文章编号:1673-0291(2026)04-0055-11 **DOI**:10.11860/j.issn.1673-0291.20250101

高速列车动载下岩溶区铁路路基动力响应分析

杨 玲[1],白明洲[1],魏彦峰[1,2],刘洪瑜[1]
(1.北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044;2.中铁第四勘察设计院集团有限公司,武汉 430063)

摘 要:针对岩溶发育区高速铁路路基在长期列车振动荷载作用下土体松散、变形累积乃至土洞塌陷,进而威胁线路平顺性与运营安全的问题,提出一种融合现场振动监测与三维动力数值模拟的岩溶土洞动力响应分析方法.首先,选取典型岩溶塌陷易发区高速铁路路基段开展现场振动测试,获取列车通过时土体振动加速度响应数据,进而采用时频变换方法系统分析环境振动的频谱分布与衰减特征;然后,基于多体动力学与有限元理论建立包含土洞的车辆-轨道-路基-地基三维精细化动力耦合模型,分析列车荷载作用下的路基动力响应;最后,基于数值模型开展多工况参数影响分析,揭示岩溶土洞埋深与半径对路基内部振动传播规律及动力响应分布的影响机制.研究结果表明:环境振动频率主要集中于0~35 Hz范围,其中高频分量衰减速率显著高于低频分量;土洞对列车振动引起的弹性波具有散射与阻隔作用,靠近土洞区域的竖向动位移和振动加速度幅值均明显小于远离土洞区域,且动位移幅值的衰减率高于振动加速度,表明土洞对波能的削弱作用在位移响应上表现得更为敏感;竖向动位移与振动加速度幅值随土洞埋深增加而呈增大趋势,随土洞半径增大而减小,浅埋大尺寸岩溶土洞对路基动力响应影响最大.研究成果可为岩溶区铁路路基防灾减灾设计提供参考.

关键词:铁路路基;动力响应;数值计算;振动测试;土洞
中图分类号:U213.1 **文献标志码**:A

Dynamic response analysis of railway subgrades in karst areas under high-speed dynamic train loading

Yang Ling[1], *Bai Mingzhou*[1], *Wei Yanfeng*[1,2], *Liu Hongyu*[1]
(1.School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2.China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: High-speed railway subgrades in karst-prone areas may experience soil loosening, cumulative deformation, and even soil-cavity collapse under long-term train-induced vibrations, thereby threatening ride comfort and operational safety. To address this problem, a method combining field vibration monitoring with three-dimensional dynamic numerical simulation is proposed to analyze the dynamic response of railway subgrades overlying karst soil cavities. First, field vibration tests are conducted on a typical high-speed railway subgrade section prone to karst collapse. Soil vibration acceleration responses during train passage were recorded, and time-frequency analysis is used to systematically examine the frequency distribution and attenuation characteristics of environmental vibrations. Next, based on multibody dynamics and

收稿日期:2025-06-26;**修回日期**:2026-06-18
基金项目:国家自然科学基金(42172311)
Foundation item: National Natural Science Foundation of China (42172311)
第一作者:杨玲(1999—),女,河北石家庄人,博士生.研究方向为路基工程与交通地质环境.**email**:23111355@bjtu.edu.cn.
通信作者:白明洲(1967—),男,河北承德人,教授,博士,博士生导师.**email**:mzhbai@bjtu.edu.cn.

引用格式:杨玲,白明洲,魏彦峰,等.高速列车动载下岩溶区铁路路基动力响应分析[J].北京交通大学学报,2026,50(4):55-65.
Yang Ling, Bai Mingzhou, Wei Yanfeng, et al. Dynamic response analysis of railway subgrades in karst areas under high-speed dynamic train loading[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(4): 55-65. (in Chinese)

finite element theory, a refined three-dimensional coupled dynamic vehicle-track-subgrade-foundation model incorporating a soil cavity is developed to analyze the dynamic response of the subgrade under train loading. Finally, multi-case parametric analyses are performed using the numerical model to reveal how soil-cavity burial depth and radius affect vibration propagation and the distribution of dynamic responses within the subgrade. The results show that environmental vibrations are concentrated mainly in the range of 0～35 Hz, with high-frequency components attenuating significantly faster than low-frequency components. The soil cavity scatters and obstructs elastic waves induced by train vibrations. Both the vertical dynamic displacement and vibration acceleration amplitudes are markedly lower near the cavity than farther away, and the attenuation rate of dynamic displacement is higher than that of vibration acceleration, indicating that displacement is more sensitive to the cavity-induced reduction in wave energy. Both amplitudes increase with increasing burial depth and decrease with increasing cavity radius; consequently, shallow, large soil cavities have the greatest influence on the dynamic response of the subgrade. These findings provide a reference for the disaster-prevention and mitigation design of railway subgrades in karst areas.

Keywords: railway subgrade; dynamic response; numerical calculation; vibration testing; soil cavity

岩溶塌陷因其具有隐蔽性和突发性,已成为岩溶地区高速铁路建设面临的关键地质问题[1-2].高速列车运行过程中,轨道不平顺等因素易引发轮轨系统振动,尽管单次振动能量较小,但其高频率和长时间的累积效应会显著削弱路基结构的整体稳定性,甚至诱发岩溶塌陷事件[3-4].因此,深入研究岩溶区高速铁路路基在动载作用下的响应规律,对于保障线路运营安全和结构耐久性具有重要意义.

目前,铁路路基的振动响应研究多采用现场测试与数值模拟相结合的方式,通过对加速度、速度、位移等动力参数的对比分析,揭示不同工况下的振动特性[5-8].在现场测试方面,研究者针对不同铁路线路开展了系列工作,文献[9]在京雄城际铁路开展激振试验,探讨了激振频率和扭矩对路基响应的影响;文献[10]分析了朔黄铁路过渡段中轨道及边坡的振动波传播特性;文献[11]比较了不同基床结构在列车荷载下的响应差异;文献[12]对比分析了巴黎到布鲁塞尔的高速铁路的路堤与路堑段的振动传播差异;文献[13]通过在宝兰高铁桥隧过渡段开展测试,指出地面振动持续时间与列车荷载呈正相关关系,而与列车速度关系不大;文献[14]在大秦铁路开展动应力现场试验,发现列车轴荷载与转速会显著增加路基动应力,而道碴层厚度和基床刚度会加速其衰减.这些研究为深入理解路基振动响应机制提供了重要实验依据.

