

高速铁路单洞双线盾构隧道的振动和传播规律分析

肖明清^{1,2}, 薛光桥^{1,2}, 何应道^{1,2}, 徐晨^{1,2}, 徐巍^{1,2}, 王春晖^{3,4}

- (1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063; 2. 水下隧道技术国家地方联合工程研究中心, 武汉 430063;
3. 山东建筑大学土木工程学院, 济南 250101; 4. 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 深圳 518067)

摘要:针对高速铁路单洞双线盾构隧道的振动传播问题,建立轨道-隧道-场地的2.5维有限元-基本解耦合模型,采用有限元模拟轨道与盾构隧道结构,结合弹性空间格林函数表征围岩介质。通过计算移动轮轨力作用下的动力响应,结合弹性波理论分析振动传播规律。结果表明:隧道上方场地的竖向振动由顶部纵波主导,两侧竖向振动由横波控制;当土层波阻抗从隧道围岩向地表递减时,隧道顶部扩散的柱面纵波经土层界面后趋近平面波特性,侧方横波经界面透射后竖向位移分量显著降低。单洞双线隧道振动分布呈现显著频率相关性:低频振动(0~20 Hz)在隧道正上方地表响应最大,高频振动(40~80 Hz)在偏离隧道中心线一定距离处达到峰值。隧道结构对20 Hz以上振动产生遮挡效应,导致下方围岩振动向上绕射衰减。地表竖向位移分布由频率相关的隧道辐射模式控制,分层土中的波阻抗变化使纵波成为地表振动主导成分。研究揭示了单洞双线盾构隧道振动传播的三维空间特性,明确了低频振动集中传播与高频振动侧向辐射的差异化规律,为城市高铁隧道减振设计提供理论依据。

关键词:盾构隧道; 环境振动; 2.5维有限元-基本解; 弹性波; 单洞双线隧道; 高速铁路

中图分类号:U238; U455.43 **文献标识码:**A **DOI:**10.13238/j.issn.1004-2954.202501130008

Analysis of Vibration Propagation Mechanisms in High-speed Railway Shield Tunnels with Single-Tube Double-Track Configuration

XIAO Mingqing^{1,2}, XUE Guangqiao^{1,2}, HE Yingdao^{1,2}, XU Chen^{1,2}, XU Wei^{1,2}, WANG Chunhui^{3,4}

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China;

2. Subaqueous Tunnel Technology National Engineering Research Center, Wuhan 430063, China;

3. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

4. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518067, China)

Abstract: To address the issue of vibration propagation in single-tube double-track shield tunnels for high-speed railways, a 2.5-dimensional finite element method-method of fundamental solution (2.5D FEM-MFS) model for track-tunnel-site system was developed. This model employed finite elements to simulate the track and shield tunnel structures, while elastic space Green's functions characterized the surrounding rock medium. By calculating the dynamic response under moving wheel-rail forces and analyzing vibration propagation patterns through elastic wave theory, the mechanisms were investigated. The results indicated that the vertical vibration above the tunnel was dominated by P-waves from the tunnel crown, while the vertical vibration from sidewalls was governed by S-waves. When the soil layer's wave impedance decreased from the tunnel periphery to the ground surface, cylindrical P-waves diffusing from the tunnel crown gradually approached plane wave characteristics after passing through soil layers,

while transmitted S-waves exhibited a significant reduction in vertical displacement components. The vibration distribution in single-tube double-track tunnels demonstrated notable frequency-dependent characteristics. Low-frequency vibrations (0 to 20 Hz) exhibited maximum surface responses directly above the

收稿日期:2025-01-13; 修回日期:2025-02-09; 网络首发日期:2025-03-10

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2024QE148); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2023A1515111138); 中铁第四勘察设计院集团有限公司科技研究开发计划课题(KY20230355)

作者简介:肖明清(1970—),男,全国工程勘察设计大师,正高级工程师,工学博士,主要从事隧道和地下工程设计研究工作,E-mail:tsyxmq1419@163.com。

通信作者:王春晖(1991—),男,讲师,工学博士,主要从事轨道交通振动分析与减振研究工作,E-mail:wangchunhui23@sdjzu.edu.cn。

tunnel, whereas high-frequency vibrations (40 to 80 Hz) reached their peak at a lateral offset from the tunnel centerline. The tunnel structure induced a shielding effect for vibrations above 20 Hz, leading to diffraction-induced attenuation of upward-propagating vibrations in the surrounding rock. Surface vertical displacement patterns were governed by frequency-dependent tunnel radiation modes, with P-waves as the dominant contributor to ground vibrations due to wave impedance variations in layered soils. This study reveals the three-dimensional spatial characteristics of vibration propagation in single-tube double-track shield tunnels, clarifies the differentiated mechanisms of concentrated low-frequency propagation versus lateral high-frequency radiation, providing a theoretical basis for vibration reduction design in urban high-speed railway tunnels.

Key words: shield tunnel; environmental vibration; 2.5D finite element method-method of fundamental solution (2.5D FEM-MFS); elastic waves; single-tube double-track tunnel; high-speed railway

引言

我国高速铁路的快速发展给人民生活带来巨大便利,而由此产生的环境振动问题也日益突出。为避免新建高速铁路对既有城市的分割,减少工程拆迁量,降低高速铁路运行的振动和噪声影响,地下线取代地面线和高架线,成为城市新建高铁的主要方式。

列车运行不可避免地对沿线建筑产生振动影响^[1-3]。目前基于行车安全性考虑,高速铁路通常采用降低运行速度和增大隧道埋深的方法降低振动影响^[4],而没有采用城市轨道交通中常用的轨道减振措施^[5]。因此,厘清高速铁路盾构隧道的振动和传播规律,对高速铁路融入既有城区的隧道选线 and 设计具有重要意义。

列车地下线的现场振动测试是认识隧道振动和传播规律的宝贵资源。楼梦麟等^[6]测试了上海地铁某线沿线环境振动,发现地铁列车引起的地面振动频率集中在 40~90 Hz,振动在衰减过程中存在回升区。李平等^[7]测试了武广高速铁路金沙洲隧道的高速列车振动影响,测试断面的轨面埋深分别为 15 m 和 35 m,15 m 轨面埋深时地面振动在 30~60 m 范围振动基本相当,相比隧道正上方衰减 5~6 dB,35 m 轨面埋深时地面振动在 30 m 时衰减 3~5 dB。孙成龙^[8]测试了莞惠城际铁路、佛肇城际铁路地下线和广深港高铁香港地下段的环境振动,指出地面振动存在 2 个特征频率,分别对应轮对间距和轨枕间距,而且对应轮对间距的特征频率在地面衰减不显著。QU 等^[9]研究列车环境振动对精密仪器的影响,发现对于埋深约为 13.5 m 的隧道,最大振动响应位于距离隧道中线 20 m 处,0~30 Hz 频率范围对精密仪器有严重影响。HUANG 等^[10]开展上海地铁 9 号线醉白池站与松江南站之间的列车振动影响,地面竖向加速度在垂直隧道方向呈圆弧状减小,距离隧道中心 20~30 m 的地表存在加速

