

文章编号:1674-599X(2022)03-0064-08

# 红层盾构隧道交叠下穿运营地铁隧道影响分析

蒋超,曹前,蔡光伟,徐光阳

(长沙市轨道交通集团有限公司,湖南 长沙 410019)

**摘要:**针对红层新建地铁盾构隧道与既有隧道长距离交叉下穿时,既有隧道的变形问题,以长沙市轨道交通3号线下穿长沙地铁1号线工程为背景,采用FLAC<sup>3D</sup>有限元差分软件进行数值模拟,结合实测数据,研究施工参数对地层变形和既有隧道变形的影响。研究表明:土仓压力增大,有助于减小不均匀沉降,沉降差值比随着土仓压力的增大逐渐趋于平稳。土仓压力在0.24 MPa附近变动时,既有隧道的轨向不均匀沉降模式发生较明显的改变。随着同步注浆压力的增大,交叉点处拱底竖向位移值逐渐减小,且轨向不均匀沉降差值比与同步注浆压力成正比。分析土仓压力和注浆压力对既有隧道轨向不均匀沉降的影响规律,建议土仓压力值范围为0.08~0.13 MPa,注浆压力值范围为0.2~0.5 MPa。通过实测数据分析表明:土仓压力和注浆压力取建议值时,各监测断面盾构掘进过程中,管片和轨道板的不均匀沉降均在控制范围内,该结果可为类似工程施工提供参考。

**关键词:**盾构隧道;长距离交叉下穿;施工参数;数值模拟;信息化监测

中图分类号:U452

文献标志码:A

## Analysis on the influence of shield tunnels in red stratum overlapping and underneath passing existing subway tunnels

JIANG Chao, CAO Qian, CAI Guangwei, XU Guangyang

(Changsha Metro Group Co., Ltd., Changsha 410019, China)

**Abstract:** In order to control the deformation of existing metro tunnel induced by the long distance overlapping and underneath passing new metro shield tunnel in red stratum, based on the project of the line 3 underpass the line 1 of the rail transit in Changsha, the FLAC<sup>3D</sup> finite difference software was used for numerical simulation, combining with monitoring data, the influence of construction parameter on the deformation of stratum and existing tunnel. The results show that, with the increase of the chamber earth pressure, the uneven settlement can be reduced, and the settlement difference ratio gradually tends to be stable. The uneven settlement of the existing tunnel in the rail direction changes significantly, when the soil bunker pressure fluctuates around 0.24 MPa. With the increase of synchronous grouting pressure, the vertical displacement of arch bottom at intersection point decreases gradually, and the difference ratio of uneven settlement in rail direction is proportional to the synchronous grouting pressure. The recommended value of the chamber earth pressure is 0.08 ~ 0.13 MPa, and the value of synchronous grouting pressure is 0.2 ~ 0.5 MPa, resulted from the analysis of the influence of chamber earth pressure and grouting pressure on uneven settlement of existing tunnel rail. The uneven settlement of segment and track slab at monitoring section is within the control range during shield tunneling, when the chamber earth pressure and grouting pressure are calculated according to the recommended value that is got from the monitoring data analysis. The results can provide reference for similar project.

**Key words:** shield tunnel; undercrossing at long distance; construction parameters; numerical simulation; informative monitoring

收稿日期:2021-03-11

基金项目:2021年长沙市住房和城乡建设局项目“盾构隧道长距离交叠、并行接近下穿运营地铁隧道施工安全控制技术研究”

作者简介:蒋超(1982—),女,长沙市轨道交通集团有限公司高级工程师。

城市地下空间开发进入快速发展阶段,地铁隧道的建设规模不断扩大,地下空间被不断压缩。在修建地铁的过程中,出现了形式各异、繁杂不一的交叉近接施工,给地铁隧道建设带来了新的技术难题,成为许多学者研究的重点课题。本研究依托长沙地铁3号线一期工程,该工程所处地层是典型的红层。从已有的工程实例可以看出,红层软岩有独特的地质特性,其孔隙比大,黏结力差,特别是在扰动后,围岩强度会因应力调整而降低,导致围岩的自稳能力减弱,变形增大。因此,在红层中修建隧道,容易出现围岩变形、坍塌等灾害<sup>[1-4]</sup>。为保证既有地铁隧道的安全和稳定,在盾构隧道进入交叉段前,研究施工参数对既有隧道变形的影响显得尤为重要。

