

# 软土地层双线盾构隧道下穿既有双线隧道数值分析\*

刘宇<sup>1</sup>,葛爱迪<sup>2</sup>,孙森<sup>1</sup>,张东明<sup>1</sup>,周亚东<sup>2</sup>

(1. 中交一公局第八工程有限公司,天津 300171; 2. 天津城建大学土木工程学院,天津 300384)

**[摘要]** 以软土地层场地双线盾构隧道掘进下穿既有双线隧道为研究对象,利用 PLAXIS 3D 有限元软件建立盾构隧道掘进穿越既有隧道三维有限元模型,分析盾构掘进对周围土体和既有双线隧道竖向位移的影响。研究结果表明,新建盾构隧道掘进对周围土体具有明显扰动作用,进而影响既有双线隧道;新建盾构隧道掘进时,隧道拱底隆起,拱顶沉降;随着深度的增加,既有双线隧道中心线所在断面土体和既有右线隧道竖向位移曲线均逐渐由 V 形转变为 W 形。

**[关键词]** 隧道;盾构;软土地层;沉降;隆起;有限元分析

**[中图分类号]** U455

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2097-0897(2025)15-0072-05

## Numerical Simulation Analysis of Double-line Shield Tunnel Undercrossing Existing Double-line Tunnel in Soft Soil Layer

LIU Yu<sup>1</sup>, GE Aidi<sup>2</sup>, SUN Sen<sup>1</sup>, ZHANG Dongming<sup>1</sup>, ZHOU Yadong<sup>2</sup>

(1. The Eighth Engineering Co., Ltd. of China First Highway Engineering Co., Ltd., Tianjin 300171, China;

2. College of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** Taking the excavation of double-line shield tunnels undercrossing existing double-line tunnels in soft soil layer as the research subject, this study establishes a three-dimensional finite element model of shield tunneling undercrossing existing tunnels using PLAXIS 3D software, analyzing the influence of shield tunneling on the vertical displacement of surrounding soil and the existing double-line tunnels. The research results show that the excavation of the new shield tunnels causes significant disturbance to the surrounding soil, thereby affecting the existing double-line tunnels. During the excavation of the new shield tunnels, upheaval occurs at the tunnel invert while settlement occurs at the tunnel crown. As the depth increases, the vertical displacement curves of both the soil at the cross-section along the centerline of the existing double-line tunnels and the existing right-line tunnel gradually transition from a V-shape to a W-shape.

**Keywords:** tunnels; shields; soft soil layer; settlement; upheaval; finite element analysis

### 0 引言

目前,国内外学者在由盾构隧道开挖引起的邻近土体变化方面取得大量研究成果,主要研究方法包括经验公式法、理论解析法、模型试验法、数值模拟法<sup>[1-6]</sup>。在盾构掘进对既有双线隧道影响研究方面,吴锋波等<sup>[7]</sup>、李倩倩等<sup>[8]</sup>和 Fang 等<sup>[9]</sup>对既有双线隧道不同变形模型进行分析,并对 Peck 公式进行研究。陈亮等<sup>[10]</sup>对新建直径 6m 隧道紧邻上方穿

越既有隧道沉降进行监测,结果显示盾构隧道施工对距离 10m 外既有隧道的影响相对较小。陈春来等<sup>[11]</sup>提出基于双线平行盾构隧道的修正三维 Peck 公式,并进行实际工程验证,研究地面最大沉降与双线隧道开挖面距离、轴线间水平距离的关系,研究发现随着双线隧道轴线间水平距离的增大,沉降曲线逐渐由 V 形正态分布转变为 W 形分布。张治国等<sup>[12]</sup>在双线隧道开挖过程中实施位移控制,发现使用 Schwarz 交替法得到的曲线反弯点沉降与现场实测值相近。沈俊等<sup>[13]</sup>以郑州某地铁下穿既有燃气管线为背景,利用 PLAXIS 3D 有限元软件建立数值模型,研究盾构施工不同参数对既有管线的影

\* 国家自然科学基金(51608351);天津市自然科学基金(18JCZDJC10010)

