

# 基于围岩蠕变效应的盾构隧道下穿高铁隧道 近接施工影响<sup>\*</sup>

王有旗<sup>1</sup> 马国松<sup>1</sup> 仇文革<sup>2,3</sup> 黄海昀<sup>2</sup> 张 都<sup>2</sup> 艾旭峰<sup>2</sup>

(1. 中铁二十五局集团第五工程有限公司, 266100, 青岛; 2. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 610031, 成都;  
3. 成都天佑智隧科技有限公司, 610031, 成都)

**摘 要** [目的] 当围岩具有蠕变特性时, 盾构隧道下穿高铁隧道近接施工过程的时间因素不容忽视, 近接施工的快慢会影响围岩的时效变形行为, 进而影响高铁隧道的轨道沉降。因此, 有必要研究围岩蠕变效应下, 盾构隧道下穿高铁隧道近接施工过程的影响。[方法] 以长沙轨道交通3号线盾构隧道下穿浏阳河隧道为例, 基于 Cvisc 蠕变模型, 采用 FLAC 3D 有限差分软件进行数值模拟, 对比分析围岩在经典弹塑性和蠕变效应下的近接施工影响, 分析时间相关因素——盾构隧道掘进速度对近接施工的影响。[结果及结论] 泥质粉砂岩含水率的增加, 会导致高铁轨道最终沉降变形增大, 在进行蠕变效应分析时, 需重视围岩的含水状态。考虑围岩蠕变效应后, 高铁轨道的沉降变形在开挖过程中呈现出一定的滞后性, 围岩蠕变效应有利于近接施工过程中高铁轨道变形控制。随着盾构掘进速度的加快, 高铁轨道沉降变形的滞后性越明显。在近接施工过程中, 可充分利用围岩的蠕变效应, 采取“快挖, 快支护”, 实现以“时间换空间”的目的, 为后续轨道的沉降变形控制争取更多的安全裕量。

**关键词** 轨道交通; 盾构隧道; 近接施工; 围岩蠕变效应

**中图分类号** U455.43

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2025.05.030

## Adjacent Construction Impact of Shield Tunnel Undercrossing High-Speed Railway Tunnels Based on Surrounding Rock Creep Effect

WANG Youqi<sup>1</sup>, MA Guosong<sup>1</sup>, QIU Wenge<sup>2,3</sup>, HUANG Haiyun<sup>2</sup>, ZHANG Du<sup>2</sup>, AI Xufeng<sup>2</sup>

(1. The 5th Engineering Co., Ltd., China Railway 25th Bureau Group, 266100, Qingdao, China; 2. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 3. Chengdu Tianyou Tunnelkey Co., Ltd., 610031, Chengdu, China)

**Abstract** [Objective] When the surrounding rock exhibits creep characteristics, the temporal factors in the adjacent con-

struction process of shield tunnel undercrossing high-speed railway tunnels cannot be ignored. The speed of the adjacent construction may affect the time-dependent deformation behavior of the surrounding rock, thereby influencing the track settlement in the high-speed railway tunnels. Therefore, it is necessary to study the impact of adjacent construction of shield tunnel undercrossing the high-speed railway tunnels under the creep effect of the surrounding rock. [Method] In the case study of Changsha Metro Line 3 shield tunnel undercrossing the Liuyanghe Tunnel, based on the Cvisc creep model, the FLAC 3D finite difference software is used for numerical simulation. The impacts of the adjacent construction on surrounding rock under the classical elastoplasticity and the creep effect are compared and analyzed, together with the time-related factor influence like the driving speed of shield tunneling on the adjacent construction. [Result & Conclusion] Increased water content of argillaceous siltstone will lead to an increase in the final settlement deformation of high-speed railway tracks. So, the water content of the surrounding rock must be prioritized in creep effect analysis. Considering the creep effect of the surrounding rock and the time lag characteristics exhibited in the high-speed railway track settlement deformation during excavation, the creep effect of the surrounding rock may contribute positively to the deformation control in the above adjacent construction scenario. With the acceleration of the shield tunneling, the time lag becomes more obvious in the settlement deformation of the high-speed railway track. During adjacent construction, the creep effect of the surrounding rock can be fully utilized through "rapid excavation and prompt support" to achieve the goal of "trading time for space," thereby securing additional safety margins for the track post-construction settlement control.