目前,中国学者已做了许多相关研究。崔玉龙<sup>[5]</sup>对西安地铁盾构区间隧道下穿地铁1号线出入段采用数值模拟和掘进试验,确定了合理的盾构掘进参数,确保了地铁的安全运营。祝思然等人<sup>[6]</sup>利用数值模拟,结合现场监测方法,拟定了一系列施工方法,控制了既有隧道的沉降,保证了其稳定性。张健等人<sup>[7]</sup>依托长沙地铁4号线盾构隧道工程,对盾构近接施工引起的地层变形规律进行了分析,研究表明:在盾构隧道施工中,从地表到地层区间,土体竖向变形呈沉降槽状。康佐等人<sup>[8]</sup>以西安地铁盾构隧道为工程背景,利用数值模拟研究了既有隧道沉降、内力和地层位移的变化规律。张琼方等人<sup>[9]</sup>以盾构近距离、小角度下穿杭州地铁1号线为例,通过监测手段,分析了相关施工参数对既有隧道变形的影响规律。王立新等人<sup>[10]</sup>采用数值模拟手段,分析了不同净距状态下新建基坑开挖引起的地表位移、新建基坑结构位移及既有结构位移,研究了新建基坑开挖对既有车站和既有隧道的影响。杨志勇等人<sup>[11]</sup>依托北京地铁14号线两次下穿既有地铁15号线工程,采用现场测试及实地调研方法,研究得到了既有隧道的变形规律。房明等人<sup>[12-13]</sup>通过数值模拟盾构下穿施工过程,分析了隧道覆土厚度、隧道间净距及土层性质对既有隧道位移沉降的影响规律。姜克寒等人<sup>[14]</sup>依托长沙地

铁6号线盾构隧道工程进行数值模拟,分析了不同隧道掘进施工参数对地表竖向沉降变形的影响,得到地表竖向变形图及沉降槽分布规律。

目前,在盾构下穿工程中,很多学者已做了许多关于盾构施工对地层变形和既有隧道变形的影响规律的研究。但关于施工参数对既有隧道管片轨向不均匀沉降影响的分析,尤其是从红层的隧道变形规律中得到施工参数的相对安全范围,以及通过监测手段进行验证的研究还相对较少。本研究以长沙地铁3号线一期工程土建施工项目SG-6标段中CK17+650~CK17+730区间段为工程背景,采用有限元数值模拟和现场监测相结合的方法,开展红层地层盾构隧道长距离交叉近接运营地铁隧道的轨向沉降控制技术研究。该研究对保证盾构隧道顺利施工和维持既有隧道的安全运营具有重要意义,以期为类似工程施工提供参考。

## 1 工程概况

本研究以长沙地铁3号线CK17+650~CK17+730区间段下穿长沙地铁1号线工程为例。其中,既有运营地铁1号线区间隧道为两条平行的单线隧道,新建的长沙市轨道交通3号线为单线平行的盾构隧道,两个隧道中轴线相距13.00 m,平面夹角 $25^\circ$ ,既有隧道底板距离新建隧道顶板最小净距5.50 m,交叉短纵断面如图1所示,交叉段平面如图2所示。

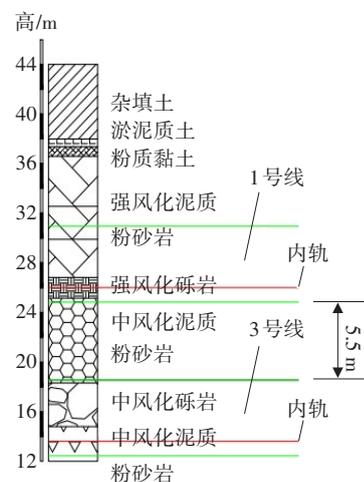


图1 交叉段纵断面

Fig. 1 Longitudinal section of cross section

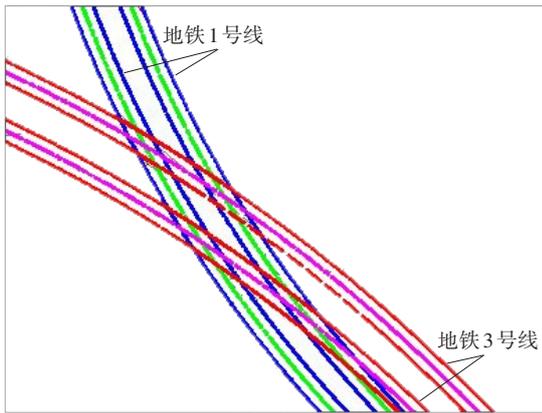


图2 交叉段平面示意

Fig. 2 Plan of cross section

地铁3号线在CK17+650~CK17+730区间段,隧道穿越的地层大部分为弱风化泥质粉砂岩、弱风化砾岩,仅局部有小范围的中风化岩层。其中,中风化岩层岩面起伏大,厚度不一,力学强度较高,承载力较大。弱风化岩层岩质较软,节理裂隙较发育,岩芯完整,呈长柱状,仅局部地段有揭露,其力学强度高,承载力大。场地土层主要有杂填土、淤泥质土、粉质黏土、中风化泥质粉砂岩、中风化砾岩、弱风化泥质粉砂岩和弱风化砾岩等,土体种类多,空间分布变化较大。