[作者简介] 刘宇,高级工程师,E-mail:573218287@qq.com

[收稿日期] 2025-05-15

响。孔杰等<sup>[14]</sup>基于合肥地铁4号线下穿雨水管线实际工程,从隧道与既有管线垂直、水平距离方面分析既有管线所受影响。Zheng等<sup>[15]</sup>利用PLAXIS 2D软件模拟盾构隧道掘进施工穿越既有双线隧道,模型充分考虑土体小应变刚度效应。Lin等<sup>[16]</sup>利用PLAXIS 3D软件建立三维数值计算模型,从新建盾构隧道与既有隧道交叉角度方面,研究盾构隧道掘进施工对既有隧道的影响,结果显示既有隧道拱顶最大变形与新旧隧道间的交叉角度关系较小,但隧道底部变形受交叉角度的影响较大。李志南等<sup>[17]</sup>建立数值模拟模型,研究肩驮式双线盾构隧道下穿既有隧道的影响机理,随着垂直间距的增加,既有隧道变形程度减小,但影响范围扩大。Yin等<sup>[18]</sup>应用三维有限元法分析盾构隧道掘进对既有隧道的影响,指出当盾构进入影响区域时,既有隧道变形速率有明显加快趋势。

盾构施工的复杂性导致其对周围环境的影响难以被具体量化,通过综合考虑关键施工因素,尽量准确反映盾构施工的影响。本文利用PLAXIS 3D有限元软件开展盾构法隧道施工穿越既有双线隧道数值模拟分析,结合三维有限元软件可视化、精细化程度高的优势,对周围土体位移和既有右线隧道位移进行分析,进而探究盾构掘进的影响。

## 1 工程概况

天津市八里台站—吴家窑站新建地铁11号线存在下穿既有地铁3号线区间的情况,地铁3号线为既有运营线路,线间距8.0m,盾构隧道衬砌外径6.2m,管片厚0.35m,环宽1.5m,覆土厚10.6m,新建盾构隧道与既有双线隧道轴线相距8.7m。该区间位于气象台路与吴家窑大街交叉路口,日常车流量大,主要土层为掘进地层,包括⑧<sub>2</sub>黏质粉土、⑧<sub>24</sub>粉砂、⑨<sub>1</sub>粉质黏土、⑨<sub>13</sub>黏质粉土,进行数值模拟分析时将土层自上而下简化为杂填土、粉砂、粉质黏土,主要物理力学参数如表1所示。

表1 土体主要物理力学参数

Table 1 Main physical and mechanical parameters of soil

土层名称	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	厚度/ m
杂填土	17	7.5	0.30	8	15.0	3.2
粉砂	18	13.0	0.30	6	30.9	8.0
粉质黏土	19	15.2	0.35	14	18.3	32.0

## 2 有限元分析

### 2.1 模型建立与参数设置

根据相关文献和圣维南原理可知,由隧道开挖

引起的扰动主要集中在3~5倍隧道直径范围内。为减小模型边界效应对计算精度的影响,通常将土体宽度设为隧道直径的5~10倍,同时,模型整体深度需达到隧道轴线下方的3倍隧道直径左右,设置该模型长、宽、高分别为60,60,40m。本构模型采用莫尔-库仑模型,混凝土选用线弹性模型模拟,隧道开挖半径3.25m,管片外径6.2m、内径5.5m、厚度350mm,既有双线隧道、盾壳、衬砌、注浆层采用弹性模型模拟,建立的三维有限元模型如图1所示。

