

上下重叠隧道盾构法施工引起的地面沉降分析*

李振东^{1,2}

(1. 北京市轨道交通建设管理有限公司, 100068, 北京; 2. 城市轨道交通全自动运行系统与安全监控北京市重点实验室, 100068, 北京)

摘要 [目的]重叠隧道特殊的施工方式可能会导致地面沉降槽的形成及地层损失率的增加,对周边环境和建筑物造成影响。因此,有必要对重叠隧道施工中的地面沉降规律进行研究。[方法]以北京地铁昌平线清河小营桥站—学知园站区间的完全重叠段隧道为例,结合数值分析与现场监测数据,系统地研究了盾构重叠隧道施工过程中的地面沉降和地层损失情况,分析了上线隧道和下线隧道的施工顺序对地面沉降槽形态、最大沉降值及地层损失率的影响。[结果及结论]盾构重叠隧道施工中存在明显的叠加效应。上线隧道的施工会对地层造成一定的损失,并导致地面最大沉降值的增加。重叠施工情况下,上线隧道开挖造成的地层损失小于不涉及重叠施工情况下的上层隧道单独施工造成的地层损失。重叠隧道施工中的地层损失率不受隧道埋深变化的影响,且单线开挖与重叠开挖的地层损失率相差不大。在本工程类似地层中,地层损失率可大致按0.25%进行估算。

关键词 重叠隧道;盾构法施工;地面沉降

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.017

shield overlapping tunnel construction is conducted. The impact of the construction sequence of the upper and lower line tunnels on the morphology of land subsidence troughs, the maximum subsidence values, and stratum loss rates is analyzed. [Result & Conclusion] There is a significant superposition effect in shield overlapping tunnel construction. The construction of upper line tunnel causes some amount of stratum loss and leads to an increase in the maximum land subsidence value. Under overlapping construction conditions, the stratum loss caused by the excavation of upper line tunnel is less than that caused by the separate construction of upper line tunnel without involving the overlapping construction situation. The stratum loss rate during overlapping tunnel construction is not affected by changes in tunnel buried depth, and there is little difference in stratum loss rate between single-line excavation and overlapping excavation. In similar geological conditions to this engineering, the stratum loss rate can be roughly estimated at 0.25%.

Key words overlapping tunnel; shield construction; land subsidence

Analysis of Land Subsidence Induced by Vertical Overlapping Tunnel Shield Construction

LI Zhendong^{1,2}

(1. Beijing MTR Construction Administration Co., Ltd., 100068, Beijing, China; 2. Beijing Key Laboratory of Fully Automatic Operation and Safety Monitoring for Urban Rail Transit, 100068, Beijing, China)

Abstract [Objective] Due to the special construction method of overlapping tunnels, the formation of land subsidence troughs and the increase in stratum loss rate may affect the surrounding environment and buildings. Therefore, it is necessary to study the influence law of land subsidence in overlapping tunnel construction. [Method] Taking the completely overlapping tunnel section of Qinghe Xiaoyingqiao Sta. - Xuezhuyuan Sta. Interval on Beijing Subway Changping Line as example, combining numerical analysis and on-site monitoring data, a systematic study of land subsidence and stratum loss during

我国有着近年来世界上发展最快的地下轨道交通网络,各大型城市的地下空间开发规模不断扩大。地下空间开发项目中最主要的就是地铁线路的开发,因此地铁线路开挖过程对周边环境的地面扰动问题尤其需要关注^[1]。

我国的城市布局较为密集,城市中的主要道路宽度较大,地铁的规划应尽量与地面道路重合。随着地铁线路日益增多,适合修建地铁的地下空间已所剩无几,重叠隧道的规划应运而生。重叠隧道是指两条隧道在竖直方向上下重叠布置,与两条隧道在水平方向上布置相比,重叠隧道对周边建(构)筑物的影响范围更小,同时还能解决两条或多条地铁线路之间的同站换乘问题。

重叠隧道盾构施工的特点之一是对地面的影响区域高度重合,与双线并行隧道相比,形成的沉

*北京市轨道交通建设管理有限公司企业双创基金项目(SCJJ2024010)

降槽宽度更小、累计沉降量更大。研究盾构法重叠隧道的沉降变形规律,尤其是上、下线盾构施工引起地面沉降的叠加效应,对于预测和控制地面沉降、确保周边环境风险工程的安全是非常有必要的。

