

# 高铁列车荷载作用下桩-土复合地基及近接地铁隧道的动力响应模拟研究<sup>\*</sup>

李团社

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安)

**摘 要** [目的] 作为典型的振动荷载, 高铁列车运行引起的振动荷载会诱发桩-土地基及附近结构产生动力响应, 有必要对桩-土复合地基及近接隧道的动力响应特性进行研究。[方法] 基于西安地铁 14 号线下穿大西高速铁路特大桥工程, 采用模型试验和数值模拟相结合的方法, 以峰值振动加速度、峰值振动速度和峰值振动位移作为动力响应评价指标, 研究了列车移动荷载作用下桩-土复合地基及近接隧道的动力响应特性。[结果及结论] 研究结果表明, 当施加列车荷载时, 地基内部的动力响应指标均随着埋深的增加而衰减, 但存在近接隧道时, 动力响应指标值显著增加, 且在隧道埋深处衰减明显。随着距桩基中心距离的增加, 隧道埋深处的桩-隧之间地基的各动力响应指标从“波浪形”分布变为单调递减分布。根据峰值振动速度的控制阈值, 近接隧道埋深处距桩基础中心水平 3.6 m 范围内的地基处于危险影响区, 必须采用减振措施; 3.6 ~ 11.4 m 范围内的地基处于强影响区, 建议采取减振措施; 11.4 m 以外的地基处于弱影响区, 视结构的重要性决定是否采取减振措施。

**关键词** 地铁隧道; 高铁列车荷载; 动力响应; 控制阈值  
**中图分类号** TU435

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.06.019

## Dynamic Response Simulation of the Pile-soil Composite Foundation and Adjacent Metro Tunnel under High-speed Train Load

LI Tuanshe

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd, 710043, Xi'an, China)

**Abstract** [Objective] As a typical vibration load, the vibration load caused by high-speed train running will induce dynamic response of the pile-soil foundation and the adjacent structures. It is necessary to study the characteristics of the dynamic response of the pile-soil composite foundation and the adjacent tunnel. [Method] Based on the project of Xi'an Metro Line 14 under-passing the grand bridge on Datong-Xian High-speed Railway, a combination of model test and numeri-

cal simulation is adopted, with the peak vibration acceleration, peak vibration speed and peak vibration displacement as dynamic response evaluation indexes, the dynamic response characteristics of the pile-soil composite foundation and the adjacent tunnel under train moving load are studied. [Result & Conclusion] The results show that when the train load is applied, the dynamic response index inside the foundation attenuates with the increase of the buried depth, but when there is a tunnel nearby, the dynamic response index value increases significantly, and its attenuation is obvious at the buried depth of the tunnel. As the distance from the center of the pile foundation increases, the dynamic response indexes of the foundation between piles and tunnels at the buried depth of the tunnel change from "wavy" distribution to monotone decreasing distribution. According to the control threshold of peak vibration speed, the horizontal area within the scope of 3.6 m around the pile foundation center to the adjacent tunnel buried depth is the hazardous impact zone where the vibration reduction measures must be taken, and that within 3.6 ~ 11.4 m is the strong impact zone where taking vibration reduction measures is recommended, and that outside 11.4 m is the weak impact zone, whether the vibration reduction measures are taken or not depends on the importance of the structure.

**Key words** metro tunnel; train load of high-speed railway; dynamic response; control threshold

由于城市地下空间资源的有限性, 出现了众多近接工程, 其中地铁施工近接高速铁路较普通近接工程复杂得多<sup>[1-2]</sup>。众多学者针对列车振动影响及在地基中的传播规律开展了研究<sup>[3-5]</sup>, 均表明高速列车的运行会对普通的软土地基和桩土复合地基产生一定的不利影响, 存在近接地铁隧道的桩-土复合地基比普通的桩-土复合地基影响更复杂, 但其动态响应特性的差异尚不清楚。此外, 对相邻隧道在

<sup>\*</sup> 中铁第一勘察设计院集团有限公司科研课题(院科 19-55)

