

# 南京富水松软地层新建盾构隧道穿越引起的既有隧道工程安全等级划分

黎庆<sup>1</sup> 王宁<sup>1</sup> 彭红霞<sup>1</sup> 聂小凡<sup>2</sup>

(1. 南京地铁建设有限责任公司, 210029, 南京;

2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 正高级工程师)

**摘要** 为定量评估既有地铁盾构隧道受穿越施工扰动后的结构安全状态与服役性能, 采用 MIDAS 软件建立了新建盾构隧道穿越既有盾构隧道的三维数值模型。通过调整隧道间的竖向净距, 对南京地区以富水砂层、软土层为主的松软地层条件下的盾构隧道穿越施工引起的既有隧道的竖向位移响应进行了定量研究, 并根据隧道的力学衰减特性分析了既有隧道的安全等级。结果表明: 盾构隧道下穿、上跨施工引起沿既有隧道纵向土体的沉降曲线分别呈“W”型、“M”型, 相同地层条件下上跨施工引起的既有隧道变形的绝对值比下穿施工小; 南京富水砂层、软土层新建隧道穿越引起既有隧道沉降半槽范围分别约为 3.5 倍与 5.0 倍隧道外径; 结合既有隧道力学性能衰退特征, 以隧道纵向差异变形量作为指标将盾构隧道穿越工程划分为微弱影响、一般影响、显著影响、强烈影响等四类; 根据数值模拟和历史变形数据, 预测了南京地区 3 个典型的盾构隧道穿越工程施工完成后既有盾构隧道的竖向差异变形量, 据此计算了相应的影响等级及其同等级下的竖向变形余量。

**关键词** 盾构隧道穿越既有隧道工程; 安全等级; 富水松软地层

**中图分类号** U456.3<sup>+</sup>1

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2023.06.024

## Engineering Safety Level Classification of Existing Tunnel Disturbed by Newly-built Shield Tunnel Crossing Water-rich and Soft Stratum in Nanjing

LI Qing, WANG Ning, PENG Hongxia, NIE Xiaofan

**Abstract** To quantitatively evaluate the structure safety status and service performance of existing metro shield tunnels after being disturbed by crossing construction, a 3D numerical model of newly-built shield tunnel crossing existing shield tunnels is established by MIDAS software. By adjusting the vertical net distance among tunnels, a quantitative study is conducted on the vertical displacement response of existing tunnels

caused by shield tunnel crossing construction under conditions of soft soil strata which is mainly composed of water-rich sand and soft-soil formation in Nanjing region, and based on the mechanical attenuation characteristics of the tunnel, the safety level of the existing tunnel is analyzed. The results show that: the curves of soil mass settlement along the existing tunnel longitudinal direction caused by shield tunnel under-crossing and over-spanning construction are 'W' type and 'M' type respectively, and under the same stratigraphical condition, the absolute value of deformation of the existing tunnel caused by over-spanning construction is smaller than that caused by under-crossing construction; the half-groove range of the existing tunnel settlement caused by the water-rich and soft stratum in Nanjing is approximately 3.5 times and 5.0 times the outer diameter of the tunnel respectively. Based on the characteristics of existing tunnel mechanical performance attenuation, the shield tunnel crossing engineering is divided into four categories using the tunnel longitudinal differential deformation as an indicator: weak impact, general impact, significant impact, and intense impact. Based on numerical simulation and historical deformation data, the vertical differential deformation of existing shield tunnels after the completion of three typical shield tunnel crossing projects in Nanjing region is predicted, according to which the corresponding impact level and vertical deformation allowance at the same level are calculated.

**Key words** engineering of shield tunneling through existing tunnel; safety level; water-rich soft stratum

**First-author's address** Nanjing Metro Construction Institute Co., Ltd., 210029, Nanjing, China

随着城市化进程的加快、城市规模扩大, 地下轨道交通的建设需求日益增长。例如, 南京地下轨道交通网络迅速搭建, 在富水松软地层且竖向净距小于  $0.7D$  ( $D$  为隧道外径) 的盾构隧道穿越工程与日俱增。为确保施工过程中运营线路安全, 需对其