在数值模拟方面,研究者构建了多种精细化模型以揭示动力学特征.文献[15]发现路基各结构层的动力响应幅值随轴重增大而增大,列车速度对竖向位移和动态应力影响较显著;文献[16]基于有限元方法提出了适用于提速条件下的基床优化设计;文献[17]建立了考虑轨道不平顺的车辆-轨道-路基耦合模型,指出双线铁路较单线铁路具有更大的振动叠加效应;文献[18]运用ABAQUS平台建立了三维动力模型,分析了循环荷载作用下路基全断面的动态响应规律;文献[19]结合现场测试和2.5D有限元方法,定量评估了新建线路对邻近线路的动应力影响;文献[20]通过实测分析了列车运行参数对过渡段动力响应的调制机制;文献[21]通过模拟研究,证明泡沫轻质土路基具有良好的应力波吸收与分散作用,使得动应力和动位移沿轨道中心线呈对称分布,且随深度增加而逐渐衰减;文献[22]发现铁路路堤中岩溶空洞的存在使得垂直动态位移增加了72%,凸显了岩溶空洞对其动力学的不利影响;文献[23]指出当动应力传递到路基表面时,其大小已经衰减了90%;文献[24]利用ABAQUS建立多年冻土路基沉降模型,研究发现振动诱发沉降随路堤高度增加而减小,其中冻土融沉是永久变形的主要原因,而振动贡献约占20%.

为进一步验证和拓展理论与数值研究成果,部分学者采用模型试验手段对典型路基工况进行探索.文献[25]以穿越高处巨型溶洞的山地隧道为研究对象,开展了模型实验研究,发现列车的动力响应随着路基板厚度的增加而迅速下降;文献[26]基于模型试验研究了有砟轨道高速铁路道口地裂缝路基和地基的动力响应,发现在不同速度下有砟轨道裂缝路基的响应规律基本一致,但幅值随车速增加而增大,动应力、加速度和位移幅值衰减分别约为80%、76%和53%.

综上,现有研究多集中于普通路基或过渡段的振动响应,岩溶地质条件下路基-土洞系统的耦合振动特性研究仍较薄弱,缺乏对岩溶土洞尺寸与埋深等参数影响下的振动传播与衰减机制的系统分析.鉴于

此,本文首先在岩溶易发区高铁路基段开展了现场振动监测,以获取地面振动加速度的时程与频谱特征;然后,利用Abaqus建立了精细化的含土洞的车辆-轨道-路基-地基三维动力分析模型,分析含土洞路基的动力响应特性,进一步探讨不同土洞埋深与半径条件下的动力响应规律.研究成果可为岩溶区铁路基础设施的安全评估与防灾减灾设计提供参考.

1　铁路路基周边环境振动监测

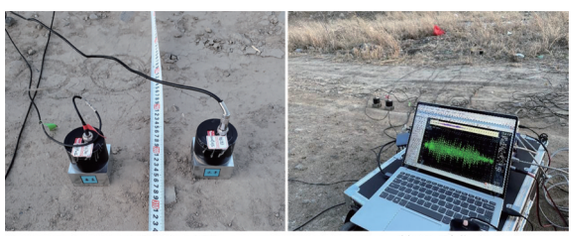
高速铁路运营过程中,列车振动会削弱土颗粒间的黏聚力,使土体逐渐松散并导致力学性能下降.因此,研究列车荷载作用下振动波的传播机理及路基与周边环境的动力响应规律具有重要意义.本文选取岩溶塌陷易发区的沪昆高铁贵州安顺段典型路基断面开展现场监测,并分析列车荷载作用下振动波的幅频特征及衰减规律.

1.1　研究区工程概况

研究区位于沪昆高铁贵州段D1K820+955～D1K821+200区间,地处安顺市镇宁县溶丘谷地,地势海拔为1 300～1 360 m.该区地质条件复杂,断层发育,表层覆盖1～6 m厚的黏性土,具有弱膨胀性;下伏基岩为三叠系中统关岭组白云岩和白云质灰岩.区内地下水埋深为1～6 m,表层黏性土中含少量孔隙水,下伏基岩岩溶水发育,地表水受降雨影响亦较丰富.综合地质构造及水文条件分析,该区为典型易塌陷岩溶路基区域.

1.2　监测设备和测点布设

监测设备选用中国地震局研发的891-2型高灵敏度拾振器,如图1所示,其具有优异的超低频测量性能,最低可检测0.5 Hz的振动信号,加速度分辨率达10^{-5} m/s^2,最大可测加速度为40 m/s^2.配套的数据采集系统由噪声技术研究所开发,配备先进的DASP分析软件.现场振动测试测点布置如图2所示,在垂直于轨道方向按5 m间距布置4个测点.



(a) 891-2型拾振器　　(b) 数据采集仪

图1　拾振器及数据采集

Fig.1　Vibration sensor and data acquisition system

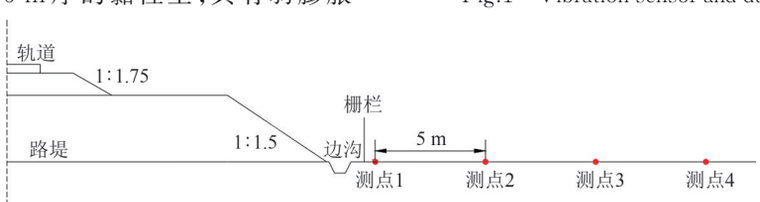


图2　现场监测点布置图

Fig.2　Layout of on-site monitoring points

1.3　测试数据分析

1.3.1　时域分析

列车运行引发的振动具有明显的方向性特征,竖向振动加速度幅值显著高于水平方向,说明振动能量主要通过竖向分量向路基周边传播[7],因此应重点分析列车通过时的竖向振动响应.

列车通过时4个测点的竖向振动加速度时程曲线如图3所示.由图3可知:从列车进入监测断面到完全驶离,整个振动持续时间6.5秒左右,各测点波形较为一致,均能清晰观察到轮轨相互作用产生的弹性波引起的地面振动加速度突变现象;测点1～4的振动峰值加速度分别为184.104、119.340、90.132和77.918 mm/s^2,相邻测点间的衰减率分别为35.18%、24.47%和13.55%,可发现地面振动强度随着距振源距离的增大呈非线性衰减,其中测点1至测点2之间的衰减最为显著,之后衰减速率逐渐降低.

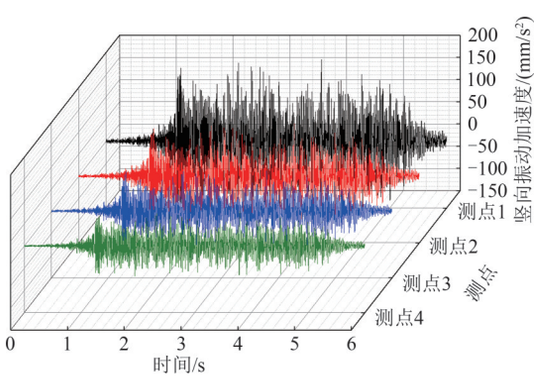


图3　不同测点竖向振动加速度时程曲线

Fig.3　Time history curves of vertical vibration acceleration at different monitoring points

1.3.2　频域分析

利用MATLAB对振动加速度时程信号进行傅里叶变换,获得振动加速度频谱,各测点的振动加速度频谱曲线如图4所示.由图4可知:距离振源较近测点的频率分布更为宽广,同时包含高频和低频成