列车荷载作用下的安全评价也缺乏相关的研究。

基于此,通过模型试验与数值模拟对高速列车荷载作用下的桩-土-隧复合地基及近接地铁隧道的动力响应特性进行研究。根据峰值速度的安全阈值,对动力响应影响区域进行划分,并对近接地铁隧道的安全性进行评价。

## 1 单点列车振动荷载模拟试验

### 1.1 模型试验

#### 1.1.1 相似比及材料参数

本文依托西安地铁 14 号线尚贤路站—学府路站区间下穿大西高铁跨西铜公路特大桥进行研究。特大桥的桩基础直径为 1.25 m;桥下方地铁盾构隧道管片外径为 6.0 m、厚度为 0.3 m、环宽 1.5 m,距桩体最小净距为 3.78 m。为研究高铁列车荷载作用下含有隧道的桩-土复合地基的动力响应,基于弹性相似准则<sup>[6]</sup>,考虑试验可行性确定本次模型试验几何相似比  $C_l = 20$ 、密度相似比  $C_\rho = 1$ ,弹性模量相似比  $C_E = 14.2$ ,加速度相似比  $C_a = 1$ ,荷载相似比  $C_F = C_l^3 C_\rho = 8\ 000$ 。桩基及隧道结构统一采用有机玻璃进行模拟,模型试验地层采用砂土与黏土配制而成。地层与结构试验参数统计如表 1 所示。

表 1 地层与结构参数

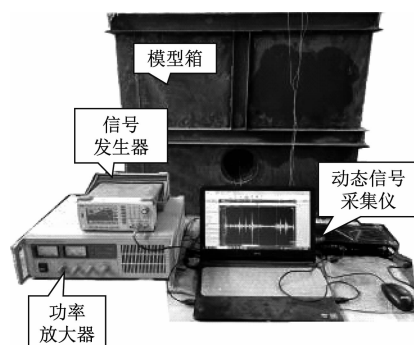
Tab. 1 Parameters of the formation and structures

名称	类别	尺寸/cm	弹性模量/ GPa	剪切模量/ GPa	泊松比
围岩	原型		66.0	25.38	0.3
	模型		4.5	1.73	0.3
隧道衬砌	原型	外径 600.0, 厚度 30.0	35.5	14.80	0.2
	模型	外径 30.0, 厚度 1.5	2.5	1.04	0.2
桩基	原型	直径 125.00	35.5	14.80	0.2
	模型	直径 6.25	2.5	1.04	0.2

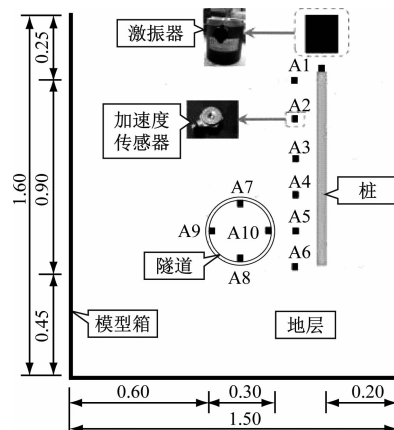
#### 1.1.2 试验装置设计

模型试验装置主要由模型试验箱、荷载加载装置和动力响应测试装置三部分组成。其中模型箱体尺寸为 1.5 m(长)×1.5 m(宽)×1.6 m(高)。荷载加载及动力响应测试装置主要由信号发生器、功率放大器、小型激振器、加速度传感器及动态信号采集仪等构成,如图 1 所示。通过加速度传感器对地基的加速度进行监测,桩隧间的地基监测点为 A1—A6,近接隧道监测点为 A7—A10。为便于后续分析,加速度监测数据均按照相似比换算成实际

工况数据。



a) 模型试验装置实景图



尺寸单位:m

b) 监测方案

图 1 模型试验装置及监测方案

Fig. 1 Test model devices and monitoring scheme

以我国常见的高铁列车为例,轴重 170 kN,簧下质量 750 kg,设计时速 350 km/h,其产生的列车荷载时程拟合曲线如图 2 所示。将该荷载根据相似比输入信号发生器施加至模型桩顶即可。