## 2 数值模型计算模型

### 2.1 数值模拟方案设计

由于隧道开挖的地层还处于基岩中,施工未对地层进行加固处理,但鉴于既有隧道与新建隧道的位置关系,对盾构掘进参数控制的要求高。土压平衡盾构机的掘进工作与土仓压力、掘进推力、千斤顶推进速度、刀盘转速、刀盘扭矩及盾尾注浆压力等参数有关。其中,既有隧道变形的影响因素主要有:以土仓压力为主的正面影响;盾构机推进过程中机壳与周围土体的摩擦力和由于纠偏、蛇形、曲线推进引起的地层损失为主的侧壁影响;盾尾脱空以及注浆参数引起的盾尾影响。因此,取用土仓压力及盾尾注浆参数作为影响地层位移的参数。本研究采用FLAC<sup>3D</sup>有限差分软件进行数值模拟,其工况对比见表1。

### 2.2 模型建立

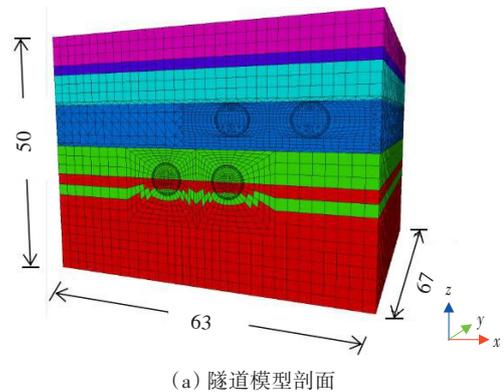
建立模型时,需考虑边界效应的影响,为减少计算量,在隧道左、右两侧分别取4倍洞径,拱底以下取3倍洞径,埋深26.0 m,隧道内、外径分别为5.4 m和6.0 m,管片衬砌厚为0.3 m,衬砌环宽1.5 m,新建长沙地铁3号线左、右线隧道净距为7.0 m,模型尺寸为67.0 m(宽)×50.0 m(高)×63.0 m(长)。计算时边界条件为:左右两面约束X方向位移,前后两面约束方Y方向的位移,底面约束Z方向位移,顶面为自由方向。模型共计118 810个节点,155 304个单元,三维数值计算模型如图3所示。

围岩服从Mohr-Coulomb屈服准则,该段围岩的物理力学参数见表2。

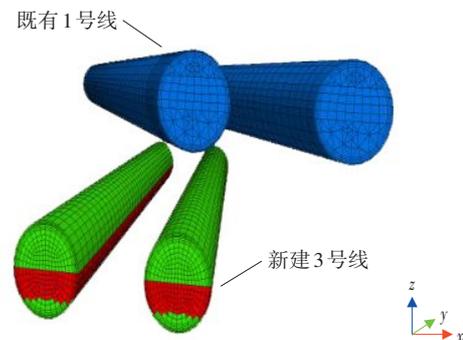
表1 数值模拟工况

Table 1 Working condition of umerical simulation

近接形式	工况	土仓压力/MPa	注浆压力/MPa
交叉近接	顶推力对比	0.08	0.2
		0.12	0.2
		0.24	0.2
		0.36	0.2
		0.48	0.2
		0.12	0.2
交叉近接	注浆压力对比	0.12	0.3
		0.12	0.4
		0.12	0.5



(a) 隧道模型剖面



(b) 隧道相对位置关系

图3 模型示意(单位:m)

Fig. 3 Model schematic(unit:m)

表2 地层物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of strata

名称	层厚/m	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	变形模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
杂填土	5	19.0	1.7	0.30	8.0	10.0
淤泥质土	1	17.0	0.8	0.42	6.0	4.3
粉质黏土	2	19.5	30.0	0.30	28.4	18.0
强风化砂岩	7	22.9	130.0	0.26	50.0	28.0
强风化砾岩	8	23.7	180.0	0.26	55.0	35.0
中风化砂岩	6	24.3	700.0	0.25	280.0	38.0
中风化砾岩	2	25.3	1 900.0	0.25	320.0	40.0
中风化砂岩	2	24.3	700.0	0.25	280.0	38.0
中风化砾岩	1	25.3	1 900.0	0.25	320.0	40.0