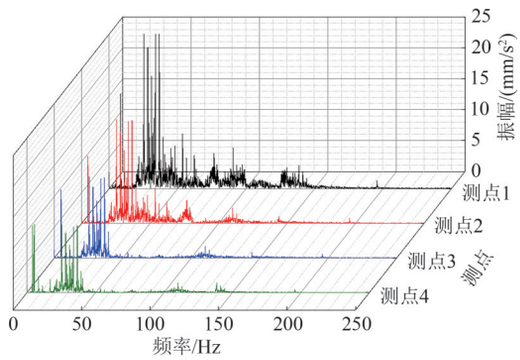


图 4 不同测点竖向振动加速度频谱曲线

Fig.4 Spectra of vertical vibration acceleration at different monitoring points

分;测点 1～4 的有效频率范围依次为 0～150 Hz、0～80 Hz、0～40 Hz 和 0～35 Hz,对应的主频分别为 33.94、25.51、25.51 和 5.36 Hz;随着测点距离振源逐渐增大,频谱中的高频成分明显减少,频带逐渐收窄,主频向低频偏移,频谱特征揭示出明显的频率选择性衰减现象.这种差异源于弹性波传播过程中的材料阻尼效应,高频振动由于激发频繁的颗粒间相互作用,能量耗散速度较快,表现出较强的衰减趋势;而低频振动周期较长,颗粒间摩擦次数较少,单位传播路径内能量损失较小,因而可传播至更远距离.

2 有限元模型及验证

2.1 计算模型的建立

依据文献[27]建立含土洞的车辆-轨道-路基-地基计算模型.车辆简化成一个多刚体系统,包括车体、转向架、轮对 3 个部分,通过一系悬挂和二系悬挂将各部分进行连接,共 31 个自由度,其中车体和转向架考虑沉浮、摇头、点头、横移和侧滚运动,轮对考虑沉浮、横移、侧滚和摇头运动[28],车辆模型的具体参数如表 1 所示[23],列车行车速度设置为 250 km/h.

表 1 列车模型参数

Tab.1 Train model parameters

项目	数值	项目	数值	项目	数值
车体质量/kg	48 000	轮对质量/kg	2 400	二系纵向刚度/(kN/m)	0.24×10^3
车体侧滚惯量/(kg·m²)	1.15×10^5	轮对侧滚惯量/(kg·m²)	1 200	二系横向刚度/(kN/m)	0.24×10^3
车体点头惯量/(kg·m²)	2.70×10^6	轮对摇头惯量/(kg·m²)	1 200	二系纵向阻尼/(kN·s/m)	500
车体摇头惯量/(kg·m²)	2.70×10^6	一系纵向刚度/(kN/m)	9.00×10^3	二系横向阻尼/(kN·s/m)	30
转向架质量/kg	3 200	一系横向刚度/(kN/m)	3.00×10^3	二系垂向阻尼/(kN·s/m)	50
转向架侧滚惯量/(kg·m²)	3 200	一系垂向刚度/(kN/m)	1.04×10^3	车体尺寸(长×宽×高)/m	25.85×3.3×3.9
转向架点头惯量/(kg·m²)	7 200	一系垂向阻尼/(kN·s/m)	45	车轮滚动半径/m	0.46
转向架摇头惯量/(kg·m²)	6 800	二系垂向刚度/(kN/m)	0.40×10^3	转向架轴距/m	2.50

钢轨采用 60 kg/m 标准钢轨,轨距为 1 435 mm,扣件支点间距为 0.63 m.轮轨接触考虑了轮轨的法向力和切向力.轮轨法向力采用 Hertz 非弹性接触理论计算,本文选用磨耗型车轮踏面.切向力通过设定罚函数摩擦模型进行计算,摩擦系数取值为 0.3[23].轨道不平顺采用随机过程理论引入,模拟列车在轨道上的运行过程,实现了移动荷载的施加.扣件采用弹簧-阻尼单元进行计算,竖向动刚度为 50 MPa,横向动刚度为 40 MPa[29].路基采用分层结构设计,路基面宽 8.6 m,自上而下依次为 0.4 m 厚基床表层、2.3 m 厚基床底层和 1.3 m 厚底层路堤,边坡设计为 1∶1.5 坡比.地基部分由 3 m 厚表层土体和 27 m 厚基岩组成,模型总长 100 m.在路基正下方 2 m 处设置椭圆形土洞,长轴 3 m,短轴 2 m.轨道板与基床表面、路基本体底面与土体之间通过 Tie 接触保持各接触面之间的变形协调,地基设置为黏弹性边界.土洞采用实体 4 节点四面体单元,轨道板、CA 砂浆层、路基和地基均采用实体 8 节点六面体单元,车辆采用刚性单元,模型共 335 996 个单元,总节点数为 387 262 个.整体计算模型如图 5 所示.根据实际工程地质资料及前期地质勘查报告,得到轨道-路基-地基结构层计算参数如表 2 所示.

监测点布置方案如图 6 所示.图 6 中:监测系统采用 4 m 纵向间距的网格布设,设置 0 m 和 10 m

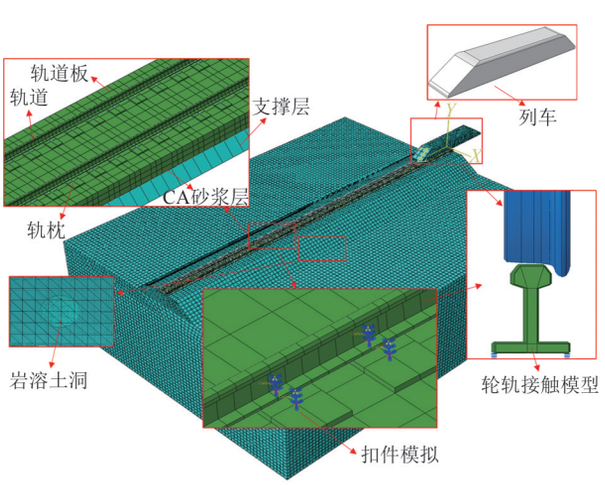


图 5 整体模型

Fig.5 Overall computational model

表 2　轨道-路基-地基结构层计算参数

Tab.2　Parameters of the track-subgrade-foundation structural layers

名称	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg/m^3)	黏聚力/KPa	内摩擦角/(°)	瑞利阻尼系数α	瑞利阻尼系数β
钢轨	210	0.3	7 800	—	—	0.032 8	0.003 1
轨道板	35.5	0.2	2 500	—	—	0.098 3	0.009 2
CA 砂浆	7	0.2	1 800	—	—	0.098 3	0.009 2
支承层	22	0.2	2 500	—	—	0.098 3	0.009 2
基床表层	220	0.25	2 100	35	43.0	0.262 0	0.024 4
基床底层	130	0.3	1 900	13	28.0	0.229 3	0.021 4
路基本体	50	0.2	1 800	30	25.0	0.275 0	0.030 5
地基表层	16	0.25	1 850	32	25.0	0.245 4	0.001 6
基岩	190	0.25	2 650	20	44.3	0.245 4	0.001 6

两条测线;以土洞中心为坐标原点建立测量坐标系,左侧为负向,右侧为正向.