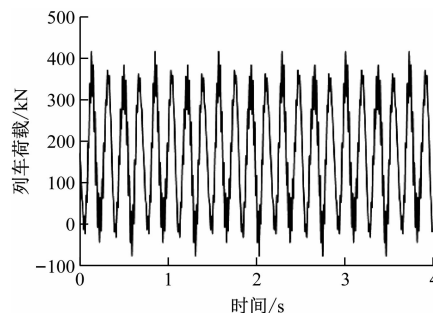


图 2 列车振动荷载时程曲线

Fig. 2 Time history curve of train vibration load

### 1.2 数值模拟

数值模拟采用 MiDas GTSNX 软件。数值模型尺寸与模型试验原型一致,30 m(长)×30 m(宽)×32 m(高),如图 3 所示。围岩、桩基及隧道结构均

采用原型物理力学及几何参数,并对与模型试验相同测点位置处的加速度进行监测。所有结构均采用弹性本构模型,采用人工黏弹性边界条件以还原真实地基的无限状态。

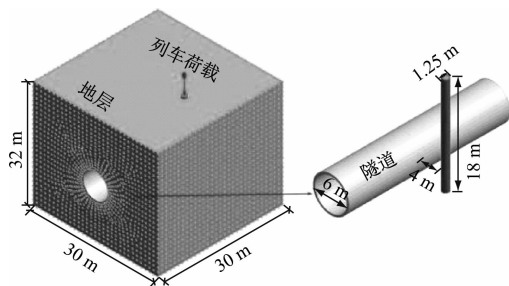


图3 数值模拟模型

Fig. 3 Numerical simulation model

### 1.3 结构动力响应特性分析

提取模型试验及数值模拟模型监测点(A1—A10)的竖向振动加速度峰值,如图4所示。

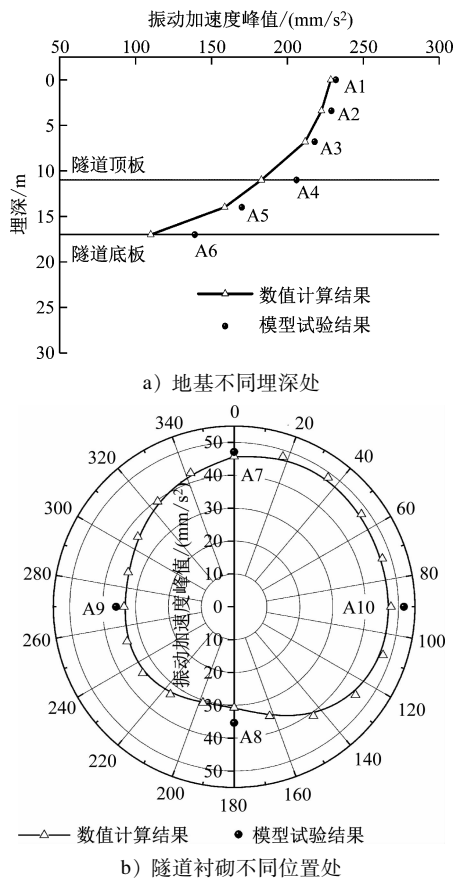


图4 地基及隧道衬砌的竖向振动加速度峰值

Fig. 4 Peak vertical vibration acceleration of foundation and tunnel lining

由图4分析可知,数值模拟计算结果和模型试验结果较为接近,且地面处的峰值加速度均为最大

值,均超过  $225 \text{ mm/s}^2$ ;随着埋深的增大,地基在振动荷载作用下的峰值加速度不断衰减,尤其是在隧道埋深处衰减幅度明显增大;隧道衬砌峰值加速度均小于  $50 \text{ mm/s}^2$ ,靠近振源侧(上侧、右侧)峰值加速度明显大于远离振源侧(下侧、左侧)。这主要是由于空心的隧道结构可近似看作特殊的“隔振空沟”,阻碍了振动在地层中传播。

文献[1]通过对世界各国的建筑物安全振动控制标准限值进行对比分析,最终确定地下结构在振动荷载作用下的振动加速度、振动速度和振动位移的峰值分别超过  $1 \text{ m/s}^2$ 、 $10 \text{ mm/s}$  和  $12 \text{ mm}$  时具有破坏风险。因此,隧道结构最危险衬砌断面的振动加速度峰值远小于安全阈值,在单点列车荷载作用下是安全的,受损可能性较小。