数值模拟将等代层、盾壳视为各向同性弹性体,利用刚度及厚度均大于盾壳的对应参数值的实体单元来模拟盾壳的受力和变形。隧道掘进后,等代层主要模拟盾尾注浆层。由于盾构通过的是下伏基岩,围岩强度较高。因此,等代层的厚度近似取为盾构机壳外径与管片外径的差值,同时考虑施工的影响,将盾尾注浆层的厚度取为15 cm。

根据文献[15],盾构管片的刚度折减通常取0.6~0.8,本研究取0.7。管片采用C50钢筋混凝土,弹性模量为35.50 GPa,折减之后的弹性模量为24.15 GPa,材料的主要物理力学参数见表3。

表3 模拟材料的物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameter of simulated material

材料	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比	厚度/mm
盾壳	78.0	212 000	0.25	150
注浆层	24.3	700	0.25	150

FLAC<sup>3D</sup>软件进行数值模拟时,认为盾构掘进以跳跃式方式前进,并设定每次跳跃步长为管片宽度,数值为1.5 m。通过改变预设单元的材料属性,利用刚度迁移法模拟盾构掘进过程。对于每个隧道掘进采用四步进行模拟:①在掌子面上施加支护力;②开挖隧道;③添加管片衬砌单元,盾尾注浆;④在最前端的管片上施加顶推力。

### 3 计算结果和分析

#### 3.1 土仓压力对比分析

为准确表征不同盾构掘进参数下不均匀沉降的增长趋势,定义沉降差值比,其表达式为:

$$\text{沉降差值比} = \frac{\text{不均匀沉降差值增长量}}{\text{基准位移}} \quad (1)$$

其中,不均匀沉降差值增长量表示土仓压力为0.08 MPa(同步注浆压力为0.20 MPa)时,轨向不均匀沉降最大值是相对于各土仓压力作用下的增量;基准位移表示土仓压力为0.08 MPa(同步注浆压力为0.20 MPa)时,轨向不均匀沉降的最大值。

新建隧道左线开挖完成后,对既有隧道左、右线均有影响,但由于两隧道的对称性,仅分析既有隧道左线轨向的不均匀沉降。新建隧道左线开挖完成后,既有隧道左线管片拱底竖向位移和既有隧道拱底距交叉点位置的关系如图4所示。既有隧道左线交叉点处管片拱底位移随掌子面距离交叉点距离的关系规律如图5所示。随着土仓压力的增大,不均匀沉降差值的变化规律如图6所示。

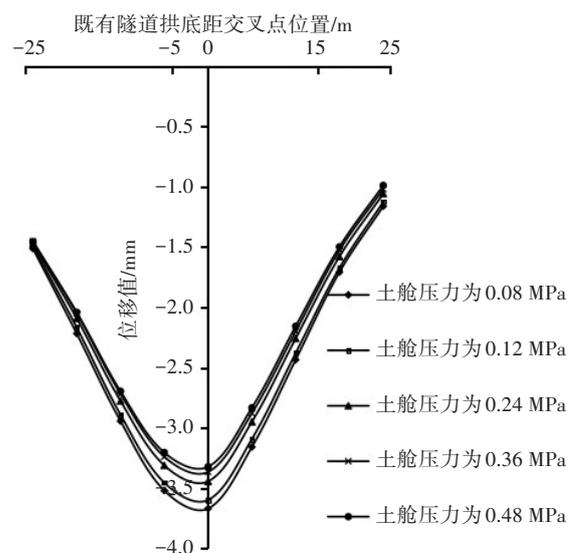


图4 不同土仓-压力下既有隧道左管片拱底竖向位移曲线  
Fig. 4 Axial vertical displacement curve of segment of left existing tunnel at position of arch bottom under different pressure of soil bunker

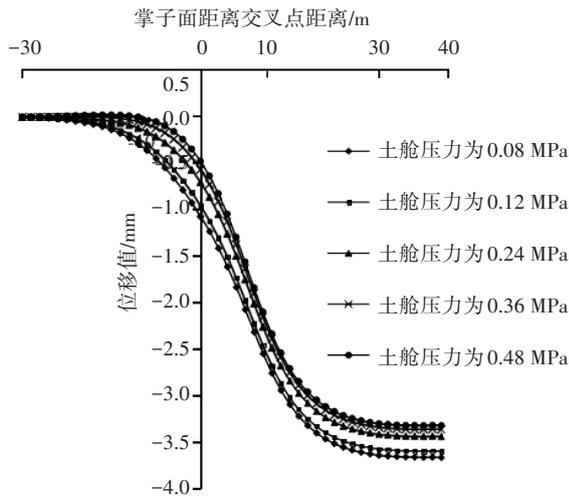


图5 不同土仓压力下既有隧道交叉点拱底竖向位移曲线  
Fig. 5 Vertical displacement curve of existing tunnel at arch bottom of crossing point under different pressure of soil bunker