度放大区。ZHANG 等^[11]测试了上海地铁 11 号线引起的地面和隧道振动,地面振动在垂直隧道方向,振动先减小后增大再减小。FUJII 等^[12]对东京地区的一条双线盾构隧道进行振动测试和模拟分析,场地中大于 50 Hz 的振动成分随着接近地表而明显衰减,在 16 Hz 和 31.5 Hz 振动成分在接近地表时振动有所放大;在距离隧道中心线 30 m 范围内地表各方向振动均未观察到明显的衰减,而且地表振动最大值并不总是在隧道中心线以上。QU 等^[13]研究深圳某地铁站进出段列车引起的振动特性,通过现场测试分析轨道和地面在不同条件下的振动响应,发现随着距离增加,地面的水平和竖向振动均出现振动放大区域,竖向地面振动放大主要集中在 63~80 Hz,增幅为 4.8 dB;水平振动放大在 40~80 Hz,增幅为 6.6 dB。这些测试结果主要从宏观上给出了地表振动的规律。

除了现场振动测试,理论和数值分析方法也是研究隧道振动影响的另一个主要手段。目前主要方法有 PiP 理论分析模型、2.5 维有限元-边界元/无限元耦合分析模型和三维有限元分析模型等。GUPTA 等^[14]采用有限元-边界元周期模型和管中管模型对隧道的振动影响进行参数化分析,指出隧道振动以同心波向外辐射,在距隧道一定距离后以横波辐射向上,由于隧道深度决定了地面观测点到隧道的距离,是隧道上方自由场响应的关键影响因素。HU 等^[15]研究移动荷载作用下隧道-多层饱和土的振动传递,振动的高频成分从隧道到地表衰减明显,而低频分量增大。YANG 等^[16]采用 2D 有限/无限单元方法研究地下隧道的波传播,随着基岩深度增加,地表响应共振峰值的频率增大。YUAN 等^[17]采用波函数法研究地下隧道的振动,隧道壁的振动被看作是出射波和柱面波的叠加,指出从隧道向上辐射的柱面波在到达地表时具有较大的曲率半径,可近似视为垂直入射。FORREST 和 HUNT^[18]采用 PiP 模型研究轨道-隧道-场地耦合模型的振动,

指出隧道振动最大的位置位于隧道下方和两侧,导致隧道上方地表振动相对较小。XU等^[19]研究地表振动放大区的形成条件。作者查阅的文献都重点关注分析方法本身,没有重点分析隧道振动的特点和传播规律。

随着国产大型盾构机技术的突破,单洞双线盾构隧道已成为高铁隧道设计常采用的结构形式^[20-21],如宁宣铁路江宁隧道、朱肇江铁路圭峰山隧道、深汕铁路坪山东隧道等^[22],其截面形式与单洞单线隧道和马蹄形隧道存在显著差异,其振动及振动传播规律尚需进一步研究。本文针对高速铁路单洞双线盾构隧道的振动和传播问题,建立盾构隧道和场地的2.5维有限元-基本解模型,采用有限元模拟轨道和盾构隧道、弹性空间的格林函数解析解模拟周围场地。在此基础上,依托宁宣高铁江宁隧道,计算单个移动轮轨力作用下隧道和场地的位移响应,并基于弹性波的基本理论分析隧道、场地断面和地表的振动传播规律。

1 振动分析方法

1.1 列车-轨道-隧道-场地耦合系统

盾构隧道的列车致振问题涉及车辆、轨道、隧道和场地四部分。该振动问题中轮轨作用力是车辆和钢轨的联系纽带,扣件力是钢轨和轨道-隧道-场地的联系纽带。在频率-波数域车辆-钢轨系统的运动方程为

$$(\delta_{\text{rail}} + \delta_{\text{train}} + \delta_c) \mathbf{P} = \delta_l \quad (1)$$

式中, δ_{rail} 和 δ_{train} 分别为钢轨和车辆的动柔度矩阵; δ_c 为轮轨线性接触模型的动柔度矩阵; δ_l 为轮轨接触点的不平顺幅值向量; $\mathbf{P}$ 为轮轨作用力向量。需注意,由于轨道不平顺幅值为沿轨道方向波数 β 的函数,对于速度为 c 的移动荷载,由关系 $\Omega = \beta c$,可知轮轨作用力 $\mathbf{P}$ 是由不同波数的轨道高低不平顺造成的不同频率的简谐移动荷载。

钢轨在轮轨作用力和扣件力作用下的平衡关系为

$$(\delta_{\text{rail}}^{-1} + \delta_{\text{Fa-TS}}^{-1})(\delta_{\text{Fa-TS}} \mathbf{F}) = \mathbf{P} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{F}$ 为扣件力向量; $\delta_{\text{Fa-TS}}$ 为扣件和轨道-隧道-场地在扣件位置处的串联动柔度矩阵; $(\delta_{\text{rail}}^{-1} + \delta_{\text{Fa-TS}}^{-1})$ 为钢轨-轨道-隧道-场地在轮轨作用力位置的动刚度矩阵。扣件处的动柔度为

$$\delta_{\text{Fa-TS}}(i, i) = \delta_{\text{TS}} + 1/k_p \quad (3)$$

式中, δ_{TS} 为轨道-隧道-场地在扣件位置处的动柔度; k_p 为单位长度扣件的动刚度。

给定轨道不平顺向量 δ_l 后,即可由式(1)~式(3)确定扣件力向量 $\mathbf{F}$,再由轨道-隧道-场地模型的传递函数求得轨道-隧道-场地中任意位置的动态响应。本文重点分析单位移动轮轨力作用下的振动响应,不考虑具体车辆和轨道不平顺,钢轨的动柔度由黏弹性