施工影响范围及分级展开研究。关于盾构法穿越既有隧道以及其他地下工程近接施工扰动及其影响分级,国内外学者从现场实测、数值模拟等方面展开研究。文献[1]通过实测数据对盾构隧道近距离穿越问题进行了定量分析,表明盾构隧道穿越施工的影响范围为 $4D$ ,隧道纵向变形曲线近似成正态分布,反弯点位置在 $2D$ 左右。文献[2-3]通过实测数据分析说明盾构隧道穿越期间已建隧道先隆起后沉降,曲线形态由近似正态分布向类似M型的双波峰转变。文献[4]采用有限元方法分析得到新建隧道施工时既有隧道将产生不均匀沉降、不均匀侧移和扭转,且在穿越施工节点的对称面上出现最大值。文献[5]重点分析了多线上穿、下穿及夹穿3种典型穿越施工中因地层损失和开挖卸荷引起的地面沉降以及既有隧道纵向变形规律。文献[6]针对软土地质,分别改变两座地铁隧道的竖向净距与角度进行计算,结果表明,两隧道竖向净距与角度不同,既有隧道变形与衬砌内力变化不同。文献[7]通过对隧道开挖进行模拟,总结了6种近接施工影响分区分度准则,并依据近接影响度表达式确定近接施工影响分区。文献[8]采用盾构法统一土体移动模型求解得到土体位移等值线图,并将隧道周围土体划分为4个影响区。上述研究对单个隧道穿越工程中既有隧道的变形、力学响应特征展开了大量分析,但尚未有文献系统性地对盾构隧道穿越工程进行安全等级划分。

本文依托工程实例,基于有限元数值模拟对南京地区富水砂层、软土层中盾构隧道上跨、下穿既有地铁隧道竖向变形规律进行了计算,明确了盾构隧道穿越工程中的竖向净距与既有隧道竖向变形两者之间的关系,结合既有隧道力学性能特征,以隧道差异变形量作为指标对盾构隧道穿越工程引起的既有隧道的安全等级进行了划分。

## 1 工程概况

### 1.1 盾构隧道穿越既有隧道工程概况

南京地铁5号线(以下简称“5号线”)九龙湖站—诚信大道站盾构区间垂直下穿既有运营3号线九龙湖站—诚信大道站区间隧道,最小竖向净距为1.95 m;5号线三山街站—朝天宫站盾构区间垂直下穿既有运营1号线三山街站—张府园站区间隧道,竖向净距为3.70 m;7号线永初路站—雨润大街站盾构区间垂直上跨既有运营2号线油坊桥站—雨

润大街站区间隧道,竖向净距为1.50 m。3个盾构隧道穿越节点处其与既有隧道的竖向净距均小于 $0.7D$ ,属于小净距隧道穿越施工。新建盾构隧道与既有隧道分别为分离式单洞和单线盾构隧道,管片外径均为6 200 mm,厚度为350 mm、环宽为1.2 m。3个盾构隧道穿越既有运营隧道节点的剖面图如图1—图3所示。

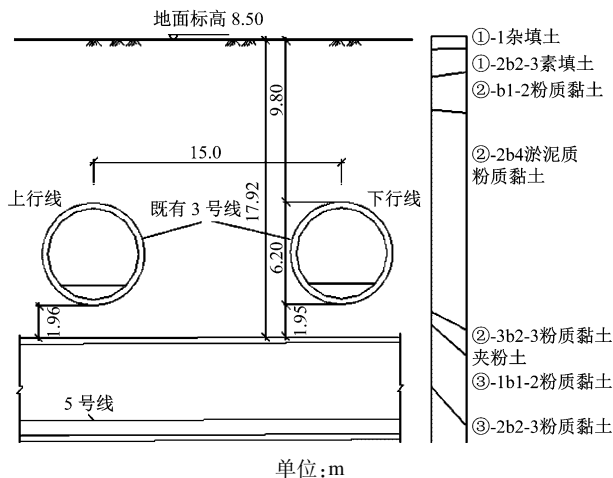


图1 5号线盾构隧道垂直下穿既有3号线隧道剖面图

Fig. 1 Profile diagram of Line 5 shield tunnel vertically under-crossing existing Line 3 tunnels