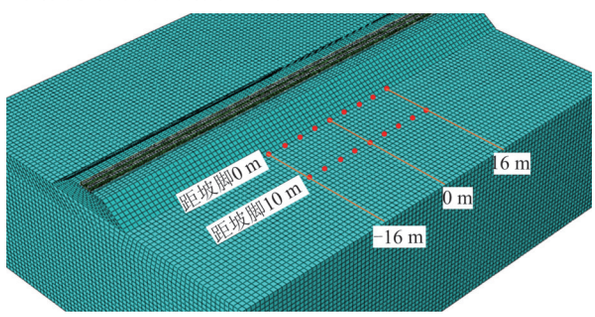


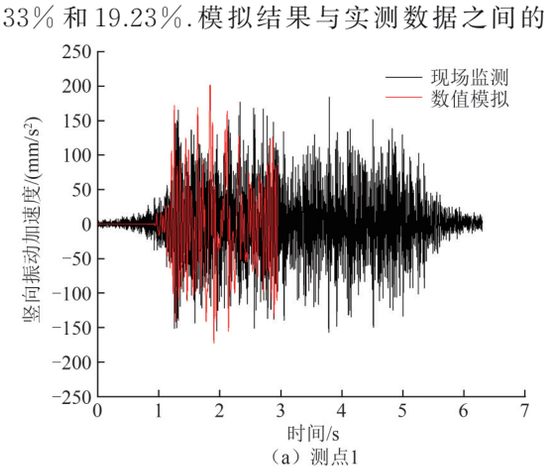
图 6　监测点布设

Fig.6　Layout of monitoring points

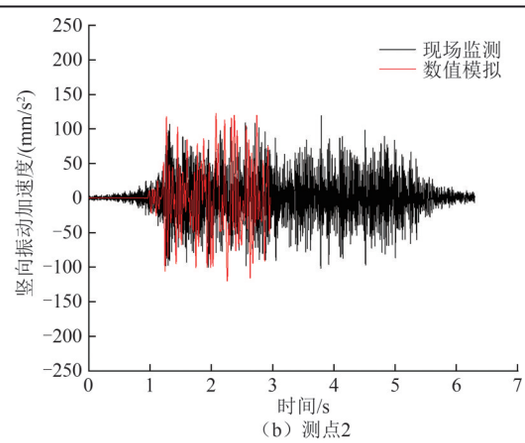
2.2　模型验证

为验证所建模型的合理性,依据现场条件建立无土洞的概化模型,并与实测数据进行对比.数值模拟输出的振动波时程曲线与现场监测结果对比见图 7.

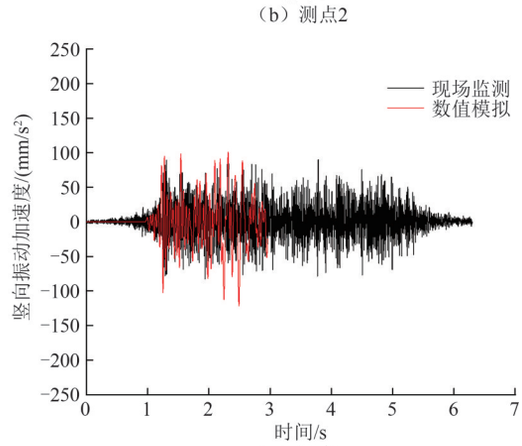
由图 7 可知:由于数值模型仅考虑单节列车,模拟振动持续时间略短于实测情况;模拟与实测的竖向振动加速度波形变化特征一致.在测点 1~4 处,数值模拟得到的加速度幅值分别为 0.201、0.133、0.102 和 0.093 m/s^2,而实测值依次为 0.184、0.119 、0.090 和 0.078 m/s^2,两者误差分别为 9.24%、11.76%、13.33% 和 19.23%.模拟结果与实测数据之间的差



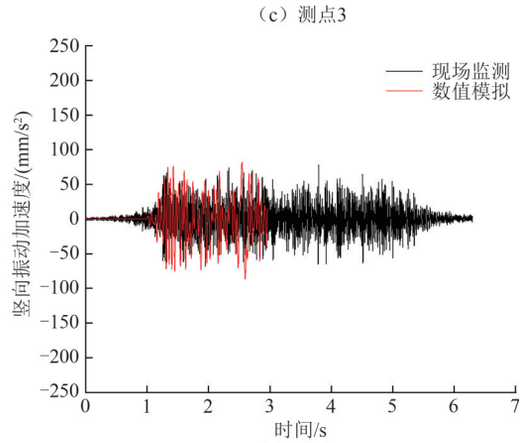
（a）测点1



（b）测点2



（c）测点3



（d）测点4

图 7　竖向振动加速度现场监测与数值模拟结果对比图

Fig.7　Comparison of measured and simulated vertical vibration accelerations

异主要受环境条件、模型简化和运行状态的共同影响.现场地表植被根系及乡村道路对振动传播具有明显衰减作用,使实测加速度幅值整体低于数值模拟结果,且随距离增加其衰减效应逐渐增强,导致远点处的误差更大;数值模型在土体特性方面采用固定阻尼,以有限域和黏弹性边界代替无限地基,这种理想化处理与实际复杂土体条件存在差异;此外,现场列车运行速度(239 km/h)略低于模拟条件(250 km/h),也使得实测振动加速度偏小.

为进一步验证模型精度,对误差最小的测点1进行单因素方差分析[17].结果表明,在显著性水平a=0.05下,两组数据的显著性值p=0.061>a,说明模拟与实测结果差异不显著.由此可见,尽管存在一定误差,该模型在近场范围内能够较好地反映振动特征,可用于岩溶区高速铁路路基动力响应分析.

3　计算结果分析

3.1　竖向动位移分析

列车通过时,距离坡脚0 m测线上−16 m、0 m和16 m位置3个测点的竖向动位移时程曲线如图8所示.由图8可知:0 m测点位移峰值最小,为0.112 mm;−16 m和16 m测点峰值分别为0.142 mm和0.130 mm,较0 m测点分别高出21.11%和13.85%.这种随距离增大而减弱的衰减效应,直观反映了土洞对振动波传播的屏蔽作用.土洞的存在不仅改变了路基动力响应幅值,介质连续性的破坏还重构了弹性波的传播路径,最终导致振动能量呈现非对称的空间衰减规律.