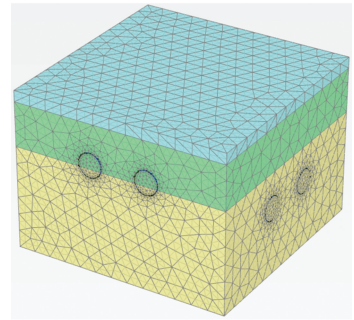


图1 三维有限元模型

Fig. 1 Three-dimensional finite element model

### 2.2 施工阶段划分

根据现场施工工艺要求,盾构穿越阶段划分为下穿准备、正式穿越和接收保护。由于本工程过程较复杂,有限元模拟时无法完全体现所有施工过程,在确保模拟过程符合工程实际且计算结果准确的前提下,在模型假定的基础上进行盾构隧道掘进核心施工步骤模拟。依据工程特点及研究要求,将盾构左右线下穿既有双线隧道划分为28个施工阶段,阶段1~14进行新建右线隧道掘进,阶段15~28进行新建左线隧道掘进,每次掘进1.5m(单环管片宽度),逐环施工,模拟得到邻近土体变形、既有双线隧道位移等。

### 2.3 结果分析

#### 2.3.1 新建盾构隧道掘进对周围土体的影响

新建盾构隧道右线先行盾构掘进,左线后续盾构掘进,为研究新建盾构隧道掘进对周围土体的影响,选取左线隧道掘进时盾构与既有双线隧道中心线距离 $l$ 分别为12,6,0,-6,-12m(正值表示盾构未掘进至中心线,负值表示盾构已穿越中心线,零值表示盾构在中心线正下方),对既有双线隧道中心线所在断面土体竖向位移进行分析,结果如图2所示。由图2可知,随着新建盾构隧道的掘进,周围土体受到明显扰动,且受扰动范围不断扩大,直至地面。新建盾构隧道掘进至既有双线隧道中心线后,新建隧道拱底附近土体呈隆起

现象,拱顶附近土体呈沉降现象。新建盾构隧道掘进完成后,周围土体竖向位移呈对称分布形态,新建盾构隧道左右线拱底附近土体隆起和拱顶附近土体沉降较相似。

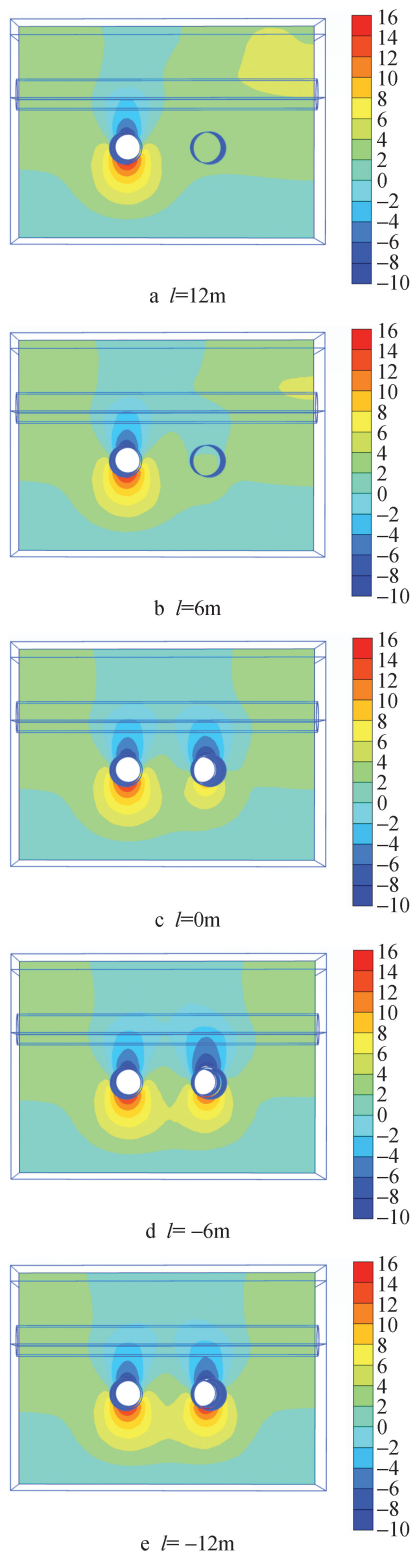


图 2 土体竖向位移云图(单位: mm)

Fig. 2 Vertical displacement cloud maps of soil (unit: mm)