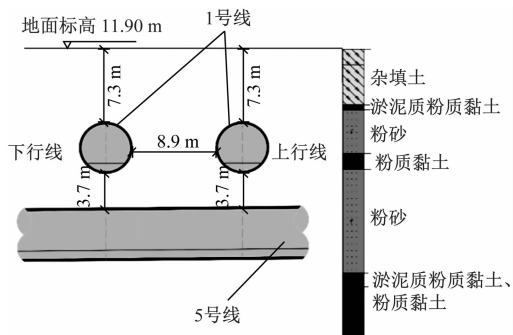


图2 5号线盾构隧道垂直下穿既有1号线隧道剖面图

Fig. 2 Profile diagram of Line 5 shield tunnel vertically under-crossing existing Line 1 tunnels

### 1.2 工程地质与水文地质概况

上述3个盾构隧道穿越节点均处于河漫滩地貌单元,场地内以软流塑淤泥质粉质黏土和松散粉细砂为主,土层具有中、高压缩性,地层含水量达30%~40%。盾构隧道穿越既有隧道节点的工程地质与水文地质条件如表1所示。

## 2 盾构隧道穿越既有隧道三维数值分析

### 2.1 有限元模型的建立

在盾构隧道穿越既有隧道工程有限元模型中,

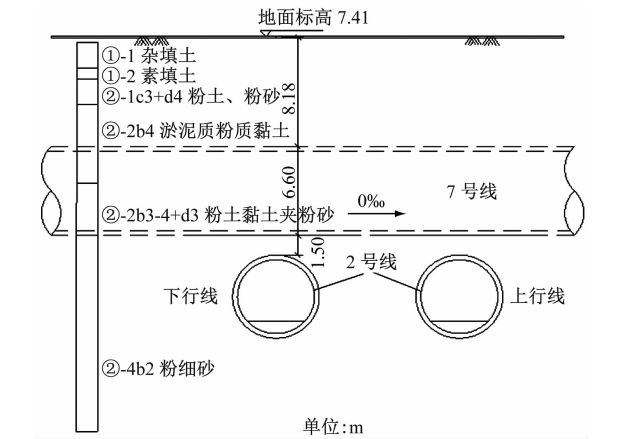


图3 7号线盾构隧道垂直上跨既有2号线隧道剖面图

Fig.3 Profile diagram of Line 7 shield tunnel vertically over-spanning existing Line 2 tunnels

表1 盾构隧道穿越既有隧道节点的工程地质与水文地质条件

Tab.1 Engineering stratigraphical and hydrogeological conditions of shield tunnel crossing existing tunnel nodes

盾构隧道穿越节点	地貌单元	工程地质	水文地质
5号线下穿3号线	秦淮河漫滩	淤泥质粉质黏土	潜水
5号线下穿1号线	秦淮河漫滩	粉砂	潜水及承压水
7号线上跨2号线	长江漫滩	粉细砂	潜水及承压水

表2 南京地区典型富水松软地层和管片衬砌结构物理力学参数

Tab.2 Physical and mechanical parameters of typical water-rich soft stratum and segment lining structure in Nanjing area

名称	重度/(kN/m <sup>3</sup> )	孔隙比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa	泊松比
淤泥质粉质黏土	17.7	1.18	12.1	10.8	2.87	0.4
粉细砂	18.7	0.88	8.1	29.3	7.23	0.3
管片衬砌	25.0				34.50	0.2

### 2.3 计算结果分析

富水松软砂层、淤泥质粉质黏土层中不同竖向净距下盾构隧道上跨、下穿工程引起的既有隧道竖向变形曲线如图5所示。由图5可见:盾构隧道下穿、上跨工程引起的沿既有隧道纵向土体的沉降曲线分别呈“W”“M”型;沉降峰值位于盾构中心线附近,沉降槽宽度在砂层中约3.5*D*、在软土层中约5.0*D*。

不同地质条件下盾构隧道小净距穿越工程引起的既有隧道竖向变形如表3所示。

由表3对比分析可知:相同地层条件下盾构隧道上跨较下穿引起的既有隧道变形量略小;相同的穿越形式下富水砂层较富水软土层引起的既有隧

围岩采用修正的莫尔-库伦本构模型,隧道衬砌结构及土层假定为各向同性均质线性材料,采用接触单元对衬砌与土体之间的接触进行模拟。分别在富水软土和富水砂层中建立盾构隧道穿越既有隧道有限元模型,如图4所示。将盾构隧道穿越段其与既有隧道的竖向净距扩展至0.1*D*、0.3*D*、0.5*D*、1.0*D*、1.5*D*,以此研究盾构隧道穿越段其与既有隧道的竖向净距与隧道竖向变形的相关性规律。