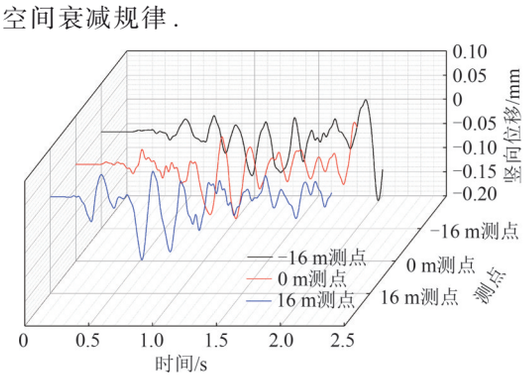


图8　坡脚位置竖向动位移时程曲线

Fig.8　Time histories of vertical dynamic displacement at the slope toe

距离坡脚0 m和10 m测线上竖向动位移幅值空间分布曲线及衰减率如图9所示.由图9可知:距离坡脚0 m测线上靠近土洞位置的动位移幅值明显小于两侧,而距离坡脚10 m测线的动位移变化幅度较小,整体保持相对平稳的状态,这表明土洞对弹性波具有一定的衰减作用;距离坡脚0 m测线上动位移衰减率范围在10%~45%,且靠近土洞位置的动位移幅值衰减率明显高于两侧;土洞两侧4 m范围内的衰减率均超过30%;衰减率曲线不对称分布可能与列车通过时的运行状态有关,车辆到达左侧测点时仍处于加速阶段,而至右侧测点时已接近稳定速度.综上所述,土洞对列车振动过程中竖向动位移的影响具有明显的空间衰减特征,衰减程度随距离增加而减弱,在土洞正上方最为显著.

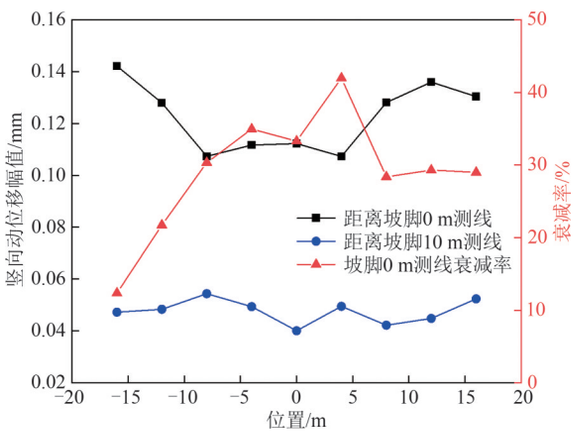


图9　距离坡脚0 m和10 m测线竖向动位移幅值空间分布曲线及衰减率

Fig.9　Spatial distributions and attenuation rates of vertical dynamic displacement amplitudes along measurement lines 0 and 10 m from the slope toe

3.2　竖向振动加速度分析

距离坡脚0 m测线上−16 m、0 m和16 m位置3个测点的竖向振动加速度时域曲线如图10所示.由图10可知:3个测点加速度峰值分别为164.31、136.98和176.72 mm/s^2;与两侧测点相比,0 m测点峰值较两侧测点分别衰减19.95%和29.01%,体现了土洞对弹性波的衰减作用,该规律与动位移分析结果一致.

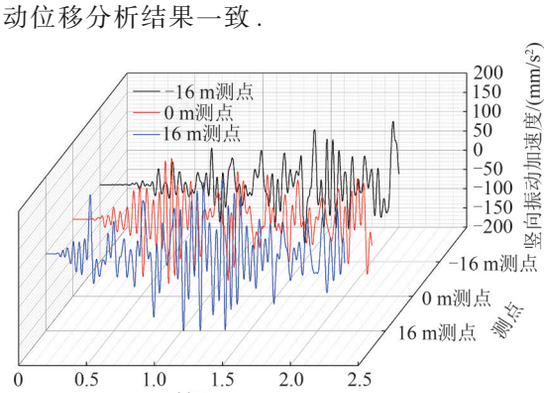


图10　坡脚位置竖向振动加速度时域曲线

Fig.10　Time history curves of vertical vibration acceleration at the slope toe

距离坡脚 0 m 和 10 m 测线竖向振动加速度幅值曲线空间分布及衰减率如图 11 所示 . 由图 11 可知:在 0 m 测线上,靠近土洞中心的测点加速度值明显低于远离土洞区域,表明振动加速度随距离减小而显著衰减;而在 10 m 测线上,加速度幅值变化不明显,整体趋势较为平稳;距离路基 0 m 测线上的加速度衰减率介于 15%～40%,呈现与动位移相似的衰减模式 .

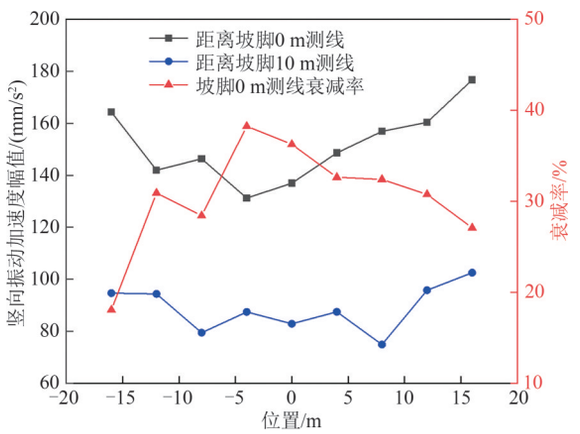


图 11　距离坡脚 0 m 和 10 m 测线竖向振动加速度幅值空间分布曲线及衰减率

Fig.11　Spatial distributions and attenuation rates of vertical vibration acceleration amplitudes along measurement lines 0 and 10 m from the slope toe

距离坡脚 0 m 测线上－16 m、0 m 和 16 m 位置 3 个测点竖向振动加速度频域图如图 12 所示 . 由图 12 可知:3 个测点的主导振动频率集中在 22.27～23.18 Hz,且近土洞位置最大优势频率较大;在振幅方面,－16 m、0 m 和 16 m 位置 3 个测点的最大振幅值分别为 32.76、19.14 和 24.02 mm/s²,位于土洞正上方的 0 m 测点振幅较两侧测点分别衰减 71.15% 和 25.49%,即近土洞位置振幅明显减小;频谱分析结果显示,土洞的存在导致邻近区域振动频率升高,这可能与土洞引起的局部刚度变化有关,土洞上方区域的振动能量显著降低,反映出土洞对振动波的吸收和散射效应 .

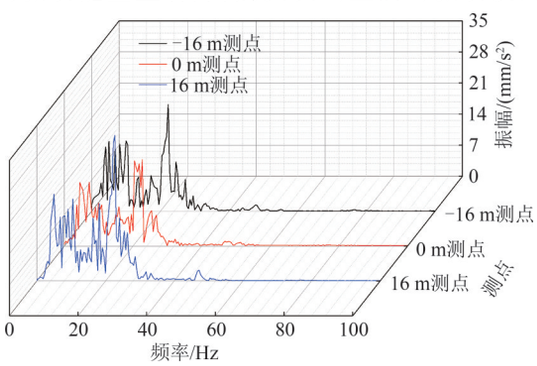


图 12　坡脚位置竖向振动加速度频谱曲线

Fig.12　Spectra of vertical vibration acceleration at the slope toe

3.3　土洞埋深对路基动力响应的影响

为分析土洞埋深对路基动力响应的影响,设置列车轴重为 16 t,运行速度为 250 km/h,土洞埋深分别为 1 m、1.5 m、2 m、3 m 和 5 m 进行模拟,分析不同埋深条件下路基坡脚位置监测点的竖向动位移分布规律及振动加速度的时频特性 .