从图4可以看出,既有隧道管片拱底竖向位移最大值出现在交叉点位置处,交叉点在断面前、后4倍洞径范围内出现了不均匀沉降。从数值上看,不均匀沉降的极差相差了2.5 mm左右。从相对值上看,其不均匀沉降差值占了沉降最大值的68%左右。

从图4~5可以看出,随着同步注浆压力的增大,交叉点处拱底竖向位移值逐渐减小,且拱底沉降的极差逐渐缩小。因此,同步注浆压力增大,有助于减小不均匀沉降。

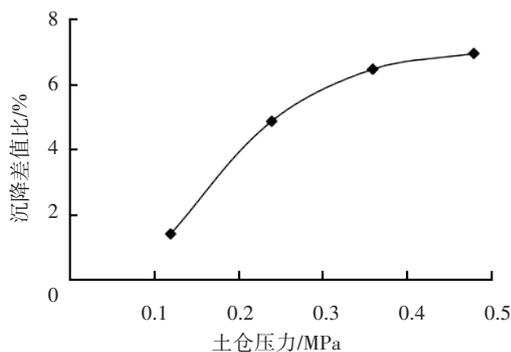


图6 沉降差值比与土仓压力关系  
Fig. 6 Relationship between settlement difference ratio and chamber earth pressure

从图6可以看出,土仓压力在0.12~0.24 MPa时,沉降差值比随着土仓压力增大呈线性增长;土仓压力在0.24~0.48 MPa时,该曲线斜率逐渐减小。其中,图6的斜率值表示土仓压力的增长对减小不均匀沉降作用的效果。结果表明:土仓压力在0.12~0.24 MPa时的增长对减小不均匀沉降作用相对于在0.24~0.48 MPa时的更为明显。

### 3.2 注浆压力对比分析

不同注浆压力下,既有隧道左线管片拱底竖向位移和既有隧道拱底与交叉点距离的关系如图7所示。既有隧道左线交叉点处管片拱底位移随掌子面距离交叉点的距离的关系如图8所示。

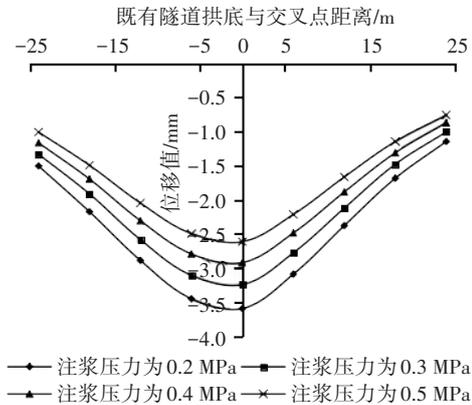


图7 不同注浆压力下既有隧道左管片拱底竖向位移曲线  
Fig. 7 Axial vertical displacement curve of segment of left existing tunnel at position of arch bottom under different grouting pressure

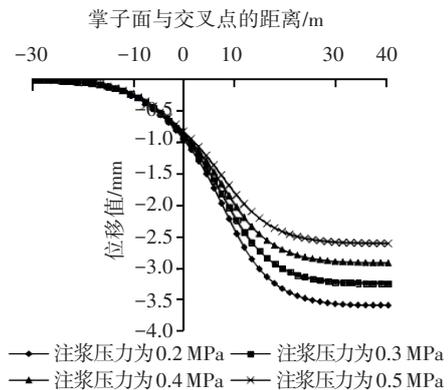


图8 不同注浆压力下既有隧道交叉点拱底竖向位移曲线  
Fig. 8 Vertical displacement curve of existing tunnel at arch bottom of crossing point under different grouting pressure

从图7可以看出,不同注浆压力下的拱底沉降与不同土仓压力作用下的一致,既有隧道管片拱底竖向位移最大值也出现在交叉点位置处,既有隧道在交叉点断面的前、后4倍洞径范围内出现了不均匀沉降。从数值上,不均匀沉降的极差相差了1.5~2.5 mm;从相对值上,不均匀沉降差值占了沉降最大值的68%~72%。

从图7~8可以看出,随着同步注浆压力的增大,交叉点处拱底竖向位移值逐渐减小,但拱底沉降的极差变化不大,可见同步注浆压力增大有助于减小不均匀沉降。

沉降差值比与注浆压力的关系如图9所示。从图9可以看出,沉降差值比与同步注浆压力成正比。这表明:注浆压力在0.3~0.5 MPa时,注浆压力的增大对减小不均匀沉降的作用效果保持不变。因此,确定土仓压力建议值为0.08~0.13 MPa,注浆压力建议值为0.2~0.5 MPa。

