

# 邻近堆载引起既有隧道变形响应分析\*

田栋梁<sup>1,2</sup> 徐 兴<sup>3</sup> 王伊丽<sup>4</sup> 杜明芳<sup>1</sup> 裴增增<sup>5</sup>  
施展斌<sup>6</sup> 易领兵<sup>7</sup> 李俊昊<sup>8</sup>

(1. 河南工业大学土木工程学院, 450001, 郑州; 2. 青岛理工大学土木工程学院, 266520, 青岛;  
3. 杭州浙大福世德勘测设计有限公司, 310058, 杭州; 4. 浙江同济科技职业学院艺术设计学院, 310058, 杭州;  
5. 中建八局轨道交通建设有限公司, 210046, 南京; 6. 浙江大学建筑工程学院, 310058, 杭州;  
7. 中国交通建设股份有限公司轨道交通分公司, 100088, 北京; 8. 中国建筑第七工程局有限公司, 450001, 郑州)

**摘 要** [目的]堆载易造成周边土体产生沉降变形,并可能进一步威胁到下卧既有隧道的安全,但关于此方面的理论大多停留在隧道的力学平衡方面,忽略了隧道变形中隧道系统的能量变化。因此,有必要从能量角度出发,通过理论计算获得邻近堆载对既有隧道受力变形响应的理论解析解。

[方法]介绍了隧道变形理论;采用 Boussinesq 解获得邻近堆载引起既有隧道轴线处的附加荷载,并基于双参数 Vlasov 地基模型建立隧道在堆载作用下的能量方程;采用能量变分理论,获得既有隧道的受力变形响应。[结果及结论]将所提计算方法与既有文献中的工程案例实测数据进行比较,验证了所提计算方法的准确性;与 Winkler 地基模型计算结果相比,所提计算方法的计算结果更贴近实测数据。参数研究结果表明:隧道与堆载中心间距的增大会引起隧道纵向位移及内力的减小;堆载荷载和隧道直径的增大会导致隧道在堆载作用下的隧道受力变形及弯矩有所增大;增大土体弹性模量能够有效减少邻近堆载对既有隧道的影响。

**关键词** 地铁;隧道;邻近堆载;变形响应分析;Vlasov 地基模型

**中图分类号** U231.3; U455.43

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2025.05.009

## Analysis of the Deformation Response of Existing Tunnels Induced by Adjacent Surcharge Load

TIAN Dongliang<sup>1,2</sup>, XU Xing<sup>3</sup>, WANG Yili<sup>4</sup>, DU Mingfang<sup>1</sup>, PEI Zengzeng<sup>5</sup>, SHI Zhanbin<sup>6</sup>, YI Lingbing<sup>7</sup>, LI Junhao<sup>8</sup>

(1. College of Civil Engineering, Henan University of Technology, 450001, Zhengzhou, China; 2. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, 266520, Qingdao, China; 3. Hangzhou Zhejiang University First Investigation and Design Co., Ltd., 310058, Hangzhou, China; 4.

School of Arts Design, Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, 310058, Hangzhou, China; 5. China Construction Eight Bureau Rail Transit Construction Co., Ltd., 210046, Nanjing, China; 6. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, 310058, Hangzhou, China; 7. China Transportation Construction Co., Ltd., Rail Transit Branch, 100088, Beijing, China; 8. China Construction Seventh Engineering Bureau Co., Ltd., 450001, Zhengzhou, China)

**Abstract** [Objective] Surcharge load easily causes settlement and deformation of the surrounding soil, which may further threaten the safety of the underlying existing tunnel. However, most of the theories in this regard mainly focus on the mechanical equilibrium of the tunnel, neglecting the energy changes in the tunnel system during tunnel deformation. Therefore, it is necessary to start from the perspective of energy, and obtain the theoretical analytical solution to the stress and deformation response of the existing tunnel under adjacent surcharge load through theoretical calculations. [Method] The tunnel deformation theory is introduced. The Boussinesq solution is used to obtain the additional load at the axis of the existing tunnel caused by adjacent surcharge load, and an energy equation of the tunnel under surcharge load is established based on the two-parameter Vlasov foundation model. The stress and deformation response of the existing tunnel is obtained by using the energy variational theory. [Result & Conclusion] The proposed calculation method is compared with the measured data of engineering cases in existing literature, verifying the accuracy of the proposed calculation method. Compared with the calculation results of the Winkler foundation model, the calculation results of the proposed method are closer to the measured data. The results of parameter studies show that an increase in the distance between the tunnel and the center of the surcharge

\* 国家自然科学基金青年基金项目(41807262)

load will cause a decrease in the longitudinal displacement and internal forces of the tunnel; an increase in the surcharge load and the tunnel diameter will lead to an increase in the stress, deformation and bending moment of the tunnel under surcharge load; increasing the elastic modulus of the soil can effectively reduce the impact of adjacent surcharge load on the existing tunnel.

