

Study on Dynamic Characteristics of the Underlying Silty Clay of Double-Track Subway Tunnel

Nuan Lv¹, Bo Wang^{2*}, Haitao Wang³

¹School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

²State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

³Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou Jiangsu

Email: wangbocumt@163.com

Received: Apr. 17th, 2020; accepted: May 8th, 2020; published: May 15th, 2020

Abstract

A double-track circular subway tunnel in silty clay layer was analyzed by using numerical calculation method, the max. acceleration and settlement deformation in the underlying soil of the double-track tunnel under cyclic load were obtained. The results show that 1) under the cyclic load, the dynamic response of the underlying soil of the double-track tunnel decreases gradually with the increase of distance, and the attenuation rate along the depth direction is less than that along the horizontal direction. The attenuation rate along the depth direction is about 1/2 of the rate along the horizontal direction. The superposition effect of the double-track tunnel is mainly reflected in the depth direction. 2) The dynamic response of the underlying soil of the double-track tunnel is greater than that of the single-track tunnel, in which the ratio of the peak vertical acceleration is in 1.55 - 1.87 and the ratio of the peak vertical velocity is between 1.68 and 1.70.

Keywords

Subway Tunnel, Double-Track, Dynamic Characteristics, Silty Clay, Numerical Simulation

双线地铁隧道下卧粉质黏土动力稳定性研究

吕 暖¹, 王 博^{2*}, 王海涛³

¹中国矿业大学机电工程学院, 江苏 徐州

²中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州

³江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州

*通讯作者。

Email: wangbocumt@163.com

收稿日期: 2020年4月17日; 录用日期: 2020年5月8日; 发布日期: 2020年5月15日

摘要

为研究地铁双线隧道下卧粉质黏土地层动力响应特性, 采用数值计算方法, 分析了列车循环荷载作用下双线隧道下卧土层中加速度峰值、沉降变形等的变化规律。结果表明: 1) 循环荷载作用下双线隧道下卧土体的动力响应随距离增加而逐渐衰减, 且沿深度方向衰减速度小于沿水平方向的衰减速度(深度方向衰减速率约为水平向的1/2), 循环荷载对双线隧道下卧土层叠加效应主要体现在深度方向上。2) 双线隧道中任一隧道正下方分析点的动力响应值大于单线隧道下对应分析点的值, 其中竖向加速度峰值之比介于1.55~1.87, 竖向速度峰值之比介于1.68~1.70。

关键词

地铁隧道, 双线, 动力特性, 粉质黏土, 数值分析

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

双线隧道是区间地铁列车通行常采用的方案, 伴随着我国城市地铁建设和运营历程的日益增长, 地铁列车荷载作用下双线隧道的稳定问题日益突出[1] [2]。隧道稳定问题与列车荷载作用下隧道周围地层的动力响应特性直接相关, 近年来许多专家学者进行了相关的现场实测、室内试验、数值和理论分析研究[3] [4]。包小华等[4]利用水-土耦合数值模型, 分析了苏州地铁一号线隧道周围软土地层的动力学响应, 获得了土体有效应力、超孔隙水压以及地层沉降等的变化特征。马学勇等[5]分析了南京地铁10号线单圆双线隧道下卧粉细砂层的动力响应, 结果表明列车荷载激发的超静孔隙水压约为静水压力的1%。Tang等[6]根据现场实测和数值计算结果分析了上海地区地铁列车荷载作用下软土地层沉降与孔隙水压发展规律。不难发现, 目前关于双线隧道的分析成果并不多, 双线隧道列车荷载产生的相互影响将与单线隧道结果有显著区别[7] [8], 因此, 本文通过简化建立了平行双线隧道计算模型, 模拟交会相向行驶两辆列车荷载作用, 对双线隧道下卧土体动力响应规律进行了总结, 并与循环荷载作用下单线隧道动力响应计算结果进行了对比分析。

2. 数值建模与计算工况

2.1. 几何模型

如图1所示, 采用平面应变有限元模型, 隧道中心位于同一水平, 模拟隧道外径为3 m, 衬砌厚度为0.35 m, 隧道埋深10 m, 左右边界与隧道距离30 m, 下边界与隧道底距离30 m。双线隧道中心间距分别考虑9 m、10 m和11 m三种工况, 即双线隧道净间距分别为3 m、4 m和5 m。采用三角形单元对土体和隧道衬砌进行离散, 在隧道周边以及下部的土体进行局部细化和加密。