扣件支承的欧拉梁计算,轨道-隧道-场地在扣件位置处的动柔度和传递函数采用2.5维有限元-基本解方法确定。

1.2 2.5维有限元-基本解方法

2.5维有限元-基本解方法^[23]是将轨道和盾构隧道采用有限元模拟,场地采用弹性空间的格林函数解析模型^[24],如图1所示。将弹性空间的动力响应用虚拟振源的线性组合表示,并通过有限元边界上配置点处的位移连续和力平衡条件建立有限元部分与弹性空间的联系,确定虚拟振源的幅值后,即可由格林函数确定弹性空间的响应。

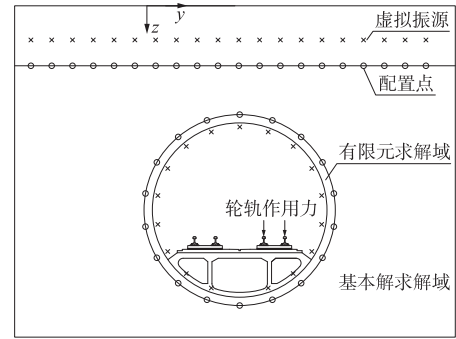


图1 2.5维有限元-基本解模型示意

Fig. 1 Diagram of 2.5D FEM-MFS

在虚拟振源作用下,盾构隧道和场地界面上配置点的位移和应力可表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H} \\ \mathbf{G} \end{bmatrix} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $\boldsymbol{\tau}$ 和 $\mathbf{u}$ 分别为配置点的应力和位移向量; $\mathbf{A}$ 为虚拟振源的幅值向量; $\mathbf{G}$ 和 $\mathbf{H}$ 为系数矩阵,分别表示在虚拟振源处作用某一方向的单位力,在弹性空间配置点产生的沿某一方向的位移和应力,由格林函数确定。

盾构隧道和场地界面上配置点的位移连续和应力平衡条件为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{bb} & \mathbf{E}_{bi} & \mathbf{H} \\ \mathbf{E}_{ib} & \mathbf{E}_{ii} & 0 \\ \boldsymbol{\Phi} & 0 & -\mathbf{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_b \\ \mathbf{u}_i \\ \mathbf{A} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{F} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,下标 b 为轨道和盾构隧道有限元模型中的边界节点; i 为其内部节点; $\mathbf{E}$ 为有限元模型的动刚度矩阵; $\boldsymbol{\Phi}$ 为单元的形函数矩阵,联系配置点和单元节点的位移。

由式(5)求出扣件力 $\mathbf{F}$ 作用下场地的虚拟振源的振幅向量 $\{\mathbf{A}\}$,根据格林函数可求得场地内任意一点的位移幅值。对于分层土和弹性半空间的自由界面情形,通过在界面布置配置点,利用相应边界条件建立与式(5)类似的约束方程,即可求解。

1.3 分析方法验证

为了验证本文分析方法的正确性,将本文方法与 PiP 方法、2.5 维有限元-边界元方法^[25]进行比较。比较工况为无限空间中圆环形混凝土隧道在单位简谐荷载下的动力响应。模型中隧道材料的密度为 2 500 kg/m³,弹性模量为 50 000 MPa,泊松比为 0.3,无限空间材料的剪切波速为 309 m/s,纵波波速为 944 m/s,密度为 2 000 kg/m³。

图 2 给出了不同频率谐波激励下,隧道和无限场地中监测点位置的竖向位移响应。图中采用位移响应的对数,单位为 dB,参考值为 1×10⁻⁶ m/N。由图 2 可以看出,本文 2.5 维有限元-基本解方法结果与 PiP 方法、2.5 维有限元-边界元方法基本一致,验证了本文分析方法的正确性。

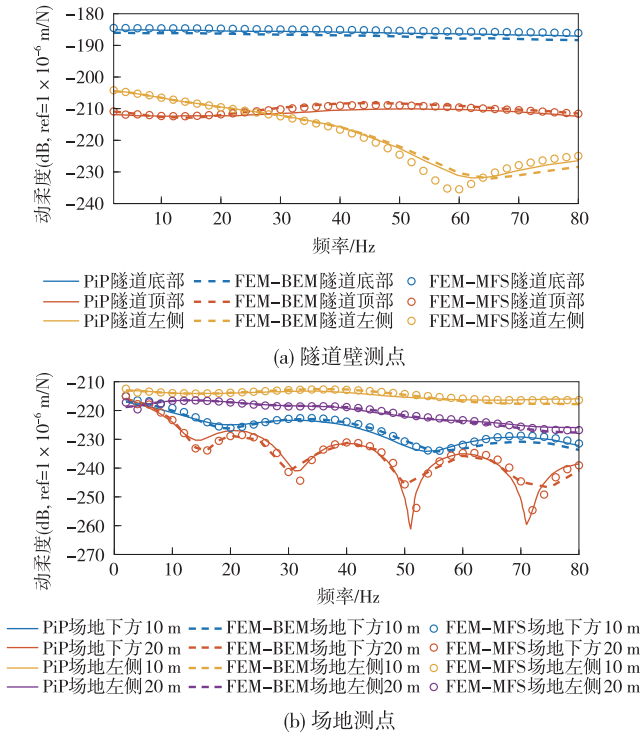


图 2 本文方法与文献结果对比

Fig. 2 Comparison between the method proposed in this study and that of the reference

2 盾构隧道基本参数

依托宁宣高铁江宁盾构隧道,隧道形式为单洞双线,断面外径为 13.8 m,内径 12.6 m,管片厚度 0.6 m,如图 3 所示。隧道管片采用 C50 混凝土,弧形件和轨道板采用 C40 混凝土,弧形件与隧道管片缝隙之间采用 C40 自密实混凝土填充,合理假定弧形件与隧道管片传力、位移连续^[20],轨道板下找平层为 C30 自密实混凝土。混凝土材料弹性模量按 GB/T 50010—