已有学者对盾构法重叠隧道施工进行研究。文献[2]以北京地铁6号线南锣鼓巷站—东四站的重叠隧道为例,对砂卵石地层盾构法重叠隧道地层变形规律进行了研究。文献[3]对软土地层重叠隧道盾构施工的影响及其沉降预测方法进行了研究。

但由于重叠隧道的案例较为少见,目前针对重叠隧道的研究大多集中在重叠隧道的结构受力及施工工艺方面^[4-5],对由重叠隧道施工引起的地面变形研究较少。本文以北京地铁昌平线南延段工程清河小营桥站—学知园站区间(以下简称“清学区间”)为例,利用FLAC 3D数值模拟软件研究完全重叠隧道施工对地面沉降影响的叠加效应,并通过4组地面实测数据进行验证。本文研究可为类似地层中完全重叠隧道施工的地面沉降预测提供理论依据,有助于指导实际工程中的施工设计和安全控制。

1 工程概况

清学区间采用盾构法施工,区间全长1 804.212 m,两台盾构机由学知园站始发,由南向北先后穿越学清路、北五环、清河、京藏高速西辅路、清河中学,最后到达清河小营桥站解体吊出。清学区间左、右线以上下重叠的形式(右线在上,左线在下)进入清河小营桥站,最小间距为2.85 m,重叠段长392 m。衬砌采用钢筋混凝土预制管片错缝拼装,管片外径为6 000 mm,内径为5 400 mm,厚度为300 mm,管片宽为1 200 mm。

重叠隧道段先施工下线隧道再施工上线隧道,隧道穿越地层主要为粉质黏土层,采用两台中交隧道开挖直径 $\phi 6\,290$ mm的主动铰接式土压平衡盾构机施工,刀盘开口率为66%,额定扭矩为5 765 kNm,脱困扭矩为6 918 kNm。

清学区间在里程K35+897.684—ZK36+57.000段进入完全重叠状态,选取下线第1434环(上线第1428环)断面,以及下线第1409环(上线第1403环)断面作为重点监测段,测点布置位置示意图如图1所示。每个监测断面布置9个测点,对称布置在隧道轴线两侧的地面处,分别距离隧道轴线中心0、3 m、6 m、11 m、17 m。

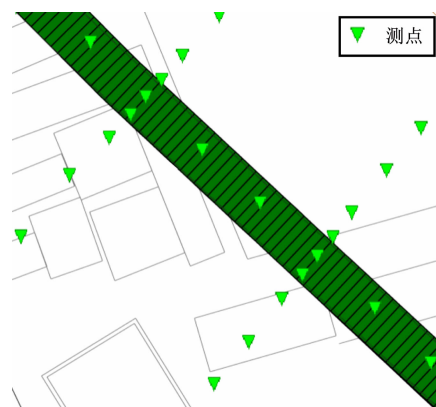


图1 测点布置位置示意图

Fig. 1 Diagram of measuring point layout position

2 数值分析

2.1 建立隧道模型

鉴于清学区间完全重叠段在第1380环—第1480环处的埋深比较稳定,地层分布均匀,选择第1380环—第1480环共120 m作为重叠隧道的数值计算对照段,以此进行地面沉降监测及分析。工程地质示意图如图2所示。上线隧道埋深为14.5 m,下线隧道埋深为27.8 m,上、下线隧道净距为3.4 m,主要穿越粉质黏土层。土层主要物理力学参数如表1所示。

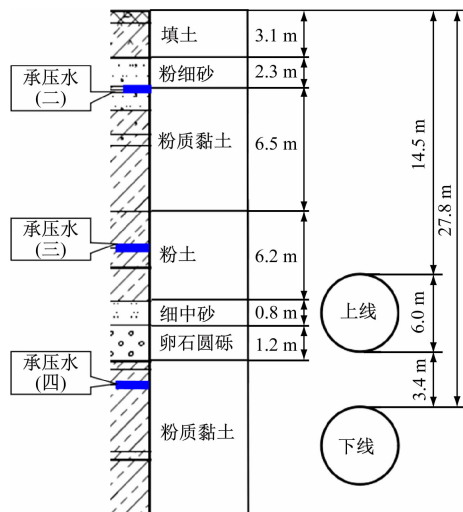


图2 工程地质示意图

Fig. 2 Diagram of engineering stratigraphy

利用FLAC 3D软件进行数值模拟,基于地层资料建立隧道模型。在本次模拟中,建模长度为隧道完全重叠段第1380环—第1480环,总长为120 m。隧道模型x方向取70 m,y方向取120 m,z方向取