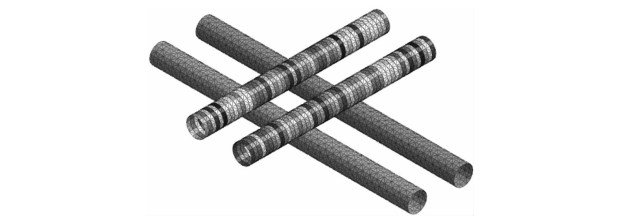


图4 盾构隧道穿越既有隧道数值模型图

Fig.4 Numerical model diagram of shield tunnel crossing existing tunnel

### 2.2 计算参数

南京地区典型富水松软地层物理力学参数取值见表2。

在盾构隧道推进过程的模拟中,取盾构掌子面土仓(或泥水仓)压力为2.3 MPa,壁后同步注浆压力为0.15~0.20 MPa。

道变形量较小。结合施工期间实测数据,盾构隧道各测点在上跨时引起既有隧道的隆起最大值约为5 mm(采取了一定加固措施),且处于数值模拟相应竖向净距下的变形量区间。

## 3 盾构隧道小净距穿越引起的既有隧道结构安全影响分级

### 3.1 盾构隧道小净距穿越引起的既有隧道结构安全影响分级指标确定

CJJ/T 202—2013《城市轨道交通结构安全保护技术规范》以隧道变形曲率半径或隧道变形相对曲率作为隧道纵向变形的控制标准。在工程运用过程中,可将变形曲率半径简化为一定区段长度下隧

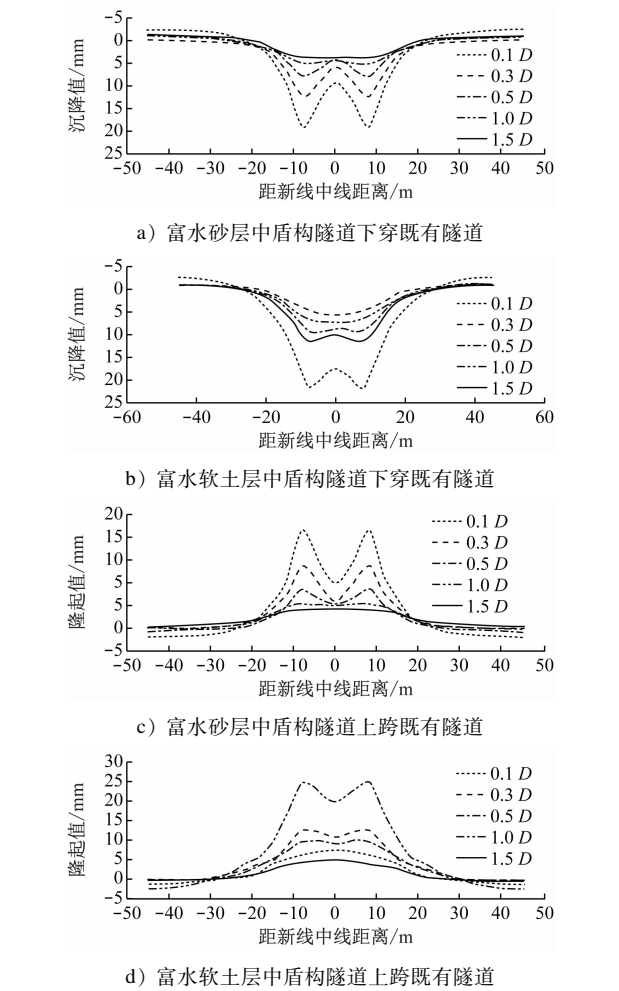


图5 不同土层中盾构隧道小净距穿越工程引起的既有隧道竖向变形曲线

Fig. 5 Curve of existing tunnel vertical deformation caused by shield tunnel small-clearance crossing construction in various soil strata

表3 盾构隧道小净距穿越工程引起的既有隧道竖向变形  
Tab.3 Vertical deformation of existing tunnel caused by shield tunnel small-clearance crossing engineering