2010《混凝土结构设计规范》选取,泊松比为 0.2,密度为 2 450 kg/m³,损耗因子取 0.04。

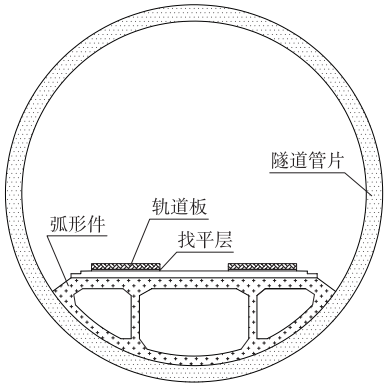


图 3 盾构隧道断面

Fig. 3 Cross-section of the shield tunnel

模型分析中采用的分层土参数如表 1 所示,隧道拱顶埋深为 52.7 m。模型中所有界面均为完好界面,位移和应力在跨越界面时是连续的。

表 1 场地土层参数

Tab. 1 Site soil layer parameters

序号	土层	厚度 /m	密度 /(kg/m ³)	纵波波速 /(m/s)	剪切波速 /(m/s)	损耗因子
1	素填土	2.5	1 600	160	80	0.08
2	粉质黏土(软塑)	2.6	1 600	200	100	0.06
3	粉质黏土(硬塑)	12.8	1 800	300	150	0.06
4	全风化角砾岩	7.5	2 000	700	400	0.04
5	强风化角砾岩	5.3	2 200	1 000	600	0.04
6	弱风化角砾岩	—	2 400	1 386	800	0.04

3 隧道振动分析

隧道振动是由一系列移动轮轨力作用下隧道振动的叠加,因此分析单个移动单位轮轨力作用下隧道和场地的位移响应,可以得到隧道和场地动力响应的主要频率和分布特征。本节单位移动轮轨力的速度为 350 km/h,右线运行。由于计算模型材料本构均假定为弹性,且隧道截面轴对称,左线运行、双向列车交会计算结果可由右线运行结果推知。本研究中,定义沿轨道方向为 x 方向,深度方向为 z 方向, y 方向为垂直于轨道方向的水平方向。

轮轨力作用点隧道断面的竖向位移如图 4 所示。从图 4 中可以看出,隧道的振动在弧形件范围内最显著,隧道顶部竖向振动比隧道底部竖向振动小 20 dB 以上,由于列车右线运行,左侧隧道的振动明显小于右侧隧道的振动。

为方便描述振动传播规律,文中定义[0,20 Hz]为低频振动,(20 Hz, 40 Hz]为中频振动,高于 40 Hz 为高频振动。盾构隧道的振动分布为:低频时从隧道底

部到隧道顶部竖向振动逐渐降低,高频时从隧道底部到隧道顶部竖向振动呈现降低-增大-降低的趋势,总体上隧道底部的竖向振动最大,隧道顶部的竖向振动最小,隧道侧方的竖向振动介于两者之间。

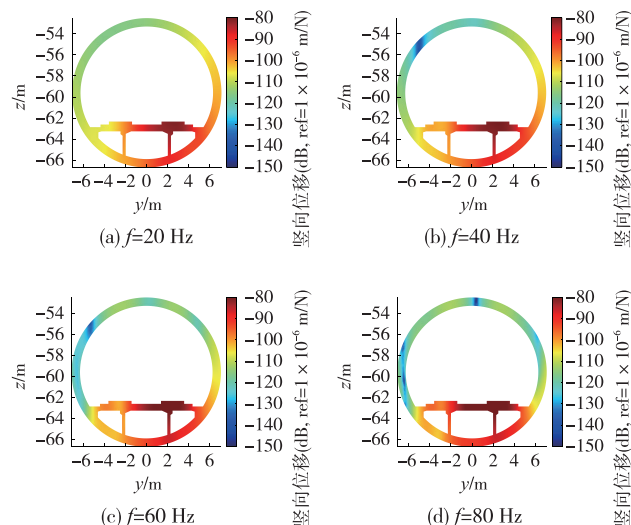


图4 盾构隧道竖向位移

Fig. 4 Vertical displacement of the shield tunnel

隧道作为振源,将振动扩散到场地中,隧道底部和顶部主要以纵波的形式向场地中传播振动,隧道侧方

向场地中同时传播纵波和横波。因此,地表竖向振动主要由上半部分隧道扩散的振动决定。

图5为不同频率时隧道上半部分与围岩界面的水平(y方向)和竖向位移。从图5中可以看出,当轮轨力频率为20 Hz时,隧道顶部60°~150°以竖向位移为主,隧道右侧0°~30°的水平和竖向位移相近,且顶部竖向位移和右侧竖向位移相位相反,表明隧道顶部向地表扩散竖向振动,隧道右侧倾斜向地表扩散振动;当轮轨力频率为40 Hz时,隧道顶部90°~120°向地表扩散竖向振动,隧道右侧30°~60°反相位倾斜向地表扩散振动;当轮轨力频率为60 Hz时,隧道90°~120°向地表扩散竖向振动,右侧60°附近隧道反相位倾斜向地表扩散振动,右侧0°~30°隧道的振动向右侧扩散振动,对地表振动的影响较小;当轮轨力频率为80 Hz时,隧道90°~120°向地表扩散竖向振动,隧道40°~90°向地表反相位扩散竖向振动,右侧0°~40°隧道的振动向右侧扩散振动。

总之,低频时隧道顶部同相位向地表扩散竖向振动,高频时隧道顶部60°~90°区间内和90°~120°区间内以反相位向地表扩散竖向振动;隧道右侧0°~30°的振动向右侧扩散竖向振动。

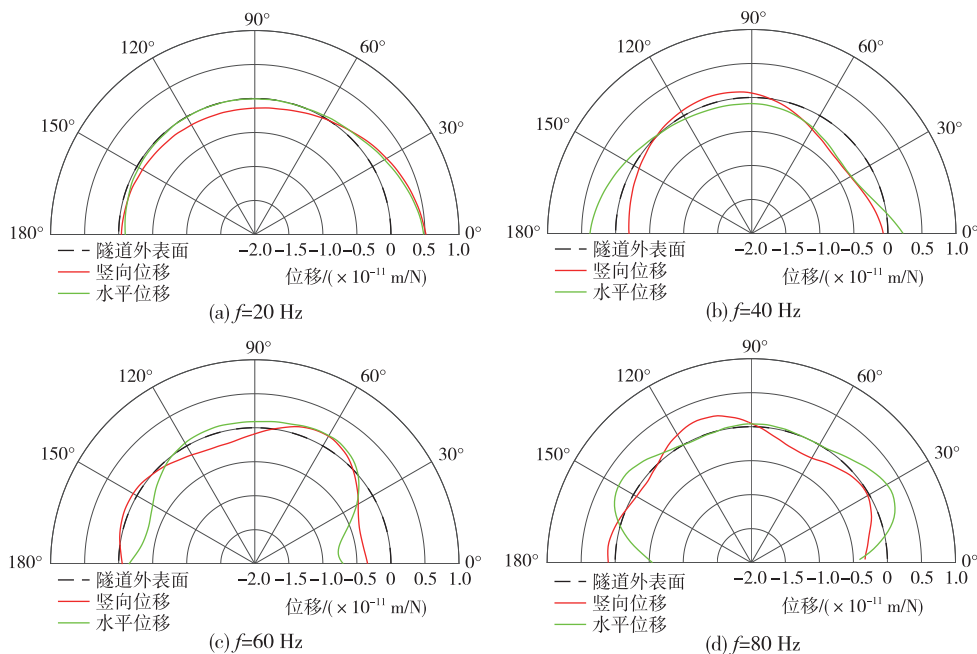


图5 盾构隧道与围岩界面的位移

Fig. 5 Displacement at the interface between the shield tunnel lining and the surrounding rock