表 1 土层主要物理力学参数

Tab. 1 Main physical and mechanical parameters of soil layer

地层	天然密度/(g/cm ³)	压缩模量/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	基本承载力/kPa
填土	1.60~1.70	—	8~12	8~10	—
粉质黏土	1.80~1.94	4~6	5~10	8~15	100~120
粉土	1.75~1.95	6~10	15~25	12~20	160~200
细中砂	2.02~2.05	35~45	30~40	0	260~300
卵石圆砾	2.10~2.20	80~130	40~45	0	400~600

50 m。上线隧道顶部埋深为 14.5 m,下线隧道顶部埋深为 27.8 m,下线隧道底部距离模型底部 16.2 m,隧道左、右边缘与模型两侧距离设置为 32 m,下线隧道顶部距上线隧道底部 3.4 m,双隧道轴线中心平行间距为 9.4 m。隧道模型示意图如图 3 所示。采用齐次边界条件,在模型 x 、 y 方向边界施加法向约束,在模型底部边界施加 x 、 y 、 z 三向位移约束;隧道模型 z 方向的顶部边界取为自由边界。

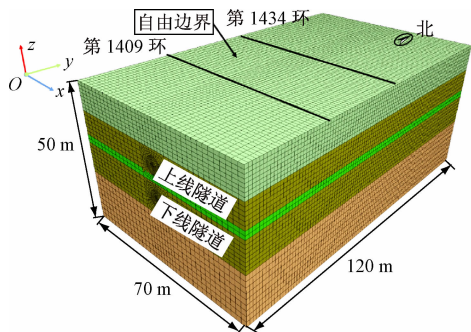


图 3 隧道模型示意图

Fig. 3 Diagram of tunnel model

2.2 选取模型参数

在对模型中的各土层赋予工程参数的过程中,原则上按照工程勘察报告进行选取,对土层较为复杂地段的参数使用加权平均算法进行合并简化,假定周围土壤的行为受基于 Mohr-Coulomb 准则的弹塑性本构关系的控制,且具有非关联流动规则^[6]。

模型中,隧道开挖直径为 6.29 m,与实际工程尺寸相同。管片外壁与开挖轮廓之间的空隙在实际工程中由同步注浆填充,浆液受注浆压力影响会渗入周边土体中与土层进行混合,在本次数值模拟中对这一部分采取等代层进行模拟,等代层厚度为 290 mm;管片与等代层均采用弹性模型模拟。数值模拟参数如表 2 所示。

2.3 模拟开挖过程

土压平衡盾构在进行开挖时最重要的因素为:
①土舱压力与开挖面水土压力的平衡;②管片外侧

表 2 数值模拟参数

Tab. 2 Numerical simulation parameters

项目	泊松比	体积模量/ MPa	剪切模量/ MPa	密度/ (kg/m ³)
管片	0.17	1.59×10^4	1.346×10^4	2 500
等代层	0.20	5.05×10^2	4.270×10^2	2 500

的同步注浆,用于填充管片与土壤之间的空隙,以减少地面沉降。

土压平衡盾构机使用刀盘进行开挖,管片在刀盘后方进行拼装,刀盘开挖直径必然大于管片拼装后的外径,因此在管片与土体之间便出现了一定的空隙,盾构施工中为了填补这一部分空隙,使用同步注浆技术,在管片拼装成型后向管片外侧注入浆液。目前,注浆材料一般采用水泥砂浆,由于浆液凝固需要一定时间,其初期强度较低。在浆液注入管片与土壤间隙的初期会受压产生变形,导致隧道体积减小,这被认为是盾构施工中地层损失的最主要原因。

将盾构开挖隧道过程进行简化后,本文数值模拟过程可分为 4 个阶段,即原状土样阶段、土体开挖阶段、管片支护阶段、注浆凝固阶段。具体数值模拟步骤为:

步骤 1 初始化地应力;

步骤 2 将直径为 6.2 m、长为 1.2 m 的圆柱形体设置为空单元,并向管片单元赋值(赋值参数见表 2);

步骤 3 通过对开挖面设置一个均布推力,以模拟土舱压力对开挖面的支撑作用,土舱压力一般通过静止土压力理论计算获得;

步骤 4 为模拟盾构施工中的浆液凝固过程,当开挖第 1 环时,对第 1 环管片外部 230 mm 厚的等代层布置径向压力来模拟注浆压力,单元强度(体积模量和剪切模量)设置为表 2 中最终值的 1/3,每向前开挖 2 环注浆压力减少 1/3、等代层强