不同土洞埋深工况下坡脚处竖向动位移及振动加速度幅值如图 13 所示 . 由图 13 可知:竖向动位移幅值与土洞埋深呈正相关关系;与无土洞工况相比,埋深为 1 m、1.5 m、2 m、3 m 和 5 m 时的动位移衰减率分别为 31.02%、22.05%、14.99%、11.49% 和 1.66%;当埋深超过 3 m 后,动位移增长速率显著降低,5 m 埋深工况响应特性已接近无土洞状态,表明深层土洞对弹性波传播干扰效应较弱,浅层土洞则表现出较强波能衰减特性;竖向振动加速度幅值随埋深增加呈非线性增长,相较于无土洞工况,5 种埋深条件下加速度幅值衰减率分别为 34.26%、

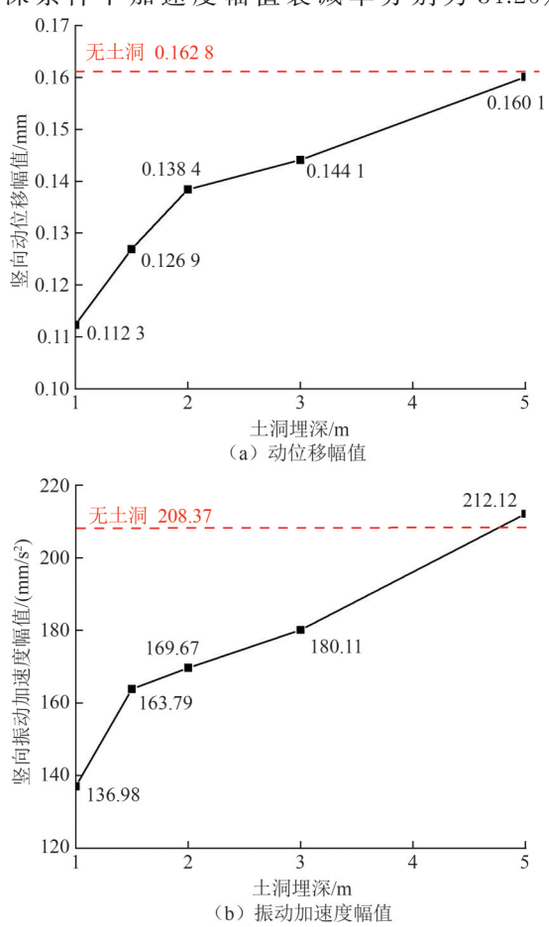


图 13　不同土洞埋深工况下坡脚处竖向动位移及振动加速度幅值

Fig.13　Vertical dynamic displacement and vibration acceleration amplitudes at the slope toe for different soil-cavity burial depths

21.39%、18.57%、13.56% 和 -1.79%，呈现出明显的梯度衰减特征，浅埋土洞对振动波的阻滞作用更为显著.

各工况下坡脚位置振动加速度的最大优势频率如图 14 所示. 由图 14 可知：频率主要分布于 20～24 Hz；1 m 埋深工况频率相较无土洞、5 m 及 3 m 埋深工况高出约 1～2 Hz，较 1.5 m 工况也高约 1 Hz，说明浅埋土洞易引起局部频率升高，埋深增大后频率逐渐趋于无土洞状态.

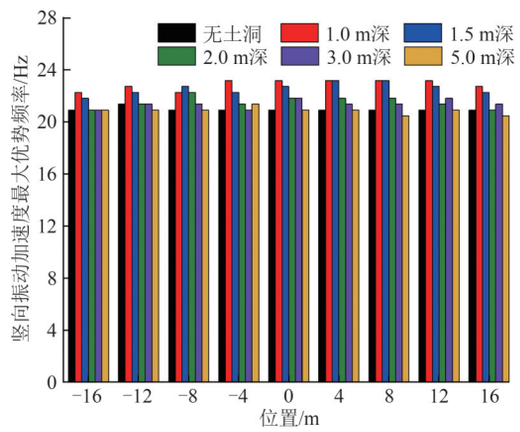


图 14 不同土洞埋深工况下路基坡脚处竖向振动加速度最大优势频率

Fig.14 Peak dominant frequency of vertical vibration acceleration at the subgrade slope toe for different soil-cavity burial depths

不同土洞埋深工况下最大优势频率对应的振幅空间分布如图 15 所示. 由图 15 可知：各有土洞工况下 0 m 位置的加速度振幅相较无土洞工况的衰减率分别为 47.79%、44.49%、36.33%、33.44%、9.55%，土洞埋深小于 3 m 时衰减率均在 30% 以上，表明浅埋土洞对路基振动响应影响显著；同一工况下，靠近土洞的区域均呈现明显的振幅衰减，且埋深越浅，衰减越强.

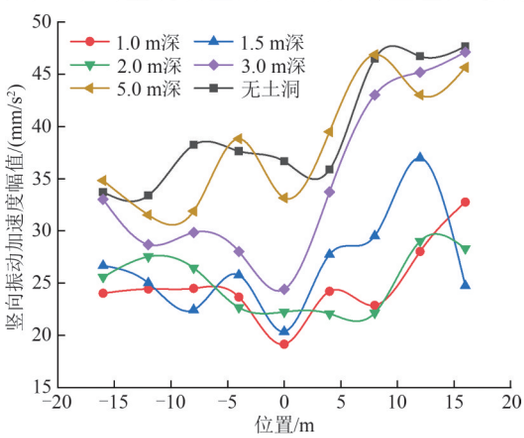


图 15 竖向振动加速度振幅空间分布曲线

Fig.15 Spatial distribution of vertical vibration acceleration amplitude

3.4 土洞半径对路基动力响应的影响

采用与 3.3 节相同的列车轴重和运行速度进行模拟，土洞埋深固定为 1 m，洞体为长短轴比为 3∶2 的椭球体，短半轴分别取 0.5 m、1 m、1.5 m 和 2 m，共设置 4 种工况，分析不同半径土洞对坡脚位置监测点的竖向动位移、振动加速度的时域及频域响应规律，并与无土洞情况进行对比.

不同土洞半径工况下坡脚处竖向动位移及振动加速度幅值如图 16 所示. 由图 16 可知：竖向动位移幅值和振动加速度幅值均随土洞半径增大呈递减趋势，且递减速率逐渐减慢；与无土洞工况相比，竖向动位移幅值衰减率分别为 17.35%、31.06%、34.81% 和 39.43%，竖向振动加速度幅值衰减率依次为 23.65%、34.26%、41.90% 和 43.82%，表明大半径土洞对弹性波传播具有更强的阻滞作用.