为了分析振动沿轨道方向的传播规律,图6给出轨道板、隧道顶部、隧道左右两侧和隧道底部竖向位移沿轨道方向的变化曲线。从图6中可以看出,轨道板的位移响应随着距离增大振动衰减最快,隧道顶部位移响应随着距离增大振动衰减最慢。

隧道竖向振动沿轨道方向呈现周期性,服从多普勒效应。移动轮轨力前方和后方的波长约为 $(v_s \mp c)/f$, v_s 为隧道围岩(弱风化角砾岩)的剪切波速, c 为轮轨力移动速度, f 为轮轨力的频率。以20 Hz的移动轮轨力为例,轮轨力前方波长约为35 m,后方波长约为45 m。

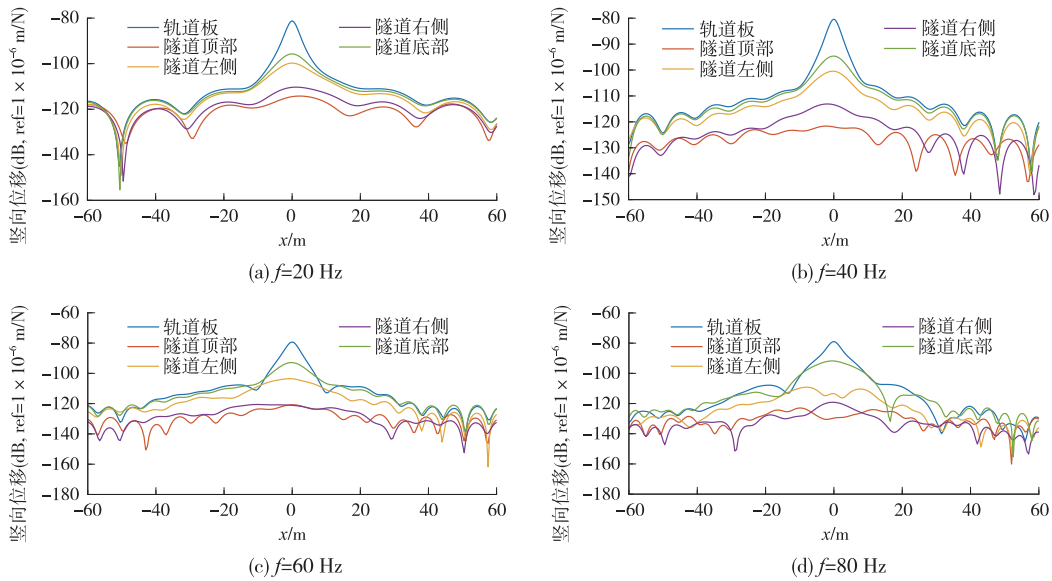


图 6 盾构隧道竖向位移沿轨道方向变化

Fig. 6 Variation of vertical displacement of the shield tunnel along the track

4 场地振动分析

轮轨力作用点场地断面的竖向位移分布如图 7 所示,图中曲线为隧道中心深度的场地竖向位移。从图 7 中可以看出,在隧道围岩中,场地振动呈现清晰的周期性,隧道上下方场地的竖向振动主要由隧道顶部和底部扩散的纵波产生,隧道两侧场地的竖向振动主要由隧道两侧扩散的横波产生。因此,隧道上下方场地

竖向振动的波长为 v_p/f , v_p 为隧道围岩的纵波波速,隧道两侧场地振动的波长为 v_s/f 。以 80 Hz 的移动轮轨力为例,隧道上下方场地竖向振动波长为 17.3 m,隧道两侧场地竖向振动波长为 10 m。

观察隧道附近场地的竖向位移,可以看出移动轮轨力频率为 20 Hz 时,隧道上方场地的响应和下方场地的响应幅值基本相同,随着频率增大,隧道上方场地的响应小于下方场地的响应(图 7)。这是由于低频移