## 2 移动列车荷载作用下的动力响应特性

### 2.1 模型建立及计算参数

为进一步分析移动列车荷载作用下地基的动力响应规律及近接隧道的影响,根据依托工程建立桩-土复合地基及桩-土-隧复合地基两种计算模型,如图5所示。模型尺寸统一为  $160 \text{ m}(x) \times 60 \text{ m}(y) \times 80 \text{ m}(z)$ ,地层及相关结构参数如表2所示。

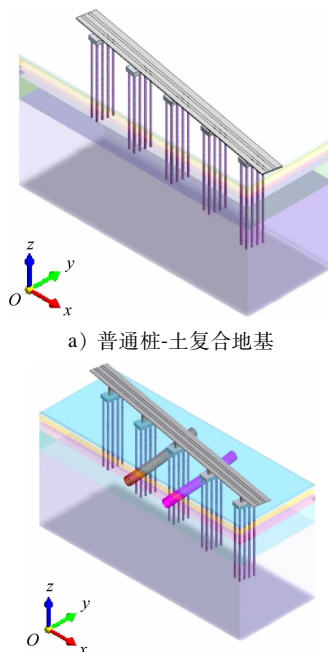


图5 数值模拟计算模型

Fig. 5 Numerical simulation calculation model

### 2.2 不同类型地基的动力响应特性

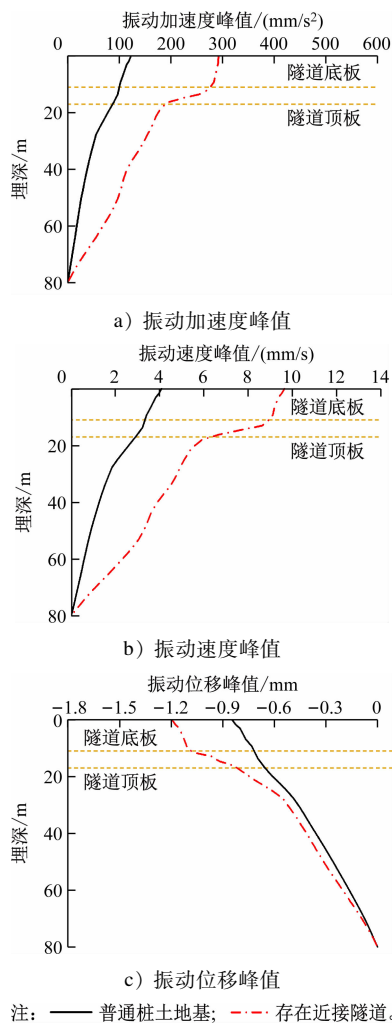
取列车速度为  $350 \text{ km/h}$  进行计算,提取设定监

测点随列车行驶过程中的加速度峰值、速度峰值和位移峰值作为地基动力响应的评价指标,绘制不同类型地基的动力响应如图 6 及图 7 所示。

表 2 地层及主要结构参数

Tab. 2 Formation and main structural parameters

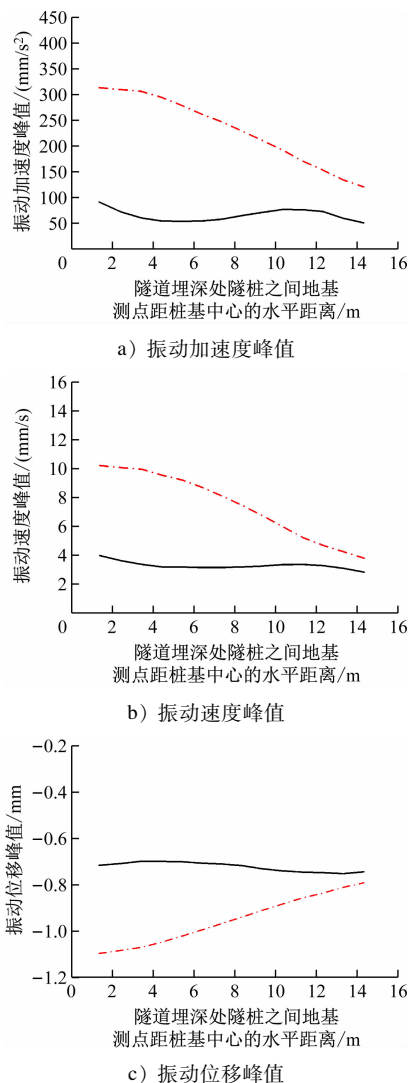
名称	弹性模量/ MPa	体积质量/ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	泊松比	内摩擦角/ ( $^\circ$ )	黏聚力/ kPa
杂填土	20.0	1.80	0.34	10.0	10
粉砂	36.0	1.68	0.31	29.0	0
中砂	44.4	1.73	0.29	31.0	0
粉黏土	30.0	1.93	0.30	20.0	22
中砂	52.4	1.97	0.29	32.5	0
粉黏土	25.2	1.91	0.30	20.5	23
中砂	66.0	2.06	0.28	34.0	0
轨道	210 000.0	7.83	0.25		
混凝土	34 020.0	2.50	0.20		



注: —— 普通桩土地基; - - - 存在近接隧道。

图 6 桩-隧间竖向动力响应对比

Fig. 6 Comparison of vertical dynamic response between pile and tunnel