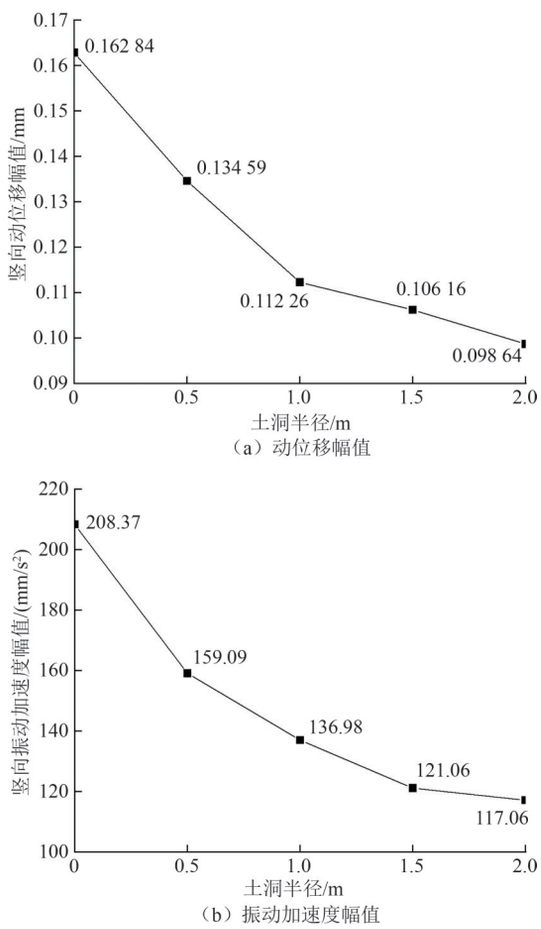


图 16 不同土洞半径工况下坡脚处竖向动位移及振动加速度幅值

Fig.16 Vertical dynamic displacement and vibration acceleration amplitudes at the slope toe for different soil-cavity radii

竖向动位移在空间上的分布特征如图 17 所示. 由图 17 可知：大半径土洞条件下，动位移整体幅值

明显低于小半径工况,近场区域的衰减更为显著;相较于－16 m 位置测点,0 m 位置的动位移衰减率在4种半径工况下分别为20.77%、21.41%、22.22%和26.56%,显著高于无土洞工况下的1.34%;这表明土洞的影响范围与其半径密切相关,半径越大,近场衰减效应越显著;衰减幅度普遍维持在20%～30%,体现出明显的近场能量耗散特征.

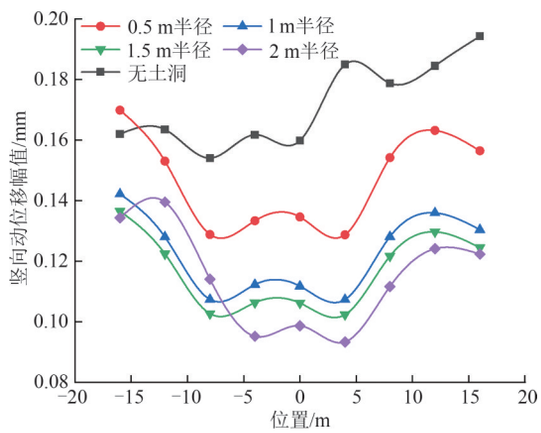


图 17　不同土洞半径工况下路基坡脚处竖向动位移幅值空间分布曲线

Fig.17　Spatial distribution of vertical dynamic displacement amplitude at the subgrade slope toe for different soil-cavity radii

4　结论

1) 环境振动频率主要集中在0～35 Hz,最大优势频率分布在4～6 Hz、25～35 Hz,高频振动在传播过程中衰减更快,而低频分量能够传播更远距离,表现出明显的非线性衰减特征.

2)土洞会改变地基介质的连续性,干扰弹性波的传播路径.靠近土洞位置的竖向动位移和振动加速度幅值均显著低于远离土洞的位置,其中动位移的衰减更为突出,说明土洞对振动波能具有散射和削弱作用.

3)土洞埋深与半径对振动传播具有非线性控制作用.竖向动位移和振动加速度幅值随埋深增加而增大,当埋深小于3 m时,加速度幅值衰减率均超过30%,且浅埋土洞会引起振动优势频率升高;埋深超过5 m后,其影响已接近无土洞状态.随着半径增大,动位移和加速度幅值削弱效应更加显著,当半径达到2 m时,加速度幅值衰减率超过40%,表明浅埋大半径土洞对路基动力响应的干扰最为突出.

据此,工程中可通过现场振动响应特征识别隐伏土洞隐患,从而为预警与加固提供依据,保障线路运营安全.尽管研究结果揭示了土洞几何特征对高速铁路路基振动传播的作用机制,为岩溶区铁路路基的勘察、设计与防灾减灾提供参考,但需指出,本研究主要基于监测与数值模拟,适用范围受地质条件及土洞形态差异的影响,未来有待结合更复杂地质条件与长期荷载作用开展进一步研究.

参考文献(References):

[1] 曹贤发, 李海玲. 中国典型岩溶发育区域划分[J]. 地球科学前沿, 2018, 8(4): 845－851.
Cao Xianfa, Li Hailing. Typical zone division of karst development in China[J]. Advances in Geosciences, 2018, 8(4): 845－851. (in Chinese)

[2] 蒙彦,雷明堂.岩溶塌陷研究现状及趋势分析[J].中国岩溶,2019,38(3):411－417.
Meng Yan, Lei Mingtang. Analysis of situation and trend of sinkhole collapse[J]. Carsologica Sinica, 2019,38(3): 411－417. (in Chinese)

[3] 师海,贾智磊,白明洲,等.基于颗粒流的覆盖型岩溶地面塌陷动态演化特征研究[J].中国岩溶,2024,43(5):1110－1120.
Shi Hai, Jia Zhilei, Bai Mingzhou, et al. Dynamic evolution characteristics of ground collapse of covered karst based on particle flow[J]. Carsologica Sinica, 2024,43(5):1110－1120. (in Chinese)

[4] 何忠明,杨煜,曾新发,等.土洞演化过程中路基变形的响应分析[J].中南大学学报(自然科学版), 2018,49(12): 3068－3076.
He Zhongming, Yang Yu, Zeng Xinfa, et al. Response analysis of subgrade deformation in evolution of concealed soil cave[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2018,49(12):3068－3076. (in Chinese)

[5] 王子玉,凌贤长,惠舒清.季节冻土区铁路路基振动加速度现场监测[J].岩土工程学报,2015,37(9):1591－1598.
Wang Ziyu, Ling Xianzhang, Hui Shuqing. Field monitoring of vibration response of subgrade in a seasonally frozen region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015,37(9):1591－1598. (in Chinese)

[6] 屈畅姿,王永和,魏丽敏,等.武广高速铁路路基振动现场测试与分析[J].岩土力学,2012,33(5):1451－1456.
Qu Changzi, Wang Yonghe, Wei Limin, et al. In-situ test and analysis of vibration of subgrade for Wuhan-Guangzhou high-speed railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012,33(5):1451－1456. (in Chinese)

[7] Bai M Z, Yang L, Wei Y F, et al. Study on dynamic response characteristics and monitoring indicators of high-speed railway subgrade in karst areas [J]. Applied Sciences-Basel, 2024, 14(19):8715.