穿越形式	地质条件	竖向净距/m	竖向变形/mm
下穿	富水砂层	$(0.1 \sim 1.5) D$	4 ~ 19
下穿	富水软土	$(0.1 \sim 1.5) D$	9 ~ 27
上跨	富水砂层	$(0.1 \sim 1.5) D$	3 ~ 16
上跨	富水软土	$(0.1 \sim 1.5) D$	5 ~ 25

道的差异变形量。隧道沉降量与沉降控制参数的关系如图6所示。根据隧道沉降槽的几何关系,可知变形曲率半径 $R$ 同单环最大偏转角 $\theta_i$ 与测量数据间的对应关系:

$$R = \frac{1}{2} \frac{L^2}{h} + \frac{1}{2} h \approx \frac{1}{2} \frac{L^2}{h}$$

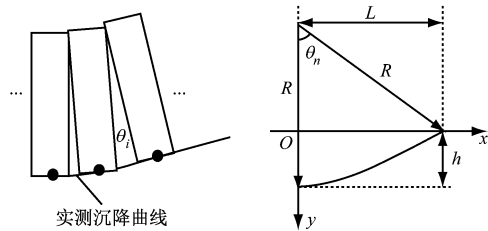
(1)

$$\theta_i = \frac{1}{n-1} \theta_n = \frac{1}{n-1} \arcsin\left(\frac{L}{R}\right) \approx \frac{1}{n-1} \arcsin\left(\frac{2h}{L}\right)$$

(2)

式中:

- $L$ ——不均匀变形槽长度;
- $h$ ——最大不均匀沉降量;
- $n$ ——变形槽内盾构管片的环数;
- $\theta_n$ ——变形槽对应的圆心角。



a) 隧道实测沉降曲线    b) 隧道沉降控制参数关系

图6 隧道实测沉降曲线与沉降控制参数关系图  
Fig. 6 Relation diagram of tunnel field-measured settlement curves and settlement control parameters

通过式(1)一式(2),结合南京地区既有隧道力学性能衰退特征<sup>[9]</sup>,以砂层 $3.5 D$ 、软土 $5.0 D$ 作为盾构隧道穿越引起的既有隧道的变形半槽的长度,由此计算得到的隧道结构差异变形量安全控制指标如表4—表5所示。

表4 富水砂层盾构隧道穿越引起的既有隧道结构安全影响分级  
Tab. 4 Classification of existing tunnel structure safety levels caused by water-rich sandy stratum shield tunnelling

项目	差异变形量/mm	安全影响分级
正常工作	$\leq \pm 15$	微弱
部分环缝螺栓屈服	$\pm 15 \sim \pm 30$	一般
半数环缝螺栓屈服	$\pm 30 \sim \pm 70$	显著
混凝土达到抗压强度极限值	$> \pm 70$	强烈

表5 富水软土盾构隧道穿越引起的既有隧道结构安全影响分级  
Tab. 5 Classification of existing tunnel structure safety caused by shield tunnelling in water-rich soft soil stratum

结构性能	差异变形量/mm	安全影响分级
正常工作	$\leq \pm 25$	微弱
部分环缝螺栓屈服	$\pm 25 \sim \pm 30$	一般
半数环缝螺栓屈服	$\pm 30 \sim \pm 80$	显著
混凝土达到抗压强度极限值	$> \pm 80$	强烈

3.2 盾构隧道穿越引起的既有隧道安全影响分级

分别建立 5 号线盾构隧道下穿既有运营 3 号线(富水软土层)、5 号线下穿既有运营 1 号线(富水砂层)、7 号线上跨既有运营 2 号线(富水砂层)有限元模型,研究新建盾构隧道穿越既有隧道施工引起的差异沉降。根据计算结果,3 个盾构隧道小净距穿

越工程引起的既有隧道不均匀变形槽范围内最大差异变形量分别为 -16.8 mm、-7.8 mm、7.2 mm。南京地铁既有线路开通以来运营监测显示,盾构隧道穿越节点处地面沉降槽范围内的竖向变形量如图 7 所示。