度增加 1/3,开挖 4 环后达到最终强度,注浆压力归零。

盾构施工压力模拟示意图如图 4 所示。注浆压力可根据土舱压力计算获得。若同步注浆压力过高,浆液会流入土舱;若同步注浆压力过低,则无法平衡管片上方的水土压力,导致地面沉降值超标。本次模拟中的注浆压力取值与现场统计值相同,土舱压力及注浆压力计算结果如表 3 所示。

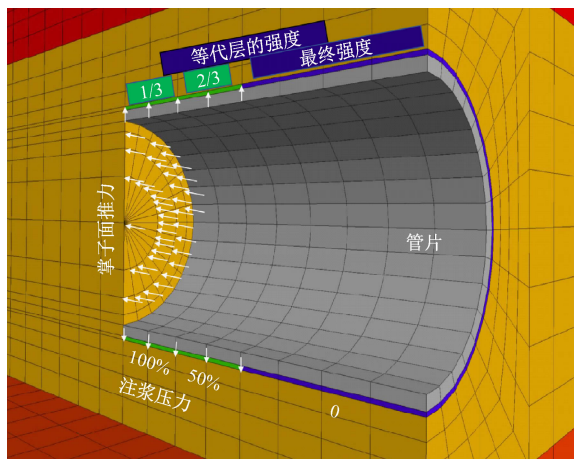


图 4 盾构施工压力模拟示意图

Fig. 4 Diagram of shield construction pressure simulation

表 3 土舱压力及注浆压力计算结果

Tab. 3 Calculation results of soil chamber pressure and grouting pressure

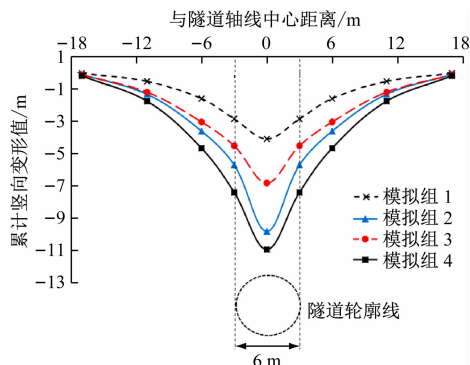
线路	埋深/m	土舱压力/MPa	注浆压力/MPa
下线	27.8	0.25	0.28
上线	14.5	0.20	0.22

3 数值计算结果分析

由于盾构的上跨施工相对于下穿施工更为安全可控,在实际重叠隧道工程施工时,一般采用先施工下线后施工上线的顺序。在施工上线隧道时,地面就已经受到下线盾构施工影响而产生了沉降。为研究重叠隧道施工地面沉降与普通隧道之间地层损失的区别,设置开挖对照组进行数值模拟对比分析。

提取第 1409 环与第 1434 环的数值模拟数据,盾构开挖后,不同模拟组的累计竖向变形曲线如图 5 所示。其中:模拟组 1——按照原始工况,先施工下线完成后形成的地面沉降数据;模拟组 2——先下线后上线施工完成后的地面沉降数据;模拟组 3 和模拟组 4 为 2 组对照组,模拟组 3 为不开挖下线

直接开挖上线的地面沉降数据,模拟组 4 为模拟组 3 与模拟组 1 的数值之和,用以体现无叠加效应时的地面沉降情况。由图 5 可知:数值模型曲线具有均一性,两个断面的模拟结果基本一致。



注:与隧道轴线中心距离以向东为正,以向西为负;余类同。

图 5 不同模拟组的累计竖向变形曲线

Fig. 5 Cumulative vertical deformation curves of different simulation groups

3.1 模拟结果分析

对数值模拟结果的沉降槽进行横向和纵向对比分析可知:①地面横向沉降槽的宽度只与下线隧道的施工相关,上线隧道施工不会使沉降槽进一步变宽。②最大沉降值位于隧道轴线处,上线隧道施工会对最大沉降值产生较大的影响。与下线施工完成后的沉降值相比,上线施工使得地面最大沉降值增加了 5.74 mm,约占总沉降值的 58.16%。上线隧道施工对最大沉降值的影响比下线隧道施工更大。③对比模拟组 2 与模拟组 4 的沉降曲线可知,在存在叠加效应的情况下(先开挖下线后开挖上线),模拟组 2 的地面最大沉降值相比于模拟组 4 降低了 11.45%,但沉降槽宽度并没有明显的变化。