注: —— 普通桩土地基; - - - 存在近接隧道。

图 7 桩-隧间地基测点的动力响应对比曲线

Fig. 7 Comparison curve of dynamic response at the foundation measuring points of pile and tunnel

由图 6 分析可知,移动列车荷载作用下存在近接隧道时,各动力响应指标同模型试验结果类似,在地面处均为最大值,振动加速度峰值、振动速度峰值和振动位移峰值分别为  $286.4 \text{ mm/s}^2$ 、 $9.2 \text{ mm/s}$  和  $1.1 \text{ mm}$ ,均满足相应的控制阈值。随着埋深的增大,两种工况下各动力响应指标均有所衰减,在隧道埋深处衰减明显,在模型边界处均趋于 0。与普通桩土地基相比,存在近接隧道时的动力响应指标均明显增大,在隧道顶板埋深处增幅最大,分别增大了 142%、58% 和 41%,足以说明近接隧道对桩-土地基动力响应的影响之大。因此在存在近接隧道时,桩-土地基内部因上部高速列车运行引起的动力响应需要引起重视。



由图 7 分析可知,存在近接隧道时地基的水平动力响应仍明显大于普通地基,且在隧道埋深处桩-隧之间各动力响应指标呈单调变化,均随着距桩基距离的增加而减小。相比之下,普通桩-土地基内部的动力响应变化幅度较小,呈“波浪形”变化。

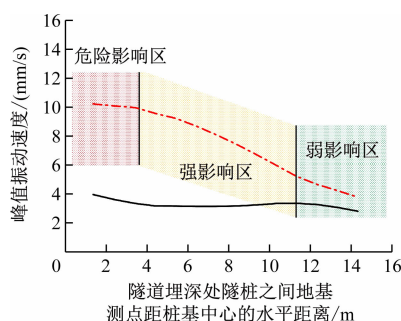
### 2.3 移动列车荷载作用下地基动力响应影响分区

由于振动速度峰值常被用来评价建筑物的损伤,文献[7]在振动速度峰值控制阈值 10 mm/s 的基础上,对移动列车荷载作用下地下结构动力响应的安全控制阈值进行了补充,具体如表 3 所示。根据分级控制阈值对隧道埋深处的桩-土地基的动力响应划分了影响分区如图 8 所示。

表 3 动力响应的分级控制阈值

Tab.3 Graded control threshold of dynamic response

振动速度峰值/(mm/s) 影响分级		减振措施
<2.5	无影响	无
2.5 ~ <5	弱影响	视结构的重要性决定是否需要
5 ~ <10	强影响	建议采用相应的减振措施
≥10	危险影响	必须采用相应的减振措施