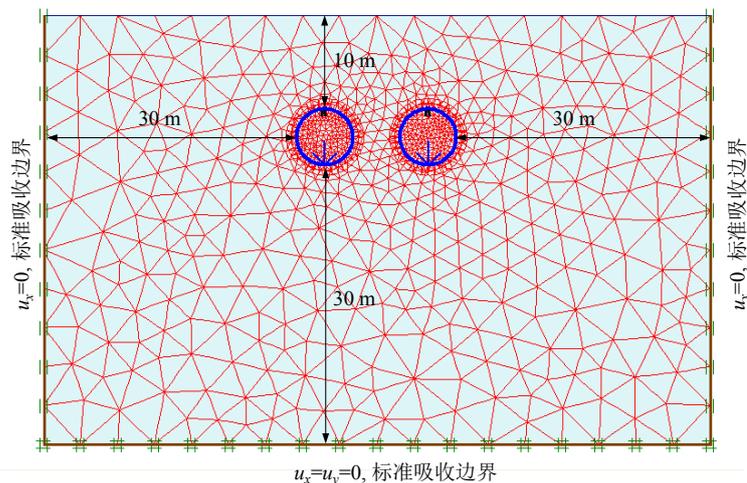


Figure 1. Sketch of the numerical simulation model

图 1. 数值模型示意图

2.2. 材料特性与边界条件

将土层简化为均质土层，采用强化岩土模型对粉质黏土层进行模拟。隧道衬砌结构使用弹性模型进行模拟。材料参数详见表 1。

Table 1. Parameters of materials

表 1. 材料参数

数量	粉质黏土	隧道
天然重度(kN/m ³)	18	8.4
弹性模量(kN/m ²)	3.0×10^4	3.4×10^9
泊松比(-)	0.3	0.15
粘聚力(kPa)	8	—
内摩擦角(°)	31	—
轴向刚度(kN)	—	1.4×10^7
抗弯刚度(kN·m)	—	1.43×10^5

数值模型两侧采用水平约束边界条件($u_x = 0$)，底部边界采用全约束边界条件($u_x = u_y = 0$)。模型的两侧及底部设置标准吸收边界以避免杂波反射。在对应边界上被阻尼器吸收的法向和剪应力分量为：

$$\begin{aligned}\sigma_n &= -C_1 \rho V_p \dot{u}_x \\ \tau &= -C_2 \rho V_s \dot{u}_y\end{aligned}\quad (1)$$

式中， ρ 是材料的密度。 V_p 和 V_s 分别是压缩波波速和剪切波波速。 C_1 和 C_2 是松弛系数，根据经验取 $C_1 = 1$ 和 $C_2 = 0.25$ 可以使波在边界上得到合理的吸收。

2.3. 循环荷载

数值计算中，地铁列车循环荷载采用简化处理方法，即在隧道底部施加单点单周期荷载，采用正弦波形式：

$$P = A + A \sin(2\pi ft - \pi/2) \tag{2}$$

式中， A 为幅值， f 为频率， t 为时间。根据文献研究成果[9]，本文计算中取幅值 $A = 41 \text{ kN}$ ，频率 $f = 3.5 \text{ Hz}$ ，循环荷载作用时间为 6 s ，循环荷载停止后继续计算 2 s ，如图 2 所示。

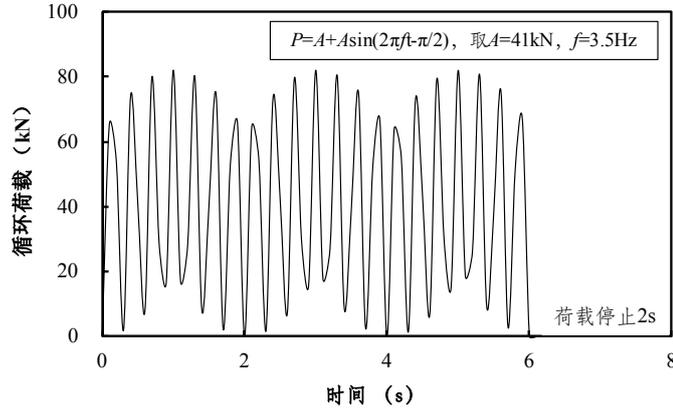


Figure 2. Curve of the cyclic load
图 2. 循环荷载曲线

3. 计算结果与分析

为分析双线隧道下卧土体的动力响应规律，并且方便后面与单线隧道进行比较，分别选择 T2 隧道中线下、双线孔隧道中线下以及 T2 隧道侧距隧道底一定距离的水平位置的若干点进行结果分析，具体分析点位置示意如图 3 所示。由于循环荷载对土体竖向动力响应的影响远大于水平方向，在以下分析中仅对竖向位移、竖向加速度和竖向速度的衰减变化规律进行分析。