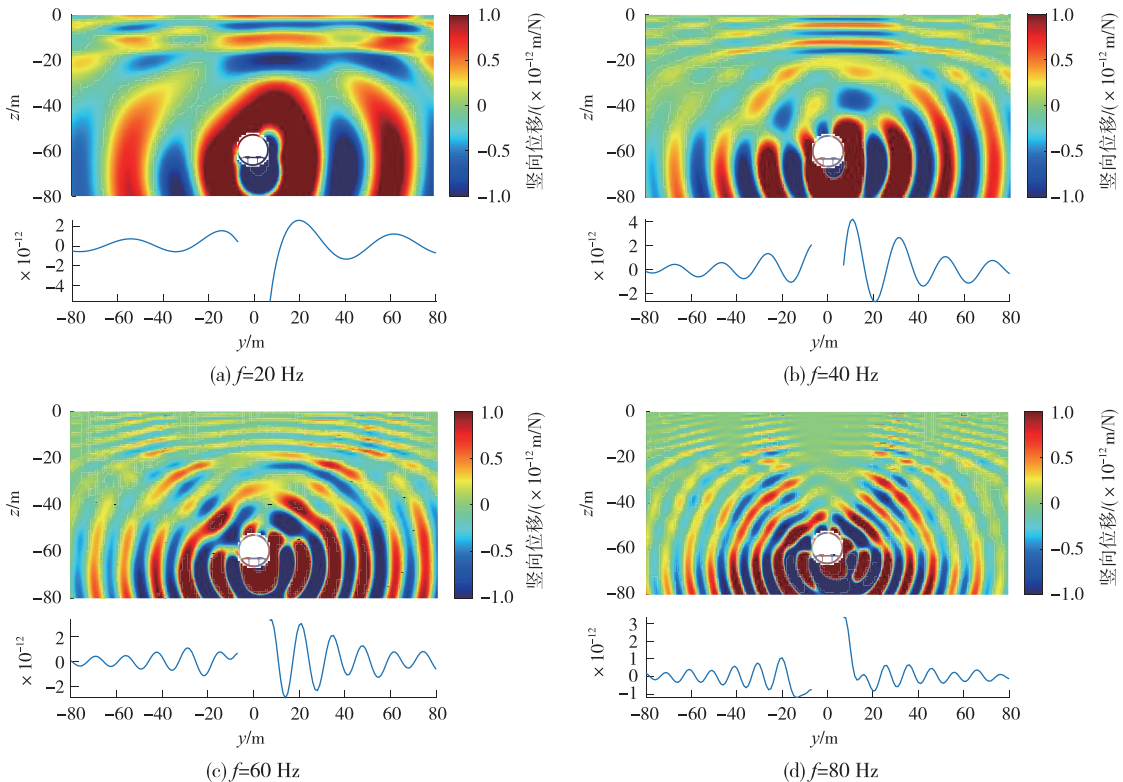


图 7 场地断面的竖向位移

Fig. 7 Vertical displacement of site cross-section

动荷载作用下,隧道上、下方场地竖向振动的半波长大于隧道外径,隧道下方的振动可以绕射传播至隧道正上方;随着频率增大,当频率大于 20 Hz,场地振动的半波长小于隧道外径,振动不能绕射到隧道正上方,隧道结构“遮挡”了振动向上的传播。

观察从隧道顶部到地表的场地振动,可以看出场地的振动也呈现周期性,且距离地表越近,振动波长越小,这是由于距离地表越近场地土的纵波波速越小。图 8 给出了隧道正上方场地的竖向位移曲线,从图中可以看出,随着频率增大,距离地表越近,波长越短,而且场地竖向位移响应也越小。如粉质黏土(硬塑)土层($v_p=300$ m/s)中 40 Hz 对应的波长 7.5 m,60 Hz 对应的波长 5 m。当轮轨力频率为 60 Hz 和 80 Hz 时,随着距离地表越近,场地竖向位移响应越小,而轮轨力频率为 20 Hz 和 40 Hz 时,随着距离地表越近,场地竖向位移响应却没有明显衰减,这是由于弹性波的衰减与频率的平方呈正比,频率越高,吸收衰减越严重。另外,由于距离地表越近的土层波速越小,波阻抗越小,导致透射波的振幅增大,粉质黏土(硬塑)土层的波阻抗明显小于角砾岩的波阻抗,导致该界面透射波的振幅增大。

在隧道围岩层(弱风化角砾岩)中,从隧道顶部到

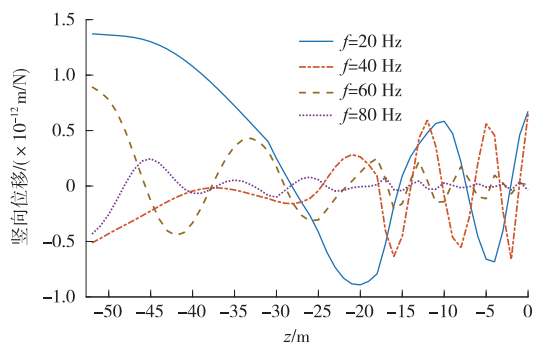


图 8 隧道正上方场地的竖向位移

Fig. 8 Vertical displacement of ground above the tunnel

强风化角砾岩界面,轮轨力频率大于 20 Hz 时场地竖向位移均明显衰减,这是由于隧道顶部 $60^\circ \sim 90^\circ$ 区间和 $90^\circ \sim 120^\circ$ 区间以反相位向地表扩散竖向振动,两者叠加后在隧道正上方的振动较小,而且隧道扩散的柱面波随距离增大,振幅衰减。根据 Snell 定律,从角砾岩到地表素填土,透射角逐渐减小,导致隧道正上方场地振动呈现类似平面波的特性,隧道侧方扩散的横波经过分层土后,对地表竖向位移的贡献很小,因此接近地表的土层竖向位移主要为纵波引起。