注: —— 普通桩土地基; - - - 存在近接隧道。

图 8 桩-隧间动力响应影响分区

Fig. 8 Dynamic response influenced zones between pile and tunnel

由图 8 分析可知,桩-土地基存在近接隧道时,桩-隧之间的地基受移动列车荷载的作用,按照表 3 可分危险影响区、强影响区和弱影响区。隧道埋深处靠近桩基 3.6 m 范围内的地基振动速度峰值超过 10 mm/s,高速列车运营对此范围内的地下结构存在较大的安全风险,必须引起重视,应采用相应的减震措施;靠近桩基 3.6 ~ 11.4 m 范围内的地基处于强影响区域,虽然不会对此范围内的地下结构造成严重破坏,但仍建议采用相应的减振措施;桩基外 11.4 m 一直到隧道结构范围内的地基处于弱影响区域,移动列车荷载对该范围内的地下结构的影响较小,考虑地下结构的重要性和劣化等情况应针

对性地确定是否需要采取减振措施。

### 3 结语

本文采用模型试验和数值模拟相结合的方法,以振动加速度峰值、振动速度峰值和振动位移峰值为评价指标,揭示了存在近接隧道桩-土复合地基的动力响应特性。主要结论如下:

1) 单点振动荷载作用下,地面的加速度峰值为最大值,地基内部的加速度峰值随着距地面和桩的距离的增加而减小,且在隧道埋深处显著减小。振源附近隧道衬砌的动力响应明显大于另一侧,近接隧道具有明显的隔振效果。

2) 移动列车荷载作用下,相较于普通桩-土地基,存在近接隧道时的地基内部各动力响应指标明显增大,在隧道顶板埋深处增幅最大。且随着与桩水平距离的增加,在近接隧道的作用下,地基动力响应水平分布特征由“波浪形”分布变为单调递减分布。

3) 根据地下结构振动速度峰值的安全控制阈值,隧道埋深处距桩基础中心 3.6 m 范围内的地基处于危险影响区,3.6 ~ 11.4 m 范围内的地基处于强影响区,11.4 m 以外的地基处于弱影响区。类似的工程可参考该方法来评估移动列车荷载造成的影响,并确定近接的地下结构是否需要减振措施。

### 参考文献

- [1] 陈晨,曹瑞琅,赵宇飞,等. 列车荷载作用下高铁隧道下有小净距地铁隧道穿越时的结构动力响应特性模拟分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(1): 31.  
CHEN Chen, CAO Ruilang, ZHAO Yufei, et al. Simulation analysis on high-speed railway structural dynamic response under the action of train load when metro tunnel in minimal spacing under high-speed railway[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(1): 31.
- [2] 徐干成,李成学,王后裕,等. 地铁盾构隧道下穿京津城际高速铁路影响分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 2): 269.  
XU Gancheng, LI Chengxue, WANG Houyu, et al. Influence analysis of subway shield tunnel passing through Beijing-Tianjin intercity high-speed railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2): 269.
- [3] LIU K, SU Q, NI P, et al. Evaluation on the dynamic performance of bridge approach backfilled with fibre reinforced lightweight concrete under high-speed train loading [J]. Computers and Geotechnics, 2018, 104: 42.
- [4] 熊辉,谷亚东. 基于高速列车振动荷载的桩-土-结构相互作用分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(2): 302.

(下转第 110 页)