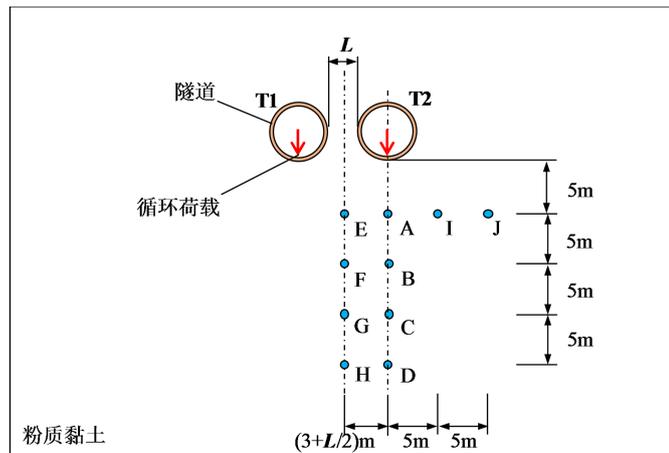


Figure 3. Location of result analysis points
图 3. 结果分析点位置示意图

3.1. 土体动力响应竖向衰减规律

以隧道 T2 正下方分析点 A、B、C、D 为例进行说明，分析点距离 T2 隧道底距离分别为 5 m 、 10 m 、 15 m 、 20 m 。图 4 和图 5 为分析点竖向加速度和速度时程曲线，可以看出，同一周期内加速度峰值正负大小基本相等，而速度峰值的负向绝对值稍大于正向峰值。土体中竖向加速度和速度峰值均随距循环荷