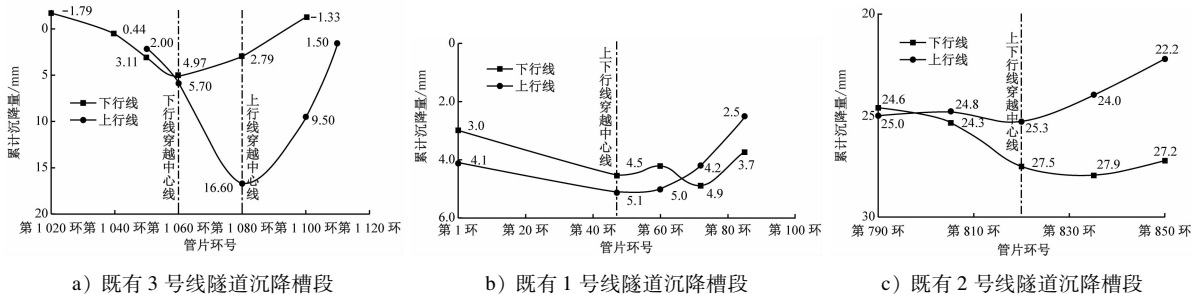


图 7 盾构隧道小净距穿越工程引起的既有隧道沉降曲线

Fig.7 Curves of existing tunnel settlement caused by shield tunnel small-clearance crossing project

结合上述盾构隧道穿越引起的既有隧道施工数值模拟差异沉降量计算结果,以及穿越引起的变形槽区段的既有隧道运营期监测沉降量,预测施工完成后既有盾构隧道的差异变形量。根据最终的差异变形量,结合表 4—表 5 安全影响分级标准对盾构隧道穿越工程对既有隧道结构安全影响实现量化分级。

安全影响分级。由表 6 可知:5 号线盾构隧道下穿 1 号线隧道区间及 7 号线上跨 2 号线隧道区间引起的既有隧道变形槽范围内差异变形量分别为 -10.4 mm、4.1 mm,安全影响分级均为微弱影响;5 号线下穿 3 号线隧道区间施工引起的既有隧道变形槽范围内差异变形量为 -31.9 mm,安全影响分级为显著影响。

表 6 为 3 个盾构隧道穿越工程对既有隧道结构

表 6 3 个盾构隧道穿越工程对既有隧道结构安全影响分级

Tab.6 Classification of safety levels of three shield tunnelling projects on existing tunnel structure

盾构隧道穿越工程	富水地层	差异变形量/mm			安全影响分级	结构性能
		施工阶段	运营阶段	总计		
5 号线下穿 3 号线	软土	-16.8	-15.1	-31.9	显著	半数螺栓屈服
5 号线下穿 1 号线	砂层	-7.8	-2.6	-10.4	微弱	正常工作
7 号线上跨 2 号线	砂层	+7.2	-3.1	+4.1	微弱	正常工作

注:差异变形量中“+”表示隆起,“-”表示沉降。

4 结语

- 1) 通过对不同竖向净距盾构隧道上、下穿既有盾构隧道数值模型进行计算得到,盾构隧道小净距下穿、上跨既有隧道施工引发隧道结构沿纵向最终呈“W”“M”型竖向变形状态。
- 2) 通过分析盾构穿越期间既有隧道纵向不均匀变形槽曲线,得到盾构隧道小净距穿越施工引起既有隧道变形半槽范围,其在南京地区的富水砂层中为 3.5 D,在富水软土层中为 5.0 D。

- 3) 依据差异变形量引起的既有隧道力学性能衰退特征,将穿越工程对既有隧道的安全影响等级划分为微弱影响、一般影响、显著影响及强烈影响等 4 个等级。
- 4) 结合新建盾构隧道穿越施工数值模拟结果和既有隧道运营期实测数据,预测施工完成后既有隧道的差异变形量,并对 3 个盾构隧道穿越对既有隧道结构的施工影响实现量化分级,对后续施工辅助措施的确定具有显著意义。

(下转第 147 页)