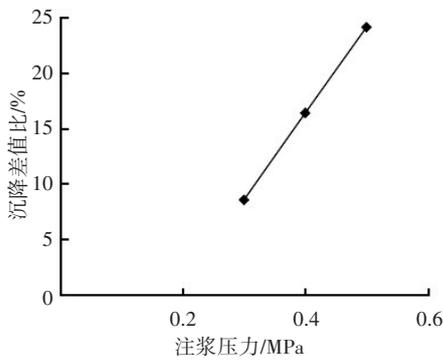


图9 沉降差值比与注浆压力关系

Fig. 9 Relationship between settlement difference ratio and grouting pressure

## 4 现场监测及分析

### 4.1 施工参数统计

统计分析新建的长沙地铁3号线下穿长沙地铁1号线交叉段前、后5倍洞径范围内的盾构掘进参数,以环为单位,对280环至335环的注浆压力和土仓压力分别进行统计,结果如图10~11所示。

从图10~11中可以看出,盾构掘进过程中同步注浆压力和土仓压力的变化值相对稳定,同步注浆压力为0.30~0.36 MPa,变化幅度仅为0.06 MPa;土仓压力为0.10~0.13 MPa,变化幅度仅为0.03 MPa。

### 4.2 现场监测测点布置

根据长沙城市轨道交通3号线与1号线的平面关系,在既有城市轨道交通1号线的左、右线各布置5个断面,断面间距为10 m,总计10个监测断面,其测点布置如图12所示。

本研究主要对轨道板横向沉降差和既有隧道管片收敛位移进行分析,在轨道左、右侧边墙各布置一个测点,在轨道板的左、右侧各布置一个测点,共计4个测点,测点布置如图13所示。