载作用点垂直距离的增加而呈衰减趋势(见图 6)。整体而言, 土体中动力响应在 6.9 s 左右停止, 即荷载停止施加 0.9 s 后土体振动基本停止。

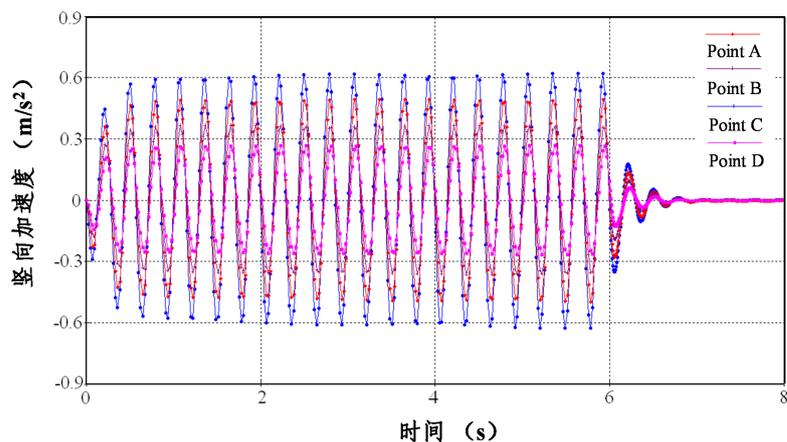


Figure 4. Vertical acceleration beneath T2 tunnel

图 4. T2 隧道下方测点竖向加速度时程图

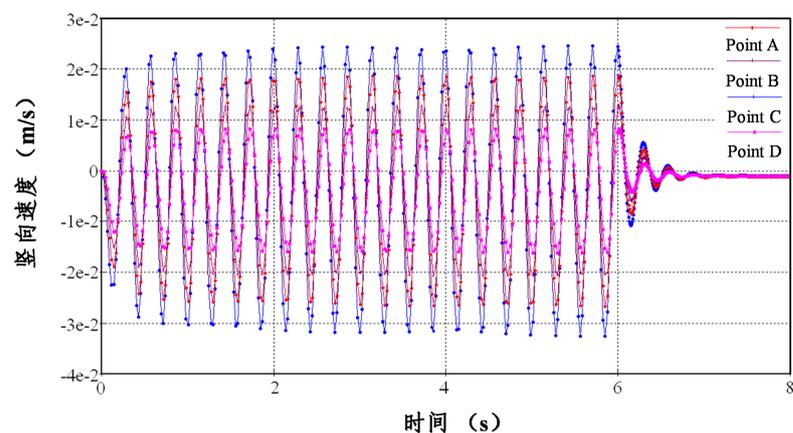


Figure 5. Vertical velocity beneath T2 tunnel

图 5. T2 隧道下方测点竖向速度时程图

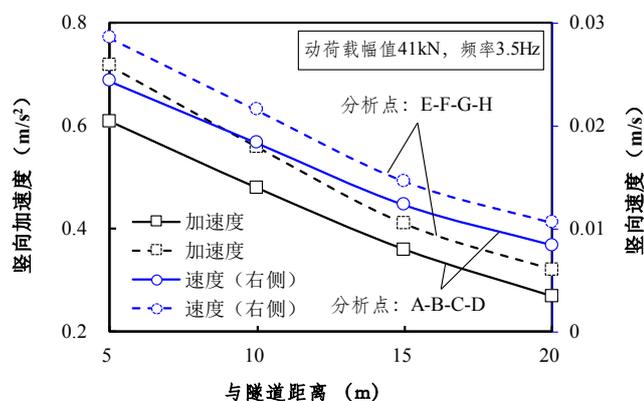


Figure 6. Attenuation curves of vertical acceleration and velocity vs vertical distance

图 6. 竖向加速度和速度随竖向距离衰减曲线

双线隧道中线位置土体由于受到两个隧道循环荷载作用的叠加影响,其动力响应值大于任一隧道正下方垂直测点的动力响应值(如图7所示)。分析点A和E与隧道下方垂直距离均为5m,分析点A位于隧道T2正下方,而分析点E位于双线隧道中线上。对应分析点A处土体竖向加速度和速度峰值分别为 0.62 m/s^2 和 0.032 m/s ,而分析点E处土体竖向加速度和速度峰值分别为 0.72 m/s^2 和 0.037 m/s 。

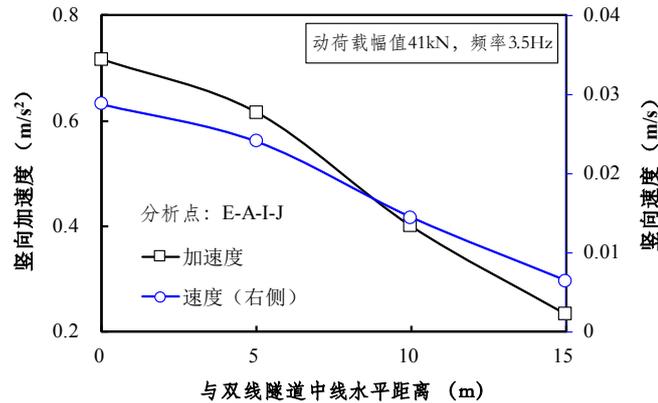


Figure 7. Attenuation curves of vertical acceleration and velocity vs horizontal distance

图7. 竖向加速度和速度随水平向距离衰减曲线

3.2. 土体动力响应水平向衰减规律

与竖向相似,土体动力响应随距离荷载作用点水平距离的增加也呈衰减趋势。图7为以同一水平上分析点E、A、I、J位置处的竖向加速度和速度衰减曲线。由图中可知,循环荷载作用下随着距离的增加土体动力响应衰减越快,且水平向衰减幅度大于竖向的衰减幅度(对比图6)。

3.3. 隧道净距影响

由以上分析可知,分析点E受双线隧道循环荷载叠加作用最显著。以下以分析点E为例,对隧道净间距L的影响进行分析。图8给出了分析点E在不同隧道净间距条件下的竖向加速度时程曲线。结果显示,随着双线隧道净间距的增加,土体竖向加速度峰值有所降低,但减小有限。对比不同净间距条件下的竖向位移云图可见(图9至图10),土体竖向位移最大值均发生在隧道上方,且位移影响区域随着双线隧道净间距的增大而有所扩大。

3.4. 双线隧道与单线隧道对比

选择T2隧道正下方分析点A、B和C与单线隧道对应位置处的动力响应进行比较[10]。图11和图12分别为竖向加速度和竖向速度峰值随深度的变化曲线。可以看出,双线隧道中振动荷载的叠加作用影响显著,且双线隧道中土体动力响应随距离的衰减要慢。模拟条件下,双线隧道竖向加速度峰值与单线隧道竖向加速度峰值之比介于1.55~1.87,两者竖向速度峰值之比介于1.68~1.70。

4. 结论

利用数值方法对双线地铁隧道下卧土体的动力响应特性进行了分析,可得到如下结论:

(1) 循环荷载作用过程中双线隧道下卧土体的竖向加速度等动力响应幅值基本稳定,波动不大,荷载停止施加后土体自振时间约为 0.9 s (近似为单线隧道下卧土体自振时间的2倍)。

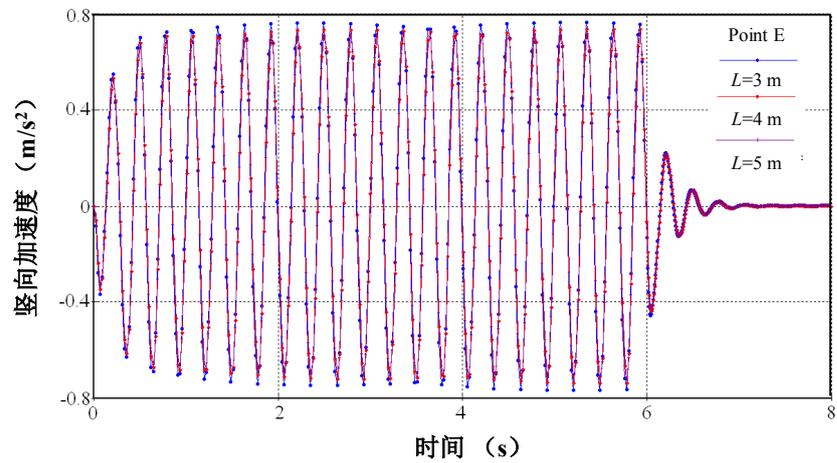


Figure 8. Vertical acceleration versus time data of point E with different net distance
图 8. 不同净间距下 E 测点竖向加速度时程图

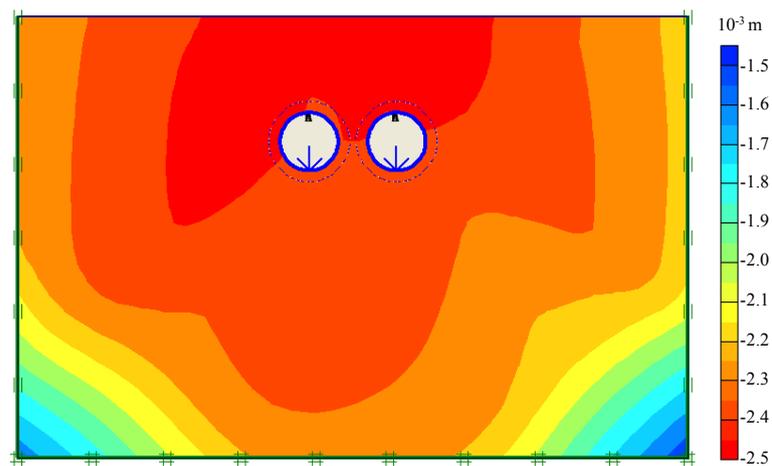


Figure 9. Contour of vertical displacement ($L = 3$ m)
图 9. 竖向位移云图($L = 3$ m)

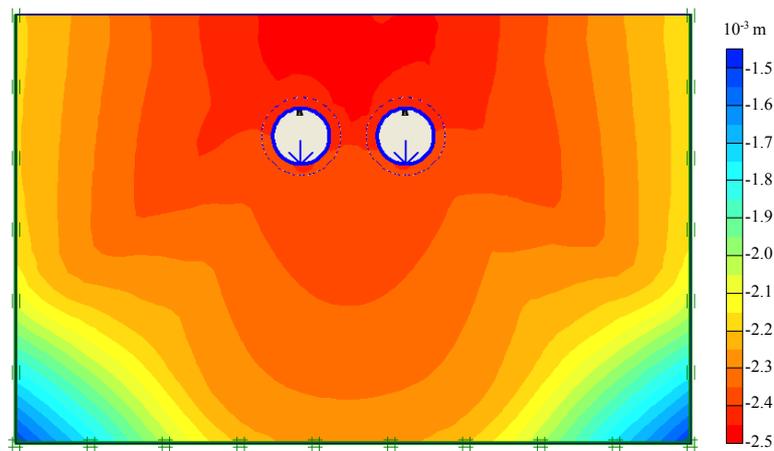


Figure 10. Contour of vertical displacement ($L = 5$ m)
图 10. 竖向位移云图($L = 5$ m)