- Railway Publishing House, 2016.
- [2] 杨扬. 车站信号控制系统[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2012:10-30.
- YANG Yang. Station signal control system[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2012:10-30.
- [3] 胡晓辉, 韩佳芮. 车站联锁进路控制逻辑的形式化方法[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(17): 229.
- HU Xiaohui, HAN Jiarui. Route control station interlock logic of formal methods[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(17): 229.
- [4] 周果, 赵会兵. 城轨计算机联锁的数据安全性验证[J]. 铁道学报, 2016(8): 63.
- ZHOU Guo, ZHAO Huibing. Data security verification of urban rail computer interlocking[J]. Journal of the China Railway Society, 2016(8): 63.
- [5] 王文龙, 梁木海. 地铁联锁站数据监测系统的设计研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(12): 127.
- WANG Wenlong, LIANG Muhai. On the design of interlocking station data monitoring system[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(12): 127.
- [6] 付新华, 肖明清. 基于一种匹配函数的ATS资源自动配置方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(12): 1392.
- FU Xinhua, XIAO Mingqing. Automatic configuration approach for ATS test resource based on a kind of matching function[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(12): 1392.
- [7] HUANG L. The past, present and future of railway interlocking system[C]//IEEE. 2020 IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE). Beijing: IEEE, 2020: 170.
- [8] WANG H, XU T, YUAN T. Novel online safety observer for railway interlocking system[J]. Journal of Transportation Engineering, 2013, 139(7): 719.
- [9] ROANES-LOZANO E, ROANES-MARCÍAS E, LAITA L M. A computer algebra approach to the design of routes and the study of their compatibility in a railway interlocking[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2002, 58(3): 203.
- [10] 梁艺凡, 谭丽, 冯挺. A\* 进路搜索算法的研究与实现[J]. 铁道标准设计, 2013, 57(2): 117.
- LIANG Yifan, TAN Li, FENG Ting. Research and implementation of A\* algorithm on route search[J]. Railway Standard Design, 2013, 57(2): 117.

(收稿日期:2021-04-29)

(上接第141页)

## 参考文献

- [1] 邵华, 张子新. 盾构近距离穿越施工对已运营隧道的扰动影响分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊2): 545.
- SHAO Hua, ZHANG Zixin. Analysis of disturbing effect on running subway caused by adjacent shield-driven[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S2): 545.
- [2] 朱蕾, 黄宏伟. 盾构近距离上穿运营隧道的实测数据分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(10): 1962.
- ZHU Lei, HUANG Hongwei. Monitoring data analysis of disturbing effect caused by shield-driven over operating tunnel[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(10): 1962.
- [3] 朱蕾, 赵敬妍. 盾构近距离下穿对上覆已建隧道影响的实测研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(3): 656.
- ZHU Lei, ZHAO Jingyan. Monitoring data analysis of shield-driven construction undercrossing the existing tunnel in a short distance[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3): 656.
- [4] 方勇, 何川. 盾构法修建正交下穿地铁隧道对上覆隧道的影响分析[J]. 铁道学报, 2007, 29(2): 83.
- FANG Yong, HE Chuan. Analysis of influence of undercrossing subway shield tunneling construction on the overlying tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2007, 29(2): 83.
- [5] 张晓清, 张孟喜, 李林, 等. 多线叠交盾构隧道近距离穿越施工扰动机制研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1133.
- ZHANG Xiaqing, ZHANG Mengxi, LI Lin, et al. Mechanism of approaching construction disturbance caused by multi-line overlapped shield tunnelling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 1133.
- [6] 丁智, 吴云双, 张霄, 等. 软土盾构隧道近距离穿越既有地铁影响数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(3): 663.
- DING Zhi, WU Yunshuang, ZHANG Xiao, et al. Numerical analysis of influence of shield tunnel in soft soil passing over existing nearby subway[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(3): 663.
- [7] 王宁. 既有隧道两侧新建近接隧道施工力学行为及影响分区研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- WANG Ning. Study on construction mechanical behavior and influence zoning of new adjacent tunnels on both sides of existing tunnels[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [8] 魏纲, 王霄, 张鑫海. 基于位移准则的盾构隧道施工影响分区方法研究[J]. 市政技术, 2017, 35(2): 71.
- WEI Gang, WANG Xiao, ZHANG Xinhai. Study on zoning method of shield tunnel construction influence based on displacement criterion[J]. Journal of Municipal Technology, 2017, 35(2): 71.
- [9] GONG Q M, NIE X F, TIAN Z Y. Study on safety state of shield tunnel under rotation and shear dislocation deformation mode[C]//Chang'an University. 21st COTA (Chinese Overseas Transportation Association) International Conference of Transportation Professionals. Xi'an: Chang'an University, 2021: 743-753.

(收稿日期:2021-01-15)