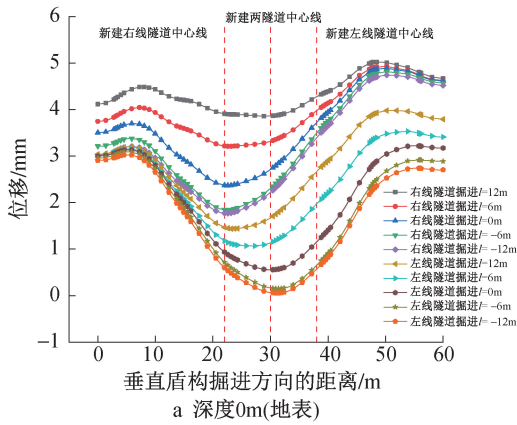
隧道中心线所在断面不同深度处土体位移进行分析,结果如图 3 所示。由图 3a 可知,新建右线隧道先行掘进至不同位置时,地表竖向位移变化曲线均在新建右线隧道中心线位置处形成 V 形沉降槽,且随着掘进施工的进行,位移变化量增大,沉降槽底部对应的竖向位移为 1.76mm;新建左线隧道掘进时,地表位移变化量持续增加,沉降槽整体向新建左线隧道所在位置偏移,沉降槽底部对应的竖向位移为 0.05mm。由图 3b 可知,新建右线隧道掘进时,既有隧道拱顶附近土体竖向位移变化曲线呈 V 形沉降槽,沉降槽底部对应的竖向位移为 0.33mm;新建左线隧道掘进时,既有隧道拱顶附近土体竖向位移变化曲线逐渐变为 W 形,左线隧道掘进完成时的最大沉降为 0.55mm。由图 3c 可知,新建右线隧道掘进时,既有隧道拱底附近土体竖向位移变化曲线呈 V 形沉降槽,最大沉降为 3.78mm;新建左线隧道掘进时,既有隧道拱底附近土体竖向位移变化曲线逐渐变为 W 形,且整体近似关于两隧道中心线对称。

综上所述,随着深度的增加,隧道周围土体竖向位移变化增大,且左线隧道掘进时土体竖向位移变化曲线由 V 形转变为 W 形的趋势越来越明显。模型边缘位置土体有不同程度的隆起,这可能是由同步注浆附加压力导致的<sup>[19]</sup>。土体总体位移变化曲线符合陈春来等<sup>[11]</sup>所提双线盾构隧道施工引起的土体沉降修正三维 Peck 公式,证明了有限元模拟结果具有较高的准确性。

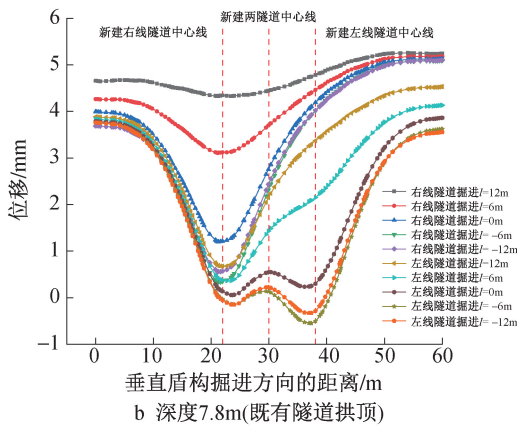
### 2.3.2 新建盾构隧道掘进对既有双线隧道的影响

新建盾构隧道右线先行盾构掘进,左线后续盾构掘进,为研究新建盾构隧道对既有双线隧道的影响,选取左线隧道掘进时盾构与既有右线隧道中心线的距离  $L$  分别为 12, 6, 0, -6, -12m, 对既有右线隧道中心线所在断面不同深度处竖向位移进行分析,结果如图 4 所示。由图 4a 可知,当新建右线隧道先行掘进至不同位置时,既有右线隧道中心线对应的地表竖向位移变化曲线均形成 V 形沉降槽,且随着掘进施工的进行,位移变化量增大;新建左线隧道掘进时,地表位移变化量继续增加,沉降槽整体向新建左线隧道所在位置偏移,新建左线隧道掘进完成时地表最大沉降为 1.03mm。由图 4b 可知,新建右线隧道掘进时,既有右线隧道拱顶竖向位移变化曲线呈 V 形沉降槽;新建左线隧道掘进时,既有右线隧道拱顶竖向位移变化量增加,且变化曲线近似关于新建两隧道中心线对称,新建左线隧道掘进完成时的最大沉降为 1.27mm。由图 4c 可知,新