3.2 地层损失对比

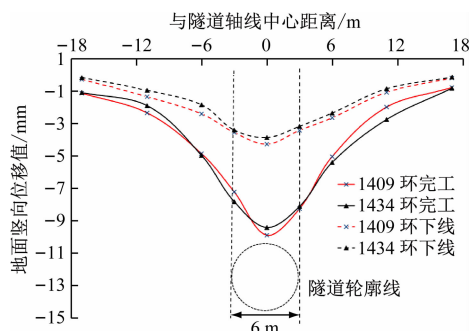
在盾构施工过程中,地层损失是指实际开挖土体体积与竣工隧道体积之差,由于真实的开挖土体体积受注浆等因素影响难以直接观测,一般认为地面沉降槽的总体积等于隧道开挖引起的地层损失。

使用 MATLAB 软件中的 trapz 命令进行曲线积分计算后可知:原始工况中,上线开挖造成的地层损失约为下线开挖造成地层损失的 1.21 倍,占双线施工完毕后总损失的 54.81%;在不开挖下线的情况下,直接进行上线开挖所造成的地层损失约为下线开挖的 1.76 倍;重叠隧道上、下线之间的叠加效应使上线隧道开挖造成的地层损失减小了约 45.16%。

对比模拟组4和模拟组2的数值计算结果,模拟组4计算所得的地层损失与模拟组2相比增加了24.75%。

4 实测数据验证

清学区间下线隧道的盾构机实际通过第1409环及第1434环监测断面的时间为2021年4月21日—4月26日;清学区间上线隧道的盾构机实际通过第1409环及第1434环监测断面的时间为2021年7月20日—7月26日。监测段的施工严格按照预设方案进行,调取现场监测数据绘制沉降槽曲线。不同施工顺序下的实测地面竖向位移曲线如图6所示。



注:1409环下线、1434环下线指盾构施工完下线隧道后,两个监测断面的地面沉降数据;1409环完工和1434环完工指施工完上线隧道后,两个监测断面的地面沉降数据。

图6 不同施工顺序下的实测地面竖向位移曲线

Fig. 6 Field-measured ground vertical displacement curves under different construction sequences

4.1 沉降规律分析

本工程在进行下线隧道盾构施工后,地面测点发生的变形都是沉降变形,累计沉降值最大点位于隧道中心上方处。当上线盾构隧道完成开挖后,地面测点在下线隧道开挖沉降的基础上再次产生沉降。下线隧道施工对最终的最大沉降值影响约为42%,上线隧道施工对最终的最大沉降值影响约为58%。上线隧道施工不会使沉降槽进一步变宽,仅在下线隧道引起沉降的基础上使隧道中心附近测点进一步发生沉降。

综上所述,通过数值模拟进行预分析提取的沉降曲线,基本符合监测段施工后的现场情况,因此本文所提计算方法能够对地面最大沉降位置及基本沉降特性进行预测。

4.2 地层损失率分析

为进一步研究重叠隧道沉降槽规律及其叠加

效应,采用MATLAB软件分别对第1409环及第1434环监测断面的沉降槽曲线进行高斯拟合,拟合表达式采用Peck公式,可以表示为:

$$S = S_{\max} \exp(-x^2/2i^2) \quad (1)$$

式中:

S ——地面任一点的沉降值;

S_{\max} ——地面沉降最大值;

x ——任一点与隧道轴线的水平距离;

i ——沉降槽宽度系数,为隧道轴线与沉降槽拐点的距离。

地层损失率是指每米隧道开挖地层的沉降槽总体积与隧道开挖体积之比。以最终沉降值减去由下线隧道施工造成的沉降值所得的数据,作为上线隧道施工的沉降数据,将实测数据分为6个工况进行分析:工况1——第1409环下线施工;工况2——第1434环下线施工;工况3——第1409环双线完工;工况4——第1434环双线完工;工况5——第1409环上线施工;工况6——第1434环上线施工。实测数据沉降参数计算结果如表4所示。

表4 实测数据沉降参数计算结果

Tab. 4 Calculation results of field-measured data subsidence parameters

工况编号	S_{\max}/mm	i/m	每米地层损失/(m^3/m)	地层损失率/%	拟合优度
1	4.28	6.41	0.069	0.24	0.98
2	3.87	6.14	0.059	0.21	0.98
3	9.91	6.05	0.146	0.26	0.96
4	9.43	6.46	0.149	0.26	0.97
5	5.63	5.15	0.077	0.27	0.92
6	5.56	6.76	0.090	0.32	0.94