### 4.3 历时监测结果分析

各监测断面的既有隧道管片位移和既有隧道轨道板横向沉降差值如图14~15所示。

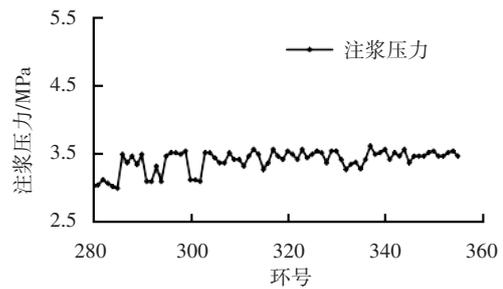


图10 注浆压力统计

Fig. 10 Grouting pressure chart

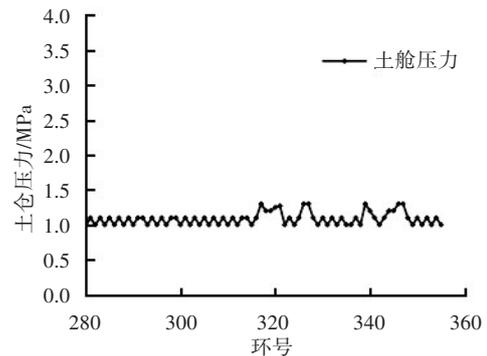


图11 土仓压力统计

Fig. 11 Chamber earth pressure chart

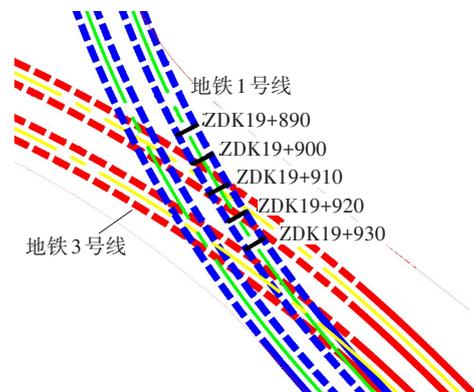


图12 监测点平面布置示意

Fig. 12 Plane layout of the monitoring point

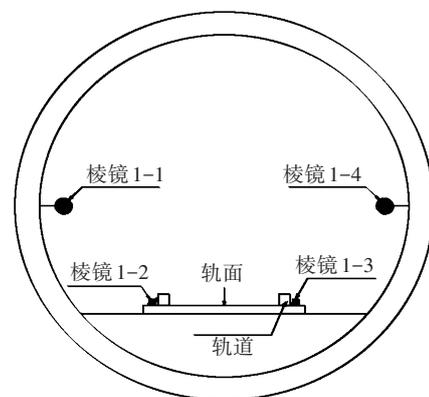


图13 测点布置断面

Fig. 13 Section layout of measuring point

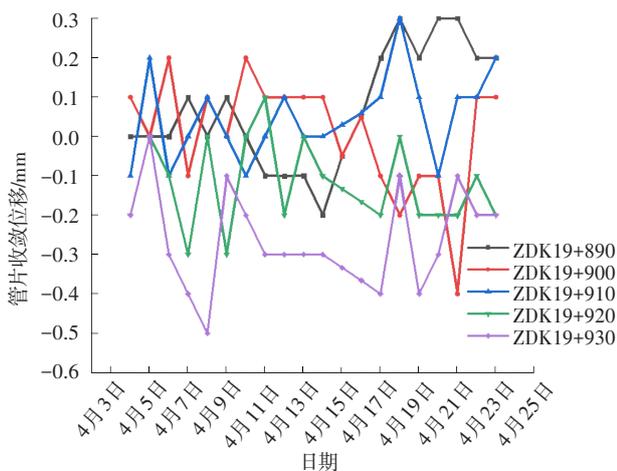


图14 既有隧道管片收敛位移

Fig. 14 Convergent displacement of existing tunnel segment

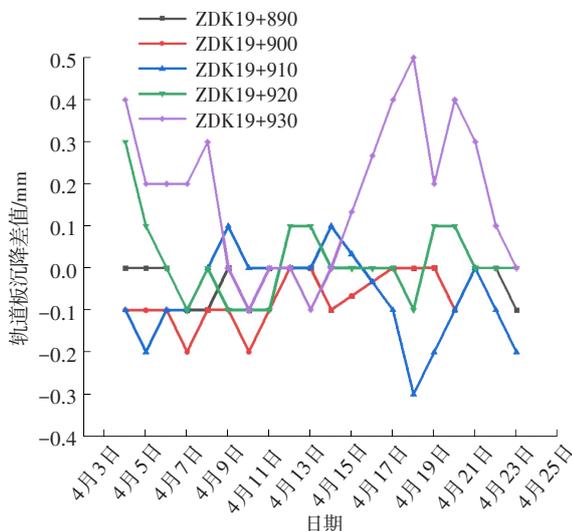


图15 既有隧道轨道板沉降差

Fig. 15 Settlement difference of existing tunnel track plate

从图14~15可以看出,断面ZDK19+890的轨道板沉降浮动较大,应加强监测,其余断面轨道沉降幅值较小,其中,断面ZDK19+910最具代表性。经过监测,所有断面的轨道不均匀沉降均在0.5 mm以内。根据《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(CJJ/T 202—2013)<sup>[16]</sup>的要求,在现有的盾构掘进参数下,新建隧道的施工对既有隧道结构的影响较小,均在可控范围之内。

## 5 结论

通过数值模拟,研究了盾构掘进参数对既有隧道结构的影响,探究了红层盾构掘进施工控制技术,得出结论为:

1) 通过对比不同土仓压力和不同注浆压力下

既有隧道管片轨向不均匀沉降的变化规律,发现土仓压力和同步注浆压力增大有助于减小不均匀沉降。当土仓压力为0.12~0.24 MPa时,对减小既有隧道轨向不均匀沉降的效果较为明显。

2) 综合土仓压力和注浆压力对既有隧道轨向不均匀沉降的影响规律,得到土仓压力值为0.08~0.13 MPa,注浆压力值为0.20~0.50 MPa。

3) 信息化监测反馈情况表明,当土仓压力为0.10~0.13 MPa、注浆压力为0.30~0.36 MPa时,盾构掘进过程中既有隧道结构的变形和各监测断面轨道不均匀沉降均在控制范围内。

4) 针对土仓压力和注浆压力两种施工参数对既有隧道变形的研究,结合监测手段,得到盾构施工参数建议值,可为类似工程施工提供借鉴。

## 参考文献(References):

- [1] 徐前卫,王尉行,孙梓栗等.浅埋红层软弱隧道围岩破坏特性模型试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(S2): 37-41.(XU Qianwei, WANG Weixing, SUN Zili, et al. Model tests on failure characteristics of red weak surrounding rock of shallow buried tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 37-41.(in Chinese))
- [2] 徐前卫,贺翔,孙梓栗,等.滇中红层软弱围岩局部失稳及变形控制实践[J].铁道工程学报,2020,37(3): 61-66.(XU Qianwei, HE Xiang, SUN Zili, et al. Local instability and deformation control practice of the weak surrounding rock in red beds in central Yunnan Province [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(3): 61-66.(in Chinese))
- [3] LIAO J, GAO L. Experimental study on compressive strength of the red-bed soft rock highway tunnel's surrounding rock [C]//2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. Hohhot:IEEE, 2011: 6507-6510.
- [4] 钟剑,傅鹤林,唐超.岩溶隧道洞口段超前支护数值模拟[J].公路与汽运,2020(1): 124-128.(ZHONG Jian, FU Helin, TANG Chao. Numerical simulation of advanced support in Karst tunnel entrance section [J]. Highways & Automotive Applications, 2020(1): 124-128.(in Chinese))
- [5] 崔玉龙.砂土地层盾构隧道超近距离下穿既有隧道变形控制技术研究[J].铁道标准设计,2020,64(3):