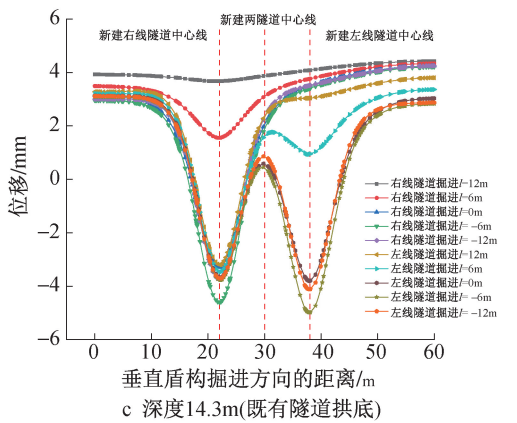
对新建盾构隧道掘进至不同位置时既有双线



a 深度0m(地表)



b 深度7.8m(既有隧道拱顶)



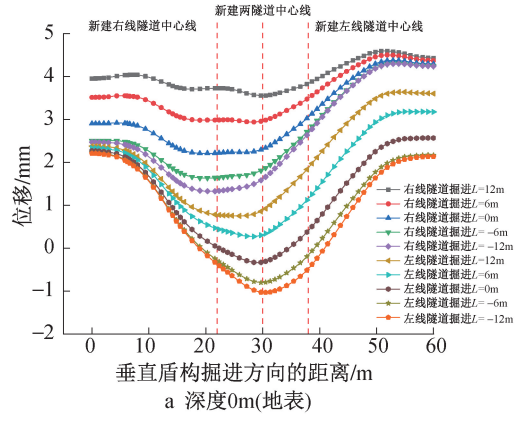
c 深度14.3m(既有隧道拱底)

图3 土体位移变化曲线

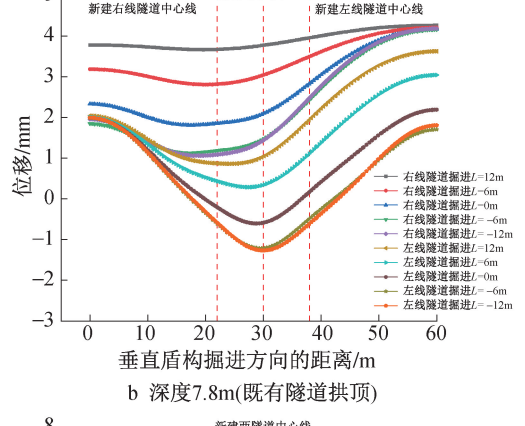
Fig. 3 Soil displacement curves

建右线隧道掘进时,既有右线隧道拱底竖向位移变化曲线呈V形沉降槽;新建左线隧道掘进时,既有右线隧道拱底竖向位移变化曲线逐渐变为W形,新建左线隧道掘进完成时既有右线隧道拱底呈隆起状态。

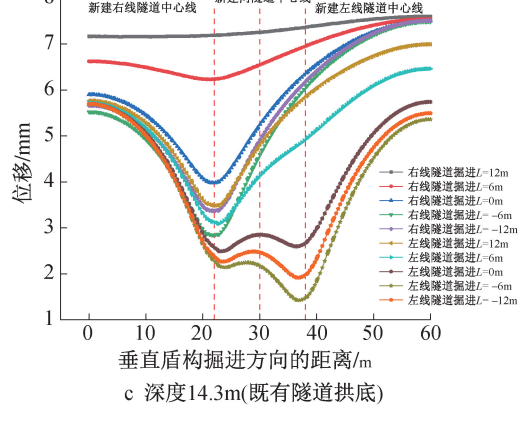
综上所述,随着深度的增加,既有右线隧道中心线所在断面位移变化量增大,且变化曲线由V形转变为W形的趋势越来越明显,变化趋势同样证明了有限元模拟结果具有较高的准确性<sup>[11]</sup>。模型边缘位置既有右线隧道有不同程度的隆起,这可能是由于模拟计算时假设既有右线隧道为线弹性模型,



a 深度0m(地表)



b 深度7.8m(既有隧道拱顶)



c 深度14.3m(既有隧道拱底)