**Key words** metro; tunnel; adjacent surcharge load; analysis of deformation response; Vlasov foundation model

## 0 引言

随着地下空间的建设发展,已有大量文献对邻近既有地铁隧道施工变形影响开展了研究<sup>[1-2]</sup>。邻近堆载会引起土体下降,导致下卧地铁隧道产生较大变形,进而发生隧道管片开裂、渗水等事故。

邻近堆卸载对既有隧道的受力变形影响的分析方法主要分为有限元模拟法、室内试验法和理论解析法,其中理论解析法是一种快速、简捷的分析方法,能够评估既有隧道的受力变形响应。文献[3]基于欧拉梁和 Winkler 地基,采用有限差分法获得了基于土体软化的地基下临时堆载对既有隧道受力变形半解析解。文献[4]基于 Winkler 地基和铁木辛柯梁模型,获得了考虑隧道剪切变形下基坑开挖对下卧隧道变形影响的差分解。文献[5]基于 Pasternak 地基和铁木辛柯梁分析了考虑隧道剪切变形下邻近堆载对既有隧道的变形影响。文献[6]基于 Vlasov 地基模型,引入侧向土体作用,通过差分法分析了既有隧道在邻近堆载作用下的受力变形响应。

目前,邻近堆载对既有隧道受力变形影响的理论研究均停留在力学平衡领域,忽略了隧道变形过程中隧道系统的能量。鉴于此,本文从能量法角度出发,采用 Vlasov 地基模型模拟隧道、土体间的相互作用,建立邻近堆载作用下的隧道总势能方程,并基于最小势能原理通过变分求解隧道受力变形响应,分析不同堆载荷载、隧道直径和土体弹性模量对既有隧道受力变形的影响。本文研究可为类似工程中分析既有隧道内力、评估既有隧道变形情况、合理制定既有隧道保护措施等提供理论基础。

## 1 隧道变形理论分析

Vlasov 地基模型示意图如图 1 所示。将既有隧道简化为搁置在 Vlasov 地基模型上的无限长梁,并

做出如下假设:①既有隧道为 1 根截面为圆形的无限长梁,其抗弯刚度为  $\lambda$ ,圆形截面直径为  $D$ ,无限长梁搁置在 Vlasov 地基模型上;②梁和地基均处在弹性变形阶段,既有隧道与周围土体协调变形;③邻近堆载引起的既有隧道轴线处的附加荷载  $q$  可直接通过 Boussinesq 解公式获得。

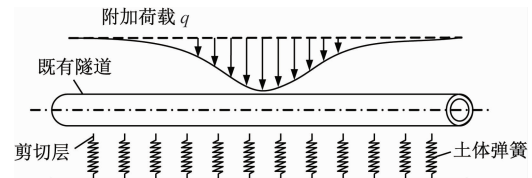


图 1 Vlasov 地基模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Vlasov foundation model

由于隧道变形为对称形式,其隧道变形位移值  $w$  满足:

$$w = \sum_{i=0}^n A_i \cos \frac{i\pi x}{L} = \begin{bmatrix} 1 & \cos \frac{\pi x}{L} & \cos \frac{2\pi x}{L} & \cdots & \cos \frac{n\pi x}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_0 & A_1 & A_2 & \cdots & A_n \end{bmatrix}^T = \mathbf{E}_{1 \times (n+1)} \cdot \mathbf{A}_{(n+1) \times 1} \quad (1)$$

$$i = 0, 1, \cdots, n$$

式中:

$x$ ——沿隧道中线方向的坐标值,单位 m;

$L$ ——隧道计算长度的一半,单位 m;