图 9 给出了地表竖向位移分布,图中曲线为隧道中心位置的地表竖向位移。当轮轨力频率不同时,地

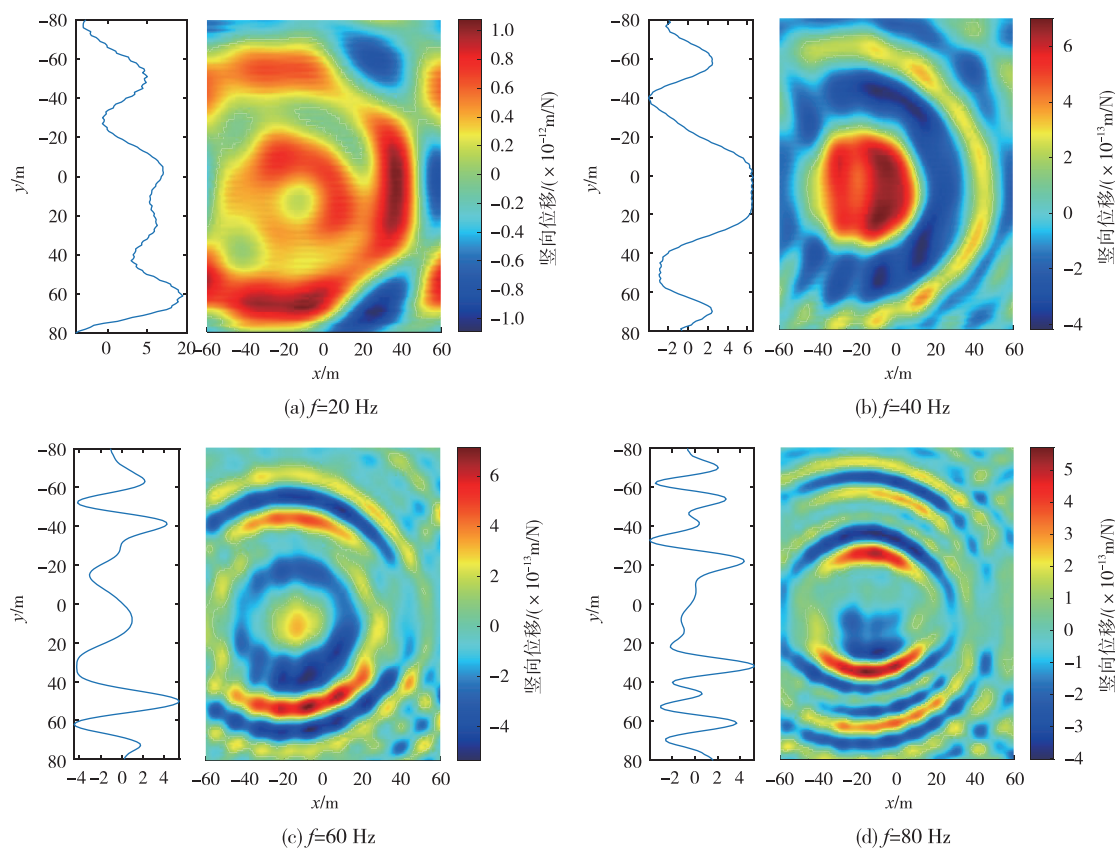


图 9 地表竖向位移分布

Fig. 9 Vertical displacement on the ground surface

表竖向位移响应呈现不同的分布,低频时由于波长较长、表层土波阻抗减小导致振幅增大,使得隧道正上方地表的竖向位移响应较大,高频时由于隧道顶部 $60^\circ \sim 90^\circ$ 区间和 $90^\circ \sim 120^\circ$ 区间以反相位向地表扩散竖向振动、弹性波的衰减与频率的平方呈正比,使得隧道正上方地表的竖向位移响应较小。

当轮轨力频率为 60 Hz 和 80 Hz 时,地表的最大竖向响应位于隧道运行线路一侧,距隧道边缘的距离分别约为 44 m 和 25 m。这与图 5 中隧道的位移分布吻合,当轮轨力频率为 60 Hz 时,右侧 60° 附近隧道倾斜向地表扩散振动,而当轮轨力频率为 80 Hz 时,隧道 $40^\circ \sim 90^\circ$ 向地表扩散竖向振动,导致 80 Hz 时地表的位移离隧道更近。

总之,隧道在不同频率时的振动分布对地表的振动起决定性作用。这一结论有助于简化分层土中隧道振动的影响问题,通过隧道在单一围岩中的分析得到隧道的振动分布,进而根据土层分布估计地表的竖向振动。

5 结 论

(1) 盾构隧道上、下方场地的竖向振动由隧道顶部和底部扩散的纵波产生,隧道两侧场地的竖向振动由隧道两侧扩散的横波产生;隧道竖向振动沿轨道方向呈现周期性,波长服从多普勒效应,由车速和隧道围岩的剪切波速共同决定。

(2) 单洞双线隧道在低频轮轨力作用下,隧道顶部同相位向地表扩散竖向振动,而且接近地表土层的波阻抗减小,导致地表竖向位移的低频成分在隧道正上方较大;在高频轮轨力作用下,隧道顶部 $60^\circ \sim 90^\circ$ 区间和 $90^\circ \sim 120^\circ$ 区间以反相位向地表扩散竖向振动,导致高频成分在隧道正上方较小、偏离隧道一定距离后响应最大。

(3) 从隧道到地表土层的波阻抗递减时,隧道正上方扩散的柱面纵波经过土层界面后接近平面波,隧道侧方扩散的横波经过土层界面后,竖向位移分量减小,导致接近地表的土层竖向位移主要为纵波。

(4) 盾构隧道在不同频率的轮轨力作用下振动分布和土层结构决定地表的振动,简化分析时可通过隧道在单一围岩中的振动分布,结合土层分布估计地表的竖向振动。

参考文献:

- [1] 巴振宁,符瞻远,付继赛,等. 地铁列车振动对颐和园北宫门古建筑木结构影响的实测与分析[J]. 振动工程学报,2023,36(6): 1602-1612.

BA Zhenning, FU Zhanyuan, FU Jisai, et al. Measurement and Analysis of the Influence of Metro Train Vibration on the Ancient Wood-

en Structures of North Palace Gate of the Summer Palace[J]. Journal of Vibration Engineering, 2023,36(6):1602-1612.

- [2] 陈兆玮,徐鸿,尹镗,等. 地铁运行引发临近建筑群低频微振动及传递规律研究[J]. 振动工程学报,2023,36(6):1623-1632.
CHEN Zhaowei, XU Hong, YIN Qiang, et al. Low-Frequency Microvibration and Its Transfer Law of Nearby Building Group Caused by Running Metro Train[J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, 36(6):1623-1632.
- [3] QIU Y T, ZOU C, WU J H, et al. Building Vibration Measurements Induced by Train Operation on Concrete Floor[J]. Construction and Building Materials, 2023, 394: 132283.
- [4] QU S, ZHAO L, YANG J Z, et al. Numerical Analysis of Engineered Metabarrier Effect on Ground Vibration Induced by Underground High-speed Train[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023,164:107580.
- [5] XIN T, DING Y, WANG P S, et al. Application of Rubber Mats in Transition Zone between Two Different Slab Tracks in High-speed Railway[J]. Construction and Building Materials, 2020, 243: 118219.
- [6] 楼梦麟,贾旭鹏,俞洁勤. 地铁运行引起的地面振动实测及传播规律分析[J]. 防灾减灾工程学报,2009,29(3):282-288.
LOU Menglin, JIA Xupeng, YU Jieqin. Field Measurement and Analysis of Ground Vibration Induced by Subway Trains[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009,29(3):282-288.
- [7] 李平,罗信伟. 高速列车诱发桥隧段线路振动特性试验研究[J]. 铁道建筑,2019,59(4):148-151, 156.
LI Ping, LUO Xinwei. Experimental Study on Vibration Characteristics of Bridge and Tunnel Section Induced by High Speed Train Travelling[J]. Railway Engineering, 2019,59(4):148-151,156.
- [8] 孙成龙. 高速铁路地下线环境振动预测与控制研究[D]. 北京:北京交通大学,2020.
SUN Chenglong. Prediction and Control Study on Environmental Vibration of Underground Lines in High-speed Railway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [9] QU S, YANG J J, ZHU S Y, et al. A Hybrid Methodology for Predicting Train-induced Vibration on Sensitive Equipment in Far-field Buildings[J]. Transportation Geotechnics, 2021,31:100682.
- [10] HUANG Q, LI P, ZHANG D M, et al. Field Measurement and Numerical Simulation of Train-induced Vibration from a Metro Tunnel in Soft Deposits[J]. Advances in Civil Engineering, 2021,2021(1): 6688746.
- [11] ZHANG X H, ZHOU S H, HE C, et al. Experimental Investigation on Train-Induced Vibration of the Ground Railway Embankment and Under-crossing Subway Tunnels[J]. Transportation Geotechnics, 2021,26:100422.
- [12] FUJII K, TAKEI Y, TSUNO K. Propagation Properties of Train-Induced Vibration from Tunnels[J]. Quarterly Report of RTRI, 2005, 46(3):194-199.
- [13] QU S, YANG J J, ZHU S Y, et al. Experimental Study on Ground Vibration Induced by Double-line Subway Trains and Road Traffic[J]. Transportation Geotechnics, 2021,29:100564.