图4 既有右线隧道中心线所在断面位移变化曲线

Fig. 4 Displacement curves of the existing right-line tunnel cross-section along the centerline

应变在新建盾构隧道掘进加卸载时呈线性变化,叠加同步注浆附加压力影响导致隆起<sup>[19]</sup>。

### 3 结语

1) 新建盾构隧道掘进对周围土体有明显的扰动效应,进而影响既有双线隧道,随着掘进施工的进行,土体受扰动范围不断扩大,对既有双线隧道的影响范围和程度相应扩大。

2) 随着深度的增加,既有双线隧道中心线所在断面土体位移变化量增大。随着新建盾构隧道的掘进,地表位移V形曲线中心轴自新建右线隧道逐渐偏移至新建左线隧道,既有隧道拱顶、拱底附近土体位移

曲线由V形逐渐转变为W形,土体影响的主导因素也从先行掘进隧道变化为后行掘进隧道。新建双线隧道掘进完成后,既有双线隧道中心线所在断面土体竖向位移近似关于新建两隧道中心线对称。

3)随着深度的增加,既有右线隧道中心线所在断面位移变化量增大。新建左线隧道掘进完成时既有右线隧道上方地表和拱顶变形存在沉降,拱底变形存在隆起。

#### 参考文献:

- [ 1 ] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[ C ]// Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1969.
- [ 2 ] O'REILLY M P, NEW B M. Settlements above tunnels in the United Kingdom-their magnitude and prediction[ R ]. 1982.
- [ 3 ] 魏纲,张世民,齐静静,等. 盾构隧道施工引起的地面变形计算方法研究[ J ]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25( S1 ): 3317-3323.  
WEI G, ZHANG S M, QI J J, et al. Study on calculation method of ground deformation induced by shield tunnel construction[ J ]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2006, 25( S1 ): 3317-3323.
- [ 4 ] 郑光辉,李结元,王攀,等. 盾构近距离下穿既有隧道掘进参数试验研究[ J ]. 施工技术(中英文), 2023, 52( 19 ): 122-127, 144.  
ZHENG G H, LI J Y, WANG P, et al. Experimental study of tunnelling parameters of shield tunnels closely underneath crossing existing tunnels[ J ]. Construction technology, 2023, 52( 19 ): 122-127, 144.
- [ 5 ] 龙际权. 盾构施工下穿建筑物时诱发沉降数值分析及预测[ J ]. 施工技术(中英文), 2025, 54( 7 ): 19-24.  
LONG J Q. Numerical analysis and prediction of settlement induced during shield construction underneath buildings[ J ]. Construction technology, 2025, 54( 7 ): 19-24.
- [ 6 ] DAI X, CAI J, DIAO Y, et al. Influence of tunnelling on the deformation of the overlying excavation bracing system and analysis of countermeasures[ J ]. Computers and geotechnics, 2021, 134: 104089.
- [ 7 ] 吴锋波,郑卫强,窄佐磊. 地铁盾构双线隧道地表横向变形特性与预测[ J ]. 施工技术(中英文), 2024, 53( 6 ): 56-62, 116.  
WU F B, ZHENG W Q, ZHAI Z L. Characteristics and prediction of surface transverse deformation of double-line shield tunnel in subway tunnel[ J ]. Construction technology, 2024, 53( 6 ): 56-62, 116.
- [ 8 ] 李倩倩,张顶立,房倩,等. 浅埋暗挖法下穿既有盾构隧道的变形特性分析[ J ]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33( S2 ): 3911-3918.  
LI Q Q, ZHANG D L, FANG Q, et al. Study of deformation characteristics of tunnels traversing adjacently under shield tunnels by shallow tunneling method[ J ]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2014, 33( S2 ): 3911-3918.
- [ 9 ] FANG Q, ZHANG D L, LI Q Q, et al. Effects of twin tunnels construction beneath existing shield-driven twin tunnels[ J ]. Tunnelling and underground space technology, 2015, 45: 128-137.
- [ 10 ] 陈亮,黄宏伟,王如路. 近距离上部穿越对原有隧道沉降的影

响分析[ J ]. 土木工程学报, 2006, 39( 6 ): 83-87.