- [J]. Highway, 2019, 64(4): 312.
- [5] 郑邦友, 陈富东, 雷明锋, 等. 考虑生态环境效应的止水帷幕设计方法初探[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(2): 68.
- ZHENG Bangyou, CHEN Fudong, LEI Mingfeng, et al. Preliminary study on design method of waterproof curtain considering ecological environment effect[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(2): 68.
- [6] 周旻旻. 基于限量排放思想的隧道防排水理论技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- ZHOU Minyang. Tunnel waterproof and drainage technology research based on the limit drainage idea [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.
- [7] 郭涛, 王海涛, 苏鹏, 等. 大连地铁 5 号线后盐站深基坑止水帷幕优化研究[J]. 大连交通大学学报, 2021, 42(3): 65.
- GUO Tao, WANG Haitao, SU Peng, et al. Optimization study of waterproof wall of deep foundation pit of houyan station on Dalian metro line 5[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2021, 42(3): 65.
- [8] 邱明明, 杨果林, 申权, 等. 地下连续墙与止水帷幕共同作用下富水砂层深基坑变形性状[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(11): 81.
- QIU Mingming, YANG Guolin, SHEN Quan, et al. Deformation characteristics of foundation pit excavation under the combined action of diaphragm wall and impervious curtain in water-rich sandy stratum[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(11): 81.
- [9] 杨艳青, 高永涛. 矿山边坡止水帷幕被动土压力及其影响因素研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(9): 99.
- YANG Yanqing, GAO Yongtao. Passive earth pressure of waterproof curtain in mine slope and its influencing factors[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(9): 99.
- [10] 赵阳, 雷国元, 徐亚, 等. 垂直防渗帷幕渗漏条件下示踪剂迁移模拟[J]. 中国环境科学, 2020, 40(7): 2985.
- ZHAO Yang, LEI Guoyuan, XU Ya, et al. Simulation of tracer transportation under the leak of vertical flexible barrier system [J]. China Environmental Science, 2020, 40(7): 2985.
- [11] 陈星佑, 张聪, 何怀光, 等. 基于多目标-理想点法的洞庭湖淤泥制备轻质骨料最优烧结条件[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(1): 29.
- CHEN Xingyou, ZHANG Cong, HE Huaiguang, et al. Multi-Objective Optimization of Sintering Condition of Lightweight Aggregate Prepared by Dongting Lake Silt by Ideal Point Method [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(1): 29.
- [12] 徐涛, 杨磊, 郭松涛, 等. 盾构弃渣在岩溶充填注浆材料中的资源化利用[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(11): 1842.
- XU Tao, YANG Lei, GUO Songtao, et al. Material of Shield Tunnel Resource Utilization of Foundation Pit Spoil in Karst Grouting [J]. Tunnel Construction, 2023, 43(11): 1842.
- [13] 薛薇. 统计分析与 SPSS 的应用[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2021.
- XUE Wei. Statistical analysis and application of SPSS[M]. Beijing: Renmin University of China Press, 2021.
- 收稿日期: 2022-01-04 修回日期: 2022-02-24 出版日期: 2024-06-10  
Received: 2022-01-04 Revised: 2022-02-24 Published: 2024-06-10  
· 第一作者: 刘健美, 正高级工程师, liujianmei@dsjy.com  
通信作者: 刘旭, 博士研究生, liuxu6798@qq.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 104 页)

- XIONG Hui, GU Yadong. Pile-soil-structure interaction analysis based on high-speed train vibration load[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(2): 302.
- [5] 陈金光, 孟德芹, 李建博. 高铁预应力管桩桩—网复合地基动力响应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊2): 679.
- CHEN Jinguang, MENG Deqin, LI Jianbo. Study on dynamic response of high-speed railway prestressed pipe pile-net composite foundation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S2): 679.
- [6] 杨文波, 陈子全, 徐朝阳, 等. 盾构隧道与周围土体在列车振动荷载作用下的动力响应特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 537.
- YANG Wenbo, CHEN Ziquan, XU Zhaoyang, et al. Dynamic response of shield tunnels and surrounding soil induced by train vibration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 537.
- [7] 张厚贵, 刘维宁, 刘卫丰, 等. 北京地下直径线运营对地铁 2 号线隧道结构振动影响控制标准的研究[J]. 隧道建设, 2007, 27(增刊2): 93.
- ZHANG Hougui, LIU Weining, LIU Weifeng, et al. Study on the control standard of the influence of Beijing underground diameter line operation on the vibration of subway line 2 tunnel structure [J]. Tunnel Construction, 2007, 27(S2): 93.
- 收稿日期: 2023-03-23 修回日期: 2023-07-02 出版日期: 2024-06-10  
Received: 2023-03-23 Revised: 2023-07-02 Published: 2024-06-10  
· 作者: 李团社, 正高级工程师, LLTSS0511@163.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license