$A_i$ ——隧道第  $i$  个节点的待定系数,0 和  $n$  为隧道两端的节点。

由 Vlasov 地基模型理论可知,隧道所受系统总能量控制方程为:

$$\int_{-L}^L \lambda \frac{\partial}{\partial A_i} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial x^2} \mathbf{A} dx + D \int_{-L}^L k \frac{\partial w}{\partial A_i} \mathbf{E} \mathbf{A} dx - D \int_{-L}^L k_1 \frac{\partial}{\partial A_i} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right) \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} \mathbf{A} dx - D \int_{-L}^L q \mathbf{E} dx = 0 \quad (2)$$

式中:

$k$ ——地基弹性刚度,单位  $\text{Nm}^2$ ;

$k_1$ ——地基剪切刚度,单位  $\text{Nm}^2$ 。

将式(2)写为矩阵形式,则有:

$$(\mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_3) \mathbf{A} = \mathbf{Q} \quad (3)$$

式中:

$\mathbf{K}_1$ ——隧道抗弯刚度矩阵;

$\mathbf{K}_2$ ——地基弹性刚度矩阵;

$\mathbf{K}_3$ ——地基剪切刚度矩阵;

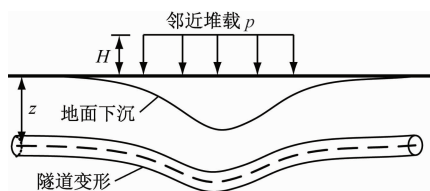
$\mathbf{Q}$ ——隧道附加荷载列向量。

至此可以得到隧道变形位移  $w$ , 根据材料力学理论可进一步获得既有隧道弯矩与剪力的解析解。值得注意的是, 当不考虑地基模型中的土体剪切作用时, 本文获得的解析解将退化成 Winkler 地基模型能量法解析解, 下文简称为 EB-W 模型。

## 2 算例验证

### 2.1 工程概况

以文献[7]中的上海某地铁隧道工程为例, 其邻近矩形堆载尺寸为 200 m(长) × 24 m(宽), 既有隧道在邻近堆载作用下发生变形, 其位置示意图如图 2 所示。文献[7]中的相关参数包括: 土体重度为 17.2 kN/m<sup>3</sup>, 邻近堆载的堆载高度为 4.5 m, 隧道轴线埋深为 8.1 m, 隧道轴线与堆载中心点水平最短距离为 0, 土体弹性模量为 9 MPa, 土体泊松比为 0.3, 隧道截面外圆直径为 6.2 m, 抗弯刚度为  $1.36 \times 10^{11}$  Nm<sup>2</sup>。



注:  $p$  为邻近堆载的单位堆载力;  $H$  为邻近堆载的堆载高度;  $z$  为隧道埋深。

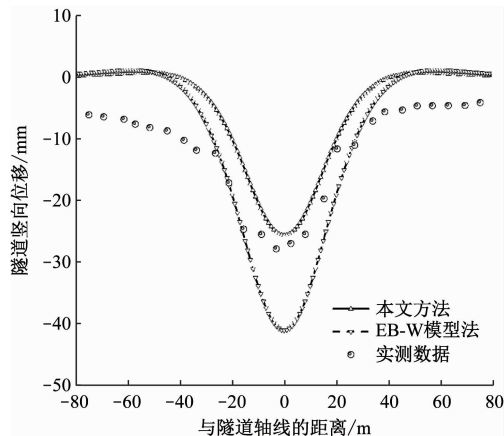
图 2 堆载与隧道位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of surcharge load and tunnel position

### 2.2 计算结果对比分析

本文将文献[7]中的实测数据作为参照组, 与本文所提方法及 EB-W 模型法进行对比分析。不同计算方法的隧道沉降计算值与实测数据对比如图 3 所示。由于现场监测数据分布在隧道中心两侧 40 m 范围内, 本文在计算隧道沉降值时截取了隧道两侧 80 m 范围内的位移变形数据。

由图 3 可知: 由本文所提方法及其退化解 EB-W 模型法获得的既有隧道沉降值沿隧道中心线呈对称分布, 且变形峰值处于隧道中心, 这一趋势和实测数据保持一致; 本文所提方法计算得到的隧道变形峰值为 25.8 mm; 而通过 EB-W 模型(即不考虑土体剪切变形时)计算获得的隧道位移峰值偏大较多, 其数值高达 41.2 mm。这是由于 Winkler 地基模型未将土体剪切效应纳入隧道地基反力的考虑范围, 忽略了土体剪切效应对地基反力作用的影