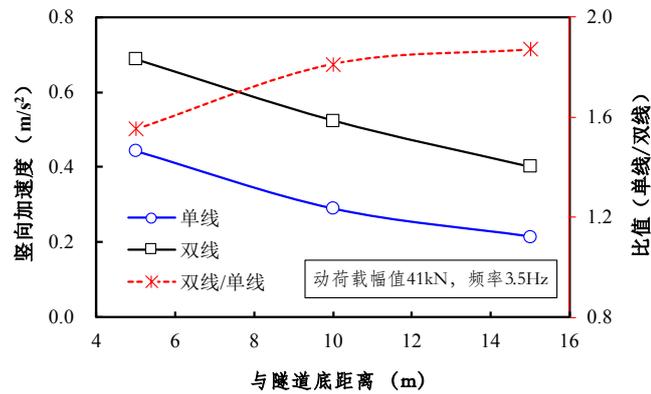


Figure 11. Comparison of vertical acceleration of single and double-track tunnel

图 11. 单双线隧道竖向加速度对比

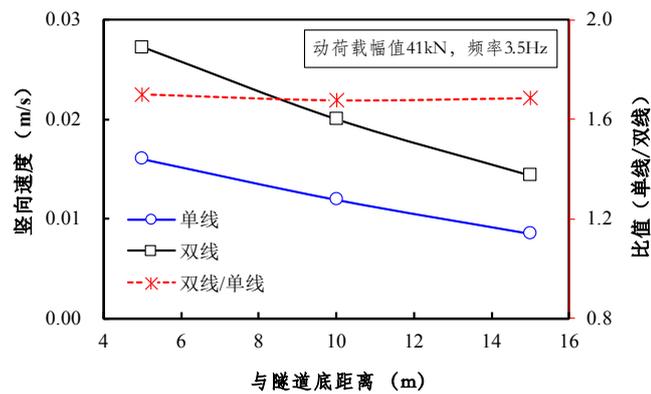


Figure 12. Comparison of vertical velocity of single and double-track tunnel

图 12. 单双线隧道竖向速度对比

(2) 循环荷载作用下双线隧道下卧土体的动力响应随距离增加而逐渐衰减,且沿深度方向衰减速度小于沿水平方向的衰减速度(深度方向衰减速率约为水平向的 1/2),表明循环荷载对双线隧道下卧土层叠加效应主要体现在深度方向。

(3) 对比双线与单线隧道下卧土体的动力响应,双线隧道中任一隧道正下方分析点的动力响应值大于单线隧道对应分析点的值,其中竖向加速度峰值之比介于 1.55~1.87,竖向速度峰值之比介于 1.68~1.70。

基金项目

国家自然科学基金(51874286); 江苏省自然科学基金项目(BK20140203)。

参考文献

- [1] 孙统立, 李浩, 吕虎, 韦良文. 双圆盾构施工扰动引起的地表位移特性分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(6): 108-114.
- [2] Huang, Q., Huang, H.-W., Ye, B., Zhang, D.W., Gu, L.L. and Zhang, F. (2017) Dynamic Response and Long-Term Settlement of a Metro Tunnel in Saturated Clay Due to Moving Train Load. *Soils and Foundations*, 57, 1059-1075. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.08.031>
- [3] 刘志强, 王飞, 姚博. 地铁隧道下卧土体动力特性模型试验研究[J]. 铁道工程学报, 2011, 156(9): 92-96.

-
- [4] 张伟伟, 金先龙, 曹露芬, 王建炜, 王新. 列车动载下双线隧道联络通道动力响应数值分析[J]. 铁道学报, 2013, 35(4): 114-120.
- [5] 包小华, 李攀, 崔宏志, 朱合华. 地铁隧道运营中复杂软土地层的动力响应[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(5): 53-60.
- [6] 马学勇, 张巍, 任家涛, 朱守兵, 朱鸿鹄. 单圆双线地铁隧道基底粉细砂层动力响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(1): 106-116.
- [7] Tang, Y.Q., Cui, Z.D., Zhang, X. and Zhao, S.K. (2008) Dynamic Response and Pore Pressure Model of the Saturated Soft Clay around the Tunnel under Vibration Loading of Shanghai Subway. *Engineering Geology*, **98**, 126-132.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.01.014>
- [8] 杨兵明, 刘保国. 地铁列车循环荷载下软土地区盾构隧道长期沉降分析[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(3): 61-67.
- [9] 李健斌, 陈健, 罗红星, 程红战, 胡之锋, 黄珏皓, 张善凯. 基于随机场理论的双线盾构隧道地层变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(7): 1748-1765.
- [10] 王飞. 软土隧道下卧土体动力响应研究[M]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.