- 123-129, 135. (CUI Yulong. Study on deformation control technology of shield tunnel passing under an existing tunnel at ultra-close distance in sand layer [J]. Railway Standard Design, 2020, 64(3): 123-129, 135. (in Chinese))
- [6] 祝思然, 黄佩格, 矫伟刚, 等. 盾构近距离下穿既有地铁隧道沉降控制技术研究[J]. 隧道建设, 2016, 36(2): 234-240. (ZHU Siran, HUANG Peige, JIAO Weigang, et al. Study on settlement control technologies for shield tunnel closely crossing underneath existing metro tunnel [J]. Tunnel Construction, 2016, 36(2): 234-240. (in Chinese))
- [7] 张健, 周中, 邢凯. 盾构隧道近接施工对地层变形的影响[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(4): 63-70. (ZHANG Jian, ZHOU Zhong, XING Kai. The influence of shield tunnel construction adjacent to the existing structure on deep soil displacement [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(4): 63-70. (in Chinese))
- [8] 康佐, 代光辉. 地铁盾构法隧道正交下穿施工对既有隧道影响分析[J]. 隧道建设, 2014, 34(10): 931-936. (KANG Zuo, DAI Guanghui. Shield boring of metro tunnel perpendicularly crossing underneath existing tunnel: Analysis on influence of shield boring on existing tunnel [J]. Tunnel Construction, 2014, 34(10): 931-936. (in Chinese))
- [9] 张琼方, 夏唐代, 丁智, 等. 盾构近距离下穿对已建地铁隧道的位移影响及施工控制[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3561-3568. (ZHANG Qiongfang, XIA Tangdai, DING Zhi, et al. Effect of nearby undercrossing tunneling on the deformation of existing metro tunnel and construction control [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12): 3561-3568. (in Chinese))
- [10] 王立新, 李储军, 汪珂, 等. 黄土地区基坑近接施工变形控制标准数值模拟研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(4): 123-129. (WANG Lixin, LI Chujun, WANG Ke, et al. Displacement analysis and control standards of foundation pit construction in loess area [J]. Railway Standard Design, 2020, 64(4): 123-129. (in Chinese))
- [11] 杨志勇, 江玉生, 颜治国, 等. 盾构下穿地铁运营隧道沉降规律分析[J]. 西安科技大学学报, 2014, 34(3): 268-273. (YANG Zhiyong, JIANG Yusheng, YAN Zhiguo, et al. Analysis on settlement regularity when shields underneath pass subway tunnels [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2014, 34(3): 268-273. (in Chinese))
- [12] 房明, 刘镇, 周翠英, 等. 新建隧道盾构下穿施工对既有隧道影响的三维数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8(1): 67-72. (FANG Ming, LIU Zhen, ZHOU Cuiying, et al. 3D numerical simulation of influence of undercrossing shield construction on existing tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, 8(1): 67-72. (in Chinese))
- [13] 张利涛. 地铁隧道下穿施工对既有运营隧道的影响分析[J]. 国防交通工程与技术, 2019, 17(2): 29-32, 28. (ZHANG Litao. An analysis of the influence of the construction of a subway-undercrossed tunnel on an existing tunnel in operation [J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2019, 17(2): 29-32, 28. (in Chinese))
- [14] 姜克寒, 刘邦, 秦坤元, 等. 断层破碎带中泥水盾构掘进参数优化研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(3): 43-49. (JIANG Kehan, LIU Bang, QIN Kunyuan, et al. Study on the optimization for mud-water shield driving parameters in fault fracture zone [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(3): 43-49. (in Chinese))
- [15] (日)土木学会. 隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 朱伟, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. (Japan Civil Society Institute. Tunnel standard specification (shield section) and interpretation [M]. Translation by ZHU Wei. Beijing: China Construction Industry Press, 2001. (in Chinese))
- [16] 广州地铁设计研究院有限公司. 城市轨道交通结构安全保护技术规范: CJJ/T 202—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd.. Technical code for protection structures of urban rail transit: CJJ/T 202—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese))
- (责任编辑:罗容;校对:李脉 欧兆虎;英文编辑:陈璐)