注: 与隧道轴线距离以既有隧道中线向右为正, 以既有隧道中线向左为负; 余类同。

图 3 不同计算方法的隧道沉降计算值与实测数据对比

Fig. 3 Comparison between the calculated tunnel settlement values with different calculation methods and the measured data

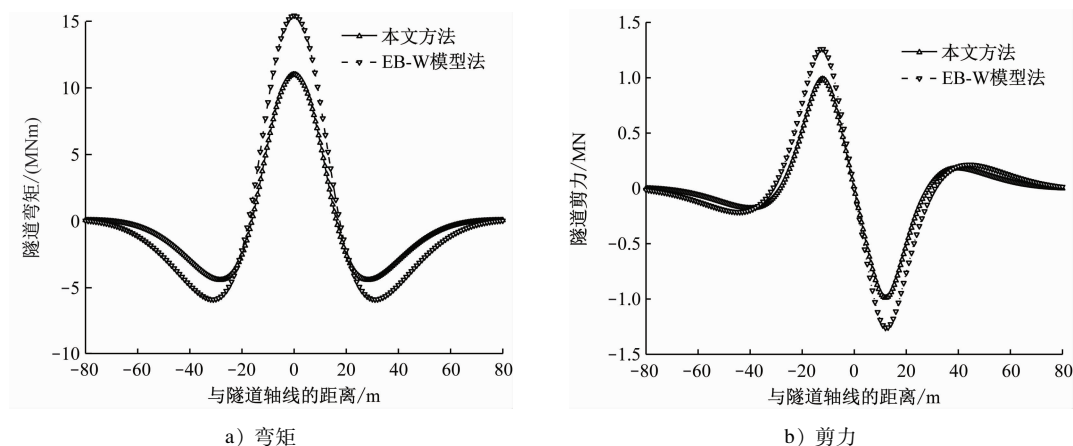
响, 最终导致其计算结果明显偏大。

本工程实测数据的隧道最大沉降变形为 27.1 mm, 与本文所提方法计算得到的隧道峰值较为接近, 但本文所提方法的计算结果略小于实测数据。造成这一结果的原因可能为在实际应用过程中, 现场人员为了减小堆载对既有隧道的影响, 在堆载正下方土体喷入混凝土以加固土体, 而该因素是模拟计算时无法纳入考虑的。总体而言, 本文所提方法的计算结果与实测数据具有较好的一致性。

为了分析不同计算方法下邻近堆载对既有隧道的内力影响, 分别采用本文所提方法及其退化解 EB-W 模型求解隧道弯矩及剪力, 结果如图 4 所示。相比于退化解 EB-W 模型法, 本文所提方法的计算结果明显偏小, 可见在分析隧道-土体相互作用时, 土体剪切效应是不能忽略的。而本文所提方法的计算结果能够较为准确地评估隧道所受内力, 在工程实践中可为既有隧道合理制定保护措施提供理论依据。

## 3 参数分析

为了研究不同堆载荷载、隧道直径及土体弹性模量下, 邻近堆载对既有隧道受力变形的影响, 假设堆载为矩形, 尺寸为 200 m × 20 m, 单位堆载力  $p = 100$  kPa, 堆载边缘与隧道轴线夹角为 90°, 隧道轴线埋深为 10 m, 隧道轴线与堆载中心点最短距离为 0, 土体弹性模量为 20 MPa, 土体泊松比为 0.3, 隧道



注:隧道弯矩以既有隧道下侧受拉为正,以既有隧道上侧受拉为负;隧道剪力以向上为正,以向下为负;余类同。

图4 不同计算方法下的隧道内力变化曲线

Fig. 4 Curves of tunnel internal force changes under different calculation methods

截面外圆直径为 6.2 m, 抗弯刚度为  $1.36 \times 10^{11} \text{ Nm}^2$ 。采用单一变量法进行参数分析。

### 3.1 堆载荷载

不同堆载荷载下,既有隧道竖向位移及弯矩变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知:在邻近堆载作用下,既有隧道竖向位移及弯矩变化曲线呈对称分布,且均在隧道中心线处有极大值;当单位堆载力  $p$  由 100 kPa 增至 500 kPa 时,隧道沉降量峰值从 24.35 mm 增加至 121.77 mm,弯矩峰值从 11.06