[8] 梅慧浩,冷伍明,聂如松,等.重载铁路路基面动应力峰值随机分布特征研究[J].岩土力学,2019,40(4):1603－1613.

Mei Huihao, Leng Wuming, Nie Rusong, et al. Random distribution characteristics of peak dynamic stress on subgrade surface of heavy haul railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019,40(4):1603－1613.(in Chinese)

[9] 杨长卫,岳茂,张良,等.基于原位激振试验的高速铁路路基动力特性研究[J].铁道学报,2025,47(4):133－140.
Yang Changwei, Yue Mao, Zhang Liang, et al. Research on dynamic characteristics of high-speed railway subgrade based on in-situ excitation tests[J]. Journal of the China Railway Society, 2025,47(4):133－140.(in Chinese)

[10] Mei H H, Leng W M, Nie R S, et al. Experimental research on the dynamic response characteristics of the transition subgrade induced by heavy-haul train passage[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2019, 233(9): 974－987.

[11] 聂志红.高速铁路轨道路基竖向动力响应研究[D].长沙:中南大学, 2005: 87－92.
Nie Zhihong. Study on vertical dynamic response of the track/subgrade in high-speed railway[D]. Changsha: Central South University, 2005: 87－92.(in Chinese)

[12] 毕俊伟,张继严,高广运,等.高铁荷载下路堤和路堑段地面振动特性现场测试与数值分析[J].振动与冲击,2024,43(11):194－205.
Bi Junwei, Zhang Jiyan, Gao Guangyun, et al. On site testing and numerical analysis of ground vibration characteristics of embankments and cutting sections under high-speed rail load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024,43(11):194－205.(in Chinese)

[13] 牛富航,严武建,宿文姬,等.宝兰高铁列车运行所致桥路隧过渡段黄土场地地面振动实测与分析[J].北京交通大学学报,2019,43(3):89－97.
Niu Fuhang, Yan Wujian, Su Wenji, et al. Measurement and analysis of ground vibration of loess site in bridge, road and tunnel transition section caused by train operation of Baoji-Lanzhou high-speed railway[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019,43(3):89－97.(in Chinese)

[14] Du Yefeng, Cui Xinzhuang, Hao Jianwen, et al. Numerical analysis of the three-dimensional dynamic response of railway subgrade induced by heavy-haul trains based on FEM model[J]. International Journal of Geomechanics, 2025, 25(5): 04025055.

[15] Li X, B M Z, Wei Z J, et al. Dynamic response and stability analysis of high-speed railway subgrade in karst areas[J]. IEEE Access, 2021, 9: 129188－129206.

[16] 刘振宇,赵有明,李泰澧,等.更高速度条件下高速铁路路基动力响应及长期动力稳定性研究[J].铁道学报,2023,45(4):127－138.
Liu Zhenyu, Zhao Youming, Li Taifeng, et al. Study on dynamic response and long-term dynamic stability of high-speed Railway subgrade under higher speed conditions[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(4):127－138.(in Chinese)

[17] Li Pengxiang, Bai Mingzhou, Wei Zijun, et al. Stability analysis of subgrade under dynamic loading of single and double high-speed railways in karst areas[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26(8): 3301－3313.

[18] 岳茂,马洪生,苏珂,等.循环位移荷载作用下路基动力响应特征[J].铁道建筑,2023,63(5):145－148.
Yue Mao, Ma Hongsheng, Su Ke, et al. Dynamic response characteristics of subgrade under cyclic displacement load[J]. Railway Engineering, 2023,63(5):145－148.(in Chinese)

[19] 王瑞,胡志平,殷珂,等.黄土地区某铁路专用线路基动力响应规律[J].上海交通大学学报,2022,56(7):908－918.
Wang Rui, Hu Zhiping, Yin Ke, et al. Dynamic responses law of subgrade of a special railway line in loess region[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022,56(7):908－918.(in Chinese)

[20] 屈畅姿,康凯,魏丽敏,等.高铁路-涵过渡段路基动力响应特性及长期动力稳定性研究[J].岩土力学,2020,41(10):3432－3442.
Qu Changzi, Kang Kai, Wei Limin, et al. Dynamic response characteristics and long-term dynamic stability of subgrade-culvert transition zone in high-speed railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020,41(10):3432－3442.(in Chinese)

[21] 蔡国庆,韩博文,蔡德钩,等.高速铁路泡沫轻质土路基动力响应分析[J].北京交通大学学报,2019,43(3):8－15.
Cai Guoqing, Han Bowen, Cai Degou, et al. Dynamic response analysis of high speed railway foam lightweight soil subgrade[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019,43(3):8－15.(in Chinese)

[22] Islam N, Xu L R, Usman A B, et al. Study on field and numerical analysis of karst collapse as railway hazard[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2025, 178(3): 324－338.

[23] Li J, Li L W, Li S C, et al. Dynamic response and defect identification of high-speed railway ballastless tracks and subgrade under settlement and deformation[J]. International Journal of Geomechanics, 2025, 25(5): 04025060.

[24] Tang C X, Zhu Z Y, Ma Y, et al. Numerical simulation for vibration-induced settlement and permanent deformation accumulation in permafrost subgrades of the Qinghai-Tibet Railway[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 167: 106047.

[25] Wang J, Han J Y, Chen J, et al. Experimental and numerical study on the dynamic response of a superthick backfill subgrade under high-speed railway loading: a case study of Qianjiang-Zhangjiajie-Changde railway[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2022, 148(12): 05022014.

[26] Gao L F, Huang Q B, Gou Y X, et al. Experimental study on the dynamic responses of subgrade and foundation of high-speed railway crossing ground fissure zone [J]. Transportation Geotechnics, 2025, 51: 101498.

[27] 国家铁路局.高速铁路设计规范:TB10621-2014[S].北京:中国铁道出版社, 2014: 30－39.
State Railway Administration. Code for design of high speed railway: TB10621-2014[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014: 30－39.(in Chinese)

[28] 薛富春,张建民,马建林,等.运行条件下车辆-轨道-路基-地基强耦合大系统振动变形精细化分析方法[J].应用基础与工程科学学报,2023,31(1):81－102.
Xue Fuchun, Zhang Jianmin, Ma Jianlin, et al. Elaborate analysis method for vibration deformation in strongly-coupled vehicle-track-subgrade-foundation broad system due to vehicle operation[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2023,31(1):81－102.(in Chinese)

[29] 肖宏,陈盈盈,宋绪国,等.高速铁路箱式路基新型结构研究[J].中南大学学报(自然科学版),2025,56(2):781－793.
Xiao Hong, Chen Yingying, Song Xuguo, et al. Study on new structure of high-speed railway box-type subgrade[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2025,56(2): 781－793.(in Chinese)