- LI Mingwei. Study on Scheme of Introducing Baotou – Yinchuan High-Speed Railway to Baotou Railway Hub[J]. Railway Transport and Economy, 2016,38(8):26–31.
- [20] 郑笑,沈晓鹏. 琼州海峡跨海铁路通道分期建设方案研究[J]. 铁道运输与经济,2022,44(10):144–148.
- ZHENG Xiao, SHEN Xiaopeng. Study on Phased Construction Scheme of Qiongzhou Strait Railway[J]. Railway Transport and Economy, 2022,44(10):144–148.
- [21] 翁露,沈维. 杭州铁路枢纽杭州北联络线建设方案优化研究[J]. 铁道勘察,2022,48(3):63–68.
- WENG Lu, SHEN Wei. Research on Optimization of the Construction Scheme of Hangzhou North Connecting Line[J]. Railway Investigation and Surveying, 2022,48(3):63–68.
- [22] 张学东. 深圳至深汕合作区铁路建设方案研究[J]. 铁道勘察, 2021,47(6):49–54.
- ZHANG Xuedong. Research on the Construction Scheme of Shenzhen to Shenshan Cooperation Zone Railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 2021,47(6):49–54.
- [23] 徐洋,金国,李盛,等. 杭深高速铁路中通道优化方案研究[J]. 铁道运输与经济,2021,43(9):70–75.
- XU Yang, JIN Guo, LI Sheng, et al. Scheme Research on Central Corridor Optimization for Hangzhou – Shenzhen High Speed Railway [J]. Railway Transport and Economy, 2021,43(9):70–75.
- [24] 张超永. 宁波至舟山铁路建设方案研究[J]. 铁道标准设计,2021, 65(7):1–6,46.
- ZHANG Chaoyong. Research on the Construction Scheme of Ningbo– Zhoushan Railway[J]. Railway Standard Design, 2021,65(7):1– 6,46.
- [25] 角志达,吴浩,崔光宇. 高速铁路接轨方案研究:以平漯周高铁为例[J]. 铁道勘察,2023,49(1):79–83,131.
- JIAO Zhida, WU Hao, CUI Guangyu. Research on the Track Junction Scheme of High-speed Railway—Taking the Pingdingshan – Zhoukou High-speed Railway as an Example[J]. Railway Investigation and Surveying, 2023, 49(1):79–83,131.
- [26] 王殿辉. 四平至通化铁路扩能工程建设方案研究[J]. 铁道货运, 2021,39(6):26–31.
- WANG Dianhui. Study on Construction Scheme of Siping–Tonghua Railway Capacity Expansion Project[J]. Railway Freight Transport, 2021,39(6):26–31.

(编辑:王婷)

(上接第8页)

- [14] GUPTA S, STANUS Y, LOMBAERT G, et al. Influence of Tunnel and Soil Parameters on Vibrations from Underground Railways[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009,327(1/2):70–91.
- [15] HU A F, LI Y J, DENG Y B, et al. Vibration of Layered Saturated Ground with a Tunnel Subjected to an Underground Moving Load[J]. Computers and Geotechnics, 2020,119:103342.
- [16] YANG Y B, HUNG H H, HSU L C. Ground Vibrations Due to Underground Trains Considering Soil–tunnel Interaction[J]. Interaction and Multiscale Mechanics, 2008,1(1):157–175.
- [17] YUAN Z H, BOSTRÖM A, CAI Y Q, et al. The Wave Function Method for Calculation of Vibrations from a Twin Tunnel in a Multi-Layered Half-space[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019,125:105716.
- [18] FORREST J A, HUNT H E M. Ground Vibration Generated by Trains in Underground Tunnels[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 294(4/5):706–736.
- [19] XU L H, MA M. Vibration Amplification Zone Phenomenon on the Ground Surface under Various Types of Buried Dynamic Loads within Metro Tunnel[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 182: 108713.
- [20] 段忠辉,孟庆余. 高速铁路大直径盾构隧道预埋槽道精准定位研究与应用[J]. 铁道标准设计,2024,68(12):115–122.
- DUAN Zhonghui, MENG Qingyu. Research and Application of Precise Positioning for Embedded Channels in Large-diameter Shield Tunnels of High-speed Railways [J]. Railway Standard Design, 2024,68(12):115–122.
- [21] 葛照国,唐泽人,陈辰,等. 单洞双线盾构隧道中隔墙顶部节点形式与力学性能研究[J]. 隧道建设(中英文),2024,44(6): 1223–1232.
- GE Zhaoguo, TANG Zeren, CHEN Chen, et al. Forms and Mechanical Performance of Prefabricated Partition Walls’ Top Connectors in Single Tube Double-track Shield Tunnels[J]. Tunnel Construction, 2024,44(6):1223.
- [22] 巩江峰,王伟,王芳,等. 截至2023年底中国铁路隧道情况统计及2023年新开通重点项目隧道情况介绍[J]. 隧道建设(中英文), 2024,44(2):377–392.
- GONG Jiangfeng, WANG Wei, WANG Fang, et al. Statistics of China’s Railway Tunnels by the End of 2023 and Overview of Tunnels of Key New Projects in 2023 [J]. Tunnel Construction, 2024, 44(2):377–392.
- [23] AMADO-MENDES P, ALVES COSTA P, GODINHO L M C, et al. 2. 5D MFS-FEM Model for the Prediction of Vibrations Due to Underground Railway Traffic [J]. Engineering Structures, 2015, 104: 141–154.
- [24] TADEU A, ANTÓNIO J, GODINHO L. Green’s Function for Two-and-a-half Dimensional Elastodynamic Problems in a Half-space [J]. Computational Mechanics, 2001,27(6):484–491.
- [25] GUPTA S, HUSSEIN M F M, DEGRANDE G, et al. A Comparison of Two Numerical Models for the Prediction of Vibrations from Underground Railway Traffic[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007,27(7):608–624.

(编辑:王婷)