MNm 增加至 55.33 MNm。由此可知,隧道沉降量及弯矩峰值随着堆载荷载的增加而逐级递增,且增速保持恒定。造成这一现象的原因在于当堆载荷载线性增加时,既有隧道所受到的附加应力也会线性增加,致使隧道受力变形也会线性增强。这也说明邻近堆载的荷载大小对既有隧道的沉降影响不容忽视,应尽量减小既有隧道上方的堆载荷载,以减小既有隧道的受力变形量。

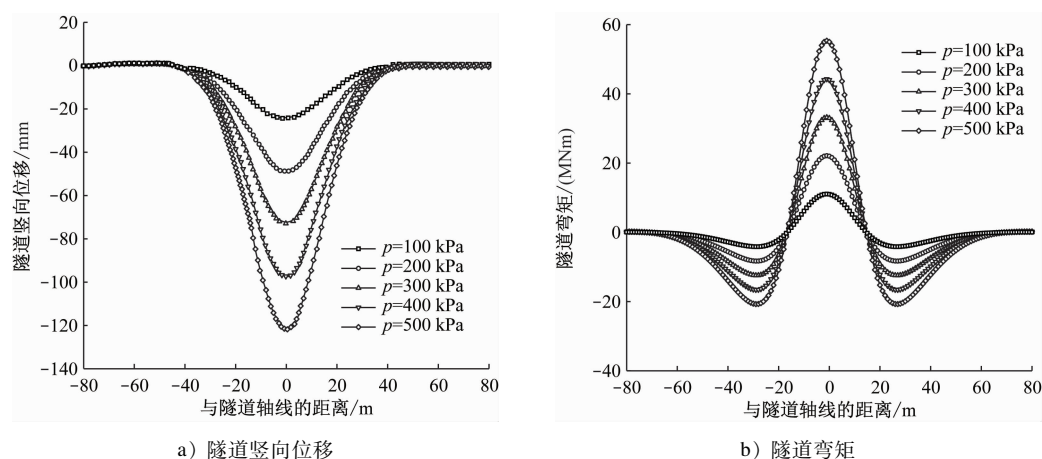


图5 不同堆载荷载下既有隧道竖向位移及弯矩变化曲线

Fig. 5 Variation curves of vertical displacement and existing tunnels bending moment under different surcharge loads

### 3.2 隧道直径

不同隧道直径下,邻近堆载引起的既有隧道最大沉降量及最大弯矩变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知:当隧道直径由 6 m 增加至 11 m 时,隧道最大沉降量从 24.12 mm 增加至 26.35 mm,既有隧道最大弯矩从 11.04 MNm 逐渐增加至 13.61 MNm,且

其增速逐渐增加。这是由于随着隧道直径的增大,隧道与堆载竖向净距逐渐减小,且隧道直径的增大会导致隧道-土体相互作用的增强,进而导致隧道受力变形的增大。因此,在实际工程中应尽可能避免在大直径隧道上方临时堆载,以免对既有隧道造成安全隐患。



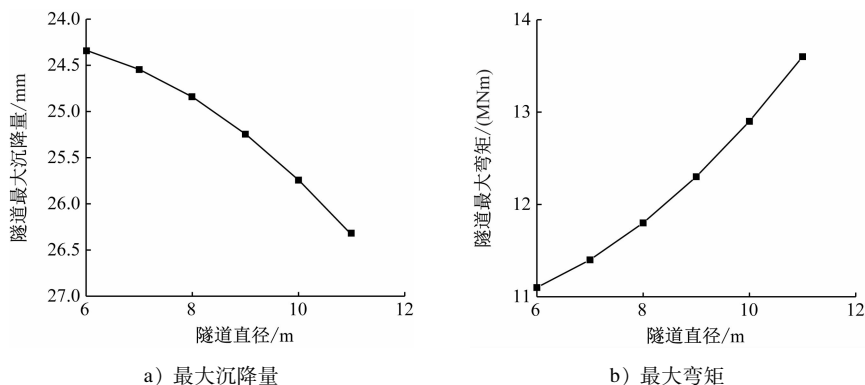


图6 不同隧道直径下既有隧道最大沉降量及最大弯矩变化曲线

Fig. 6 Maximum settlement and maximum bending moment variation curves of existing tunnels under different tunnel diameters

