固分析[J]. *城市轨道交通研究*, 2015, 18(6): 105.
GAO Zhigang, FENG Chao. Analysis of foundation reinforcement for metro tunnel crossing under existing railway [J]. *Urban Mass Transit*, 2015, 18(6): 105.
- [9] 霍军帅, 王炳龙, 周顺华. 地铁盾构隧道下穿城际铁路地基加固方案安全性分析[J]. *中国铁道科学*, 2011, 32(5): 71.
HUO Junshuai, WANG Binlong, ZHOU Shunhua. Safety analysis of foundation reinforcement scheme for shield tunnel under-passing intercity railway [J]. *China Railway Science*, 2011, 32(5): 71.
- [10] 于鹤然, 周晓军. 高速列车动荷载作用下立体交叉铁路隧道动力响应研究[J]. *铁道学报*, 2015, 37(6): 103.
YU Heran, ZHOU Xiaojun. Study on dynamic response of grade-separated railway tunnels under high-speed train induced dynamic load [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2015, 37(6): 103.
- [11] 黄希, 晏启祥, 陈诚, 等. 列车振动荷载作用下交叉盾构隧道动力响应与损伤分析[J]. *铁道建筑*, 2016(8): 60.
HUANG Xi, YAN Qixiang, CHEN Cheng, *et al.* Dynamic response and damage analysis of spatial intersecting shield tunnels under vibration load of train [J]. *Railway Engineering*, 2016(8): 60.
- [12] 晏启祥, 陈文宇, 陈行, 等. 近距离垂直交叠盾构隧道的列车振动响应特性及损伤规[J]. *中国铁道科学*, 2018, 39(4): 78.
YAN Qixiang, CHEN Wenyu, CHEN Xing, *et al.* Train vibration response characteristics and damage rule of vertically overlapping shield tunnels in close distance space [J]. *China Railway Science*, 2018, 39(4): 78.
- [13] YANG W B, CUI G, XU Z Y, *et al.* An experimental study of ground-borne vibration from shield tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 71: 244.
- [14] DENG F H, MO H H, ZENG Q J, *et al.* Analysis of the dynamic response of a shield tunnel in soft soil under a metro-train vibrating load [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2006, 16(4): 509.
- [15] HUANG J, YUAN T Y, PENG L M, *et al.* Model test on dynamic characteristics of invert and foundation soils of high-speed railway tunnel [J]. *Earthquake Engineering & Engineering Vibration*, 2015, 14: 549.
- [16] ZHANG X, ZHOU S, HE C, *et al.* Transportation Geotechnics Experimental investigation on train-induced vibration of the ground railway embankment and under-crossing subway tunnels [J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 26: 100422.
- [17] LOPES P, RUIZ J F, COSTA P A, *et al.* Vibrations inside buildings due to subway railway traffic [J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 568: 1333.
- [18] JIN Q, THOMPSON D J, LURCOCK D E J, *et al.* A 2.5D finite element and boundary element model for the ground vibration from trains in tunnels and validation using measurement data [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 422: 373.
- [19] 高峰, 郭剑勇. 列车荷载作用下地铁区间双层隧道模型试验研究[J]. *铁道学报*, 2011, 33(12): 93.
GAO Feng, Guo Jianyong. Research on model test of double-decked subway tunnel under train vibration loading [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2011, 33(12): 93.
- [20] 牌立芳, 吴红刚. 地震作用下立体交叉下穿隧道动力响应振动台试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(1): 88.
PAI Lifang, WU Honggang. Shaking table test study on dynamic responses of underpass tunnels under earthquake [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(1): 88.
- [21] 黄强, 万灵, 刘干斌, 等. 软土隧道地铁振动效应现场实测与数值分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(3): 435.
HUANG Qiang, WAN Ling, LIU Ganbin, *et al.* Field measurement and numerical analysis of train-induced vibration effect on metro tunnel in soft ground [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2021, 51(3): 435.
- [22] 廖振鹏. 工程波动理论导论[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
LIAO Zhenpeng. Introduction to wave motion theories in engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [23] 杨永斌. 高速列车所引致之土壤振动分析[R]. 台北: 台湾大学, 1995.
YANG Yongbin. Analysis on soil vibration induced by high-speed railways [R]. Taipei: Taiwan University, 1995.
- [24] 雷晓燕. 高速铁路轨道动力学: 模型、算法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
LEI Xiaoyan. High speed railway track dynamics: model, algorithm and application [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [25] 罗林, 魏世斌. 我国干线轨道不平顺功率谱的研究[R]. 北京: 铁道部科学研究院, 1999.
LUO Lin, WEI Shibin. Study on PSD of track irregularity of our country's main line [R]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 1999.
- [26] 中华人民共和国铁路局. 高速铁路无砟轨道不平顺谱: TB/T 3352—2014[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
National Railway Administration of the People's Republic of China. Power spectrum density of ballastless track irregularities of Chinese high-speed railway: TB/T 3352 — 2014 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014.
- [27] THOMPSON D J, JIANG J, TOWARD M G R, *et al.* Mitigation of railway-induced vibration by using subgrade stiffening [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, 79: 89.