CHEN L, HUANG H W, WANG R L. Analysis of the observed longitudinal settlement of a tunnel caused by an adjacent shield tunneling on top[ J ]. China civil engineering journal, 2006, 39( 6 ): 83-87.

- [ 11 ] 陈春来,赵城丽,魏纲,等. 基于Peck公式的双线盾构引起的土体沉降预测[ J ]. 岩土力学, 2014, 35( 8 ): 2212-2218.  
CHEN C L, ZHAO C L, WEI G, et al. Prediction of soil settlement induced by double-line shield tunnel based on Peck formula[ J ]. Rock and soil mechanics, 2014, 35( 8 ): 2212-2218.
- [ 12 ] 张治国,张成平,奚晓广. 双线隧道不同布置方式下相互作用影响的地层位移解析[ J ]. 岩土工程学报, 2019, 41( 2 ): 262-271.  
ZHANG Z G, ZHANG C P, XI X G. Closed solutions to soil displacements induced by twin-tunnel excavation under different layout patterns[ J ]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2019, 41( 2 ): 262-271.
- [ 13 ] 沈俊,晏莉,傅金阳,等. 叠线盾构隧道并行下穿燃气管线影响分析[ J ]. 地下空间与工程学报, 2021, 17( S1 ): 449-456.  
SHEN J, YAN L, FU J Y, et al. Analysis on the influence of overlapping shield tunnel passing through gas pipeline in parallel[ J ]. Chinese journal of underground space and engineering, 2021, 17( S1 ): 449-456.
- [ 14 ] 孔杰,荣传新,施鑫,等. 盾构引起的管线变形特性及近接影响分区研究[ J ]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2022, 42( 1 ): 56-63.  
KONG J, RONG C X, SHI X, et al. Research on shield-induced pipeline deformation characteristics and adjacent influence zone[ J ]. Journal of Anhui University of Science and Technology ( natural science ), 2022, 42( 1 ): 56-63.
- [ 15 ] ZHENG G, YANG X Y, ZHOU H Z, et al. A simplified prediction method for evaluating tunnel displacement induced by laterally adjacent excavations[ J ]. Computers and geotechnics, 2018, 95: 119-128.
- [ 16 ] LIN X T, CHEN R P, WU H N, et al. Deformation behaviors of existing tunnels caused by shield tunneling undercrossing with oblique angle[ J ]. Tunnelling and underground space technology, 2019, 89: 78-90.
- [ 17 ] 李志南,潘珂,王位赢,等. 双隧道开挖对地表沉降及埋管线的研究[ J ]. 广西大学学报(自然科学版), 2021, 46( 3 ): 588-597.  
LI Z N, PAN K, WANG W Y, et al. Influence of twin tunnelling excavation on surface subsidence and existing underground pipeline[ J ]. Journal of Guangxi University ( natural science edition ), 2021, 46( 3 ): 588-597.
- [ 18 ] YIN M L, JIANG H, JIANG Y S, et al. Effect of the excavation clearance of an under-crossing shield tunnel on existing shield tunnels[ J ]. Tunnelling and underground space technology, 2018, 78: 245-258.
- [ 19 ] 林存刚,张忠苗,吴世明,等. 软土地层盾构隧道施工引起的地面隆陷研究[ J ]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30( 12 ): 2583-2592.  
LIN C G, ZHANG Z M, WU S M, et al. Study of ground heave and subsidence induced by shield tunnelling in soft ground[ J ]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2011, 30( 12 ): 2583-2592.