### 3.3 土体弹性模量

不同土体弹性模量下,邻近堆载引起的既有隧道最大沉降量及最大弯矩变化曲线如图7所示。由图7可知:当土体弹性模量从5 MPa增加至80 MPa时,隧道最大沉降量从76.76 mm迅速减小至7.16 mm,既有隧道最大弯矩从24.24 MNm迅速减小至4.14 MNm,二者的减速均逐渐增大。造成这一现象

的原因在于随着土体模量的逐渐增大,邻近堆载对既有隧道产生的附加应力在土层中充分消散,致使隧道最终受到的附加应力也在逐渐减小。这也说明增大土体弹性模量能够有效减少邻近堆载对既有隧道受力变形的影响,在实际工程中可采取注浆加固的方法来增强土体弹性模量,以增大对既有隧道的保护效果。

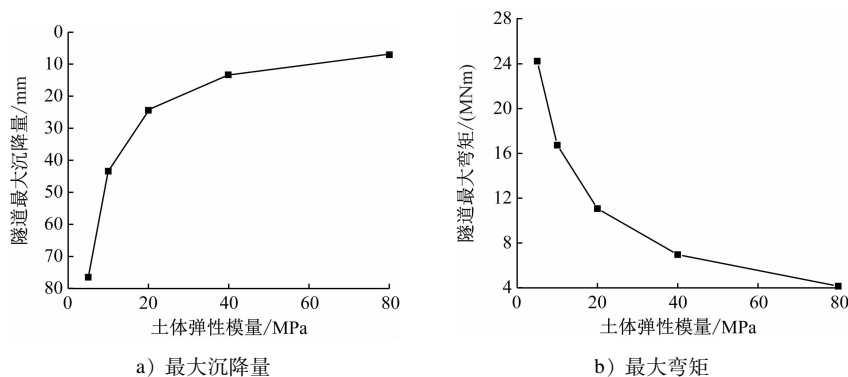


图7 不同土体弹性模量下既有隧道最大沉降量及最大弯矩变化曲线

Fig. 7 Maximum settlement and maximum bending moment variation curves of existing tunnels under different soil elastic moduli

## 4 结语

本文基于能量变分理论提出了一种邻近堆载对既有隧道受力变形的解析方法,主要获得以下结论:

1) 基于能量变分理论,将隧道简化为欧拉梁搁置在 Vlasov 地基上;综合考虑隧道变形过程中的总势能,结合能量变分理论获得既有隧道在邻近堆载作用下的受力变形响应。

2) 与文献中上海某地铁隧道工程的现场实测数据进行对比,本文所提计算方法更接近实测数据。与本文所提方法退化解的 Winkler 地基计算结果相比,本文所提计算方法更具有优越性。

3) 随着邻近堆载荷载和隧道直径的增大,邻近堆载对既有隧道的受力变形影响也有所增加,导致隧道变形量及其内力均逐渐增大;增大土体弹性模量能够有效减少邻近堆载对既有隧道的受力变形影响。

## 参考文献

- [1] 乔晓延, 齐晓强. 考虑轴力作用下盾构下穿引起既有隧道变形解析[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(12): 98.  
QIAO Xiaoyan, QI Xiaoqiang. Analytical solution for deformation of existing tunnel induced by underlying tunneling considering axis force influence [J]. Railway Standard Design, 2022, 66(12): 98.
- [2] 冯国辉, 徐兴, 侯世磊, 等. 基于 Kerr 地基模型的基坑开挖引起下卧既有隧道受力变形[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56