下线隧道施工时,地层损失率为0.21%~0.24%;上线隧道施工时,地层损失率为0.27%~0.32%。双线隧道叠加后的地层损失率约为0.27%,上、下线不同深度隧道之间的地层损失率差别不大,均约为0.25%。

5 结语

本文对盾构法重叠隧道施工引起的地面沉降规律及上下线隧道的叠加效应进行了分析,重点研究了完全重叠隧道施工时,双线隧道对地面沉降槽的影响,以及不同施工顺序对地层损失和地层损失率的影响,主要获得以下结论:

1) 盾构重叠隧道施工中, 上线隧道施工对最终沉降槽的最大沉降值影响更大。实测数据表明, 下线隧道施工影响约为 42%, 上线隧道施工影响约为 58%。模拟结果表明, 下线隧道施工影响约为 41.84%, 上线隧道施工影响约为 58.16%。两者获得的沉降影响规律较为一致。

2) 完全重叠隧道施工的地面沉降槽宽度仅受下线隧道影响, 但最终的沉降槽并非双线隧道单独影响的简单相加, 而是存在叠加效应。通过数值模拟计算可知, 上、下线之间的叠加效应使上线隧道开挖造成的地层损失相比直接开挖减小了约 45.16%, 最终沉降槽的最大沉降值减小了 11.45%。

3) 隧道开挖造成的地层损失率并不受隧道埋深变化影响, 重叠隧道开挖过程中, 上、下线隧道及两者叠加造成的最终地层损失率相差不大, 在本工程类似的砂卵石地层中可以按照 0.25% 左右考虑。

参考文献

- [1] YIN M, JIANG H, JIANG Y, 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.
- [2] 宋浩然, 张顶立. 叠落盾构隧道施工影响下地层变形及结构受力分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊1): 279.
SONG Haoran, ZHANG Dingli. Analysis of ground deformation and structural stress under the influence of overlapping shield tunnel construction[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 279.
- [3] 谢雄耀, 牛俊涛, 杨国伟, 等. 重叠隧道盾构施工对新建隧道影响模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 2061.
XIE Xiongyao, NIU Juntao, YANG Guowei, et al. Model test for effects of construction of shield tunnelling in overlapping tunnels on existing tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 2061.
- [4] 卢岱岳, 王士民, 何川, 等. 新建盾构隧道近接施工对既有隧道纵向变形影响研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(10): 108.
LU Daiyue, WANG Shimin, HE Chuan, et al. Research on effects of adjacent construction of new shield tunnel on longitudinal deformation of existent tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(10): 108.
- [5] 李磊, 张孟喜, 吴惠明, 等. 近距离多线叠交盾构施工对既有隧道变形的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1036.
LI Lei, ZHANG Mengxi, WU Huiming, et al. Influence of short-distance multi-line overlapped shield tunnelling on deformation of existing tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6): 1036.
- [6] LIU H Y, SMALL J C, CARTER J P. Full 3D modelling for effects of tunnelling on existing support systems in the Sydney region[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(4): 399.

· 收稿日期:2023-05-12 修回日期:2023-06-16 出版日期:2024-07-10
Received:2023-05-12 Revised:2023-06-16 Published:2024-07-10
· 通信作者:李振东, 高级工程师, 124971952@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 96 页)

- GUO Jian. Efficiency of grouting segment uplifting in shield tunnel [J]. Railway Construction Technology, 2016, (9): 18.
- [3] 白如冰, 郑刚, 刁钰, 等. 补偿注浆对隧道变形控制试验研究与数值分析[J]. 中国港湾建设, 2018, 38(3): 24.
BAI Rubing, ZHENG Gang, DIAO Yu, et al. Experimental study and numerical analysis of tunnel deformation control by compensation grouting[J]. China Harbour Engineering, 2018, 38(3): 24.
- [4] LIU J, HAMZA O, SIAN D V, et al. Repairing a shield tunnel damaged by secondary grouting[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 80: 313.
- [5] GAN X, YU J, GONG X, et al. Response of operating metro tun-

nels to compensation grouting of an underlying large-diameter shield tunnel: a case study in Hangzhou[J]. Underground Space, 2022, 7(2): 219.

· 收稿日期:2023-04-12 修回日期:2023-07-20 出版日期:2024-07-10
Received:2023-04-12 Revised:2023-07-20 Published:2024-07-10
· 第一作者:万勇, 高级工程师, wanyong@wuhant.com
通信作者:张雨蒙, 博士后, zhangym@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

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: tougao. umt1998. com