- (4): 474.  
FENG Guohui, XU Xing, HOU Shilei, et al. Deflections of adjacent underground tunnel induced by excavation based on Kerr foundation model[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56(4): 474.
- [3] 王敏, 甘晓露, 杜巍, 等. 考虑土体刚度衰减的地面堆载对既有隧道影响[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(6): 1965.  
WANG Min, GAN Xiaolu, DU Wei, et al. Effects of surface surcharge on existing tunnel considering soil stiffness degradation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(6): 1965.
- [4] 梁荣柱, 宗梦繁, 康成, 等. 考虑隧道剪切效应的隧道下穿对既有盾构隧道的纵向影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(3): 420.  
LIANG Rongzhu, ZONG Mengfan, KANG Cheng, et al. Longitudinal impacts of existing shield tunnel due to down-crossing tunneling considering shield tunnel shearing effect[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(3): 420.
- [5] 张勇, 马金荣, 陶祥令, 等. 地面堆载诱发下既有盾构隧道纵向变形的解析解[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(1): 66.  
ZHANG Yong, MA Jinrong, TAO Xiangling, et al. Analytical solution of longitudinal deformation of existing shield tunnel induced by surface surcharge[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(1): 66.
- [6] 张涛, 欧伟山, 齐晓强. 邻近堆载诱发既有隧道受力变形研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(2): 802.  
ZHANG Tao, OU Weishan, QI Xiaoqiang. Deformation of existing tunnel induced by adjacent surcharge[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(2): 802.
- [7] 范垚垚, 郭晓航, 邓指军, 等. 正上方加卸载对盾构隧道变形的影响分析[J]. 施工技术, 2014, 43(7): 107.  
FAN Yaoyao, GUO Xiaohang, DENG Zhijun, et al. Deformation analysis of shield tunnel with loading and unloading above[J]. Construction Technology, 2014, 43(7): 107.
- 收稿日期:2023-03-07 修回日期:2023-04-07 出版日期:2025-05-10  
Received:2023-03-07 Revised:2023-04-07 Published:2025-05-10  
• 通信作者:田栋梁,博士研究生,345265753@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 48 页)

施规划布局实际工作。

## 参考文献

- [1] 何嘉辉. 轨道交通与接驳交通一体化衔接分析[J]. 交通与运输, 2022, 38(1): 11.  
HE Jiahui. Integration of rail transit and connecting transit[J]. Traffic & Transportation, 2022, 38(1): 11.
- [2] 韦晨. 城市轨道交通换乘枢纽布局及设施配置研究:以南京地铁四号线为例[D]. 南京:东南大学, 2017.  
WEI Chen. Study on the layout and facilities configuration of urban rail transit transfer hub: taking Nanjing Metro Line 4 as an example[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [3] 李荣. 城市轨道交通接驳方式及规模研究[J]. 科学技术创新, 2021(2): 143.  
LI Rong. Study on connection mode and scale of urban rail transit[J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(2): 143.
- [4] 况丽娟, 叶霞飞. 自行车接驳城市轨道交通的特征研究[J]. 城市轨道交通研究, 2010, 13(2): 53.  
KUANG Lijuan, YE Xiafei. Characteristics of bike-and-ride at urban mass transit station[J]. Urban Mass Transit, 2010, 13(2): 53.
- [5] 任其亮. 公交停靠站泊位数确定方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2008, 8(5): 114.  
REN Qiliang. Method for determining the berth of bus stops[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(5): 114.
- [6] 顾承东, 刘江, 刘武君. 城市轨道交通站前广场规划设计[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2005.  
GU Chengdong, LIU Jiang, LIU Wujun. Urban rail transit planning and design on station square[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2005.
- [7] 熊舒威, 蒋洁滢. 东京都市圈轨道交通接驳特征对我国市域(郊)铁路一体化接驳的启示[J]. 现代城市轨道交通, 2022(6): 106.  
XIONG Shuwei, JIANG Jieying. Enlightenment from the characteristics of rail transit connections in Tokyo metropolitan area to integrated connection of urban region (suburban) railway in China[J]. Modern Urban Transit, 2022(6): 106.
- [8] 冯洁, 叶霞飞. 城市轨道交通车站衔接设施布局方案评价指标的计算方法[J]. 综合运输, 2015, 37(3): 57.  
FENG Jie, YE Xiafei. The method of evaluating indicators calculation of connecting facilities layout plan of metro stations[J]. China Transportation Review, 2015, 37(3): 57.
- 收稿日期:2022-09-27 修回日期:2022-10-29 出版日期:2025-05-10  
Received:2022-09-27 Revised:2022-10-29 Published:2025-05-10  
• 第一作者:郑翔,高级工程师,zhengx\_gzdtstjy@126.com  
通信作者:秦苑,博士研究生,2410188@tongji.edu.cn  
• ©《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