**Key words** rail transit; shield tunnel; adjacent construction; surrounding rock creep effect

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金面上项目(50578135, 50878185); 中铁二十五局集团第五工程有限公司委托研发类课题(CR2505-GD-CSDT14-2018009)

## 0 引言

由于城市地下空间控制点多,线路变动空间有限等因素,不可避免地会出现隧道工程近接施工问题<sup>[1-2]</sup>。因此,研究新建隧道工程近接既有隧道工程的施工影响具有重要意义。

盾构法施工因其对环境扰动小,机械化施工速度快等优点,在城市轨道交通建设中获得了广泛应用。文献[3]以我国实际盾构隧道近接工程为例,分析了新建盾构隧道上、下穿越施工对既有盾构隧道的变形影响机理。文献[4]结合现场实测数据和数值模拟结果,从时间和距离维度上分析了新建左、右线盾构隧道依次穿越既有双线的隧道沉降变形规律,提出将穿越开始阶段作为沉降控制的关键节点。文献[5]以济南地铁盾构隧道上跨穿越工程为例,采用数值模拟结合现场实测的方法,提出了适用于济南地区地质条件的盾构掘进参数建议值。文献[6]通过建立多目标优化模型,对盾构隧道下穿过程中的土仓压力、掘进速度、同步注浆量等6个因素的影响进行分析,实现了对既有隧道位移变形的有效控制。文献[7]以西安地铁区间隧道下穿西安地铁1号线出入段工程为例,研究了盾构掘进参数对既有地铁隧道结构变形的影响,以数值模拟和现场试验的方式,提出了砂土地层中盾构隧道近接施工的掘进参数参考值。

在上述关于盾构隧道近接既有隧道的研究中,盾构掘进速度是一个不可忽视的时间相关因素。然而,目前对于盾构掘进速度的研究主要集中于盾构隧道开挖对既有隧道影响的空间效应方面,而对于隧道周围地层具有流变特性导致的时间效应方面,相关研究尚有不足。鉴于此,本文以长沙轨道交通3号线盾构隧道下穿高铁浏阳河隧道为例,研究围岩蠕变效应及盾构隧道掘进速度对近接隧道施工的影响。本文研究可为同类工程的安全施工提供较为科学准确的理论指导。

## 1 工程概况

本文以长沙轨道交通3号线湘龙站—星沙站区间(以下简称“湘星区间”)盾构隧道下穿浏阳河隧道工程为例,开展相关研究。湘星区间左、右线隧道采用复合式土压平衡盾构机掘进,盾构隧道外径为6 m,衬砌厚度为300 mm,宽度为1.5 m,衬砌环由1个封顶块(KT)、2个邻接块(B1T、B2T)和3个

标准块(A1TL、A2TL、A3TL)组成。管片构造示意图如图1所示。

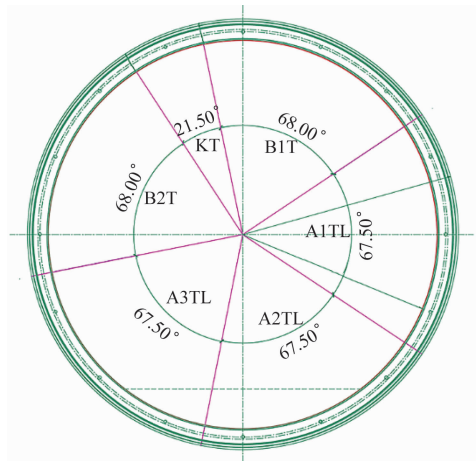


图1 管片构造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the segment structure

区间盾构隧道下穿浏阳河隧道的进口明洞段,其为单洞双线明洞拱形断面,断面宽为14.90 m,高为12.78 m,采用C35防水钢筋混凝土衬砌,拱部厚度为0.8 m,仰拱厚度为0.9 m,结构顶部覆土厚度约为4.2 m。浏阳河隧道围护结构采用的是桩径为1 m、桩间距为2 m、C30钢筋混凝土的钻孔灌注桩,嵌入基坑底部3 m。隧道内铺设无砟轨道,采用CRTS-I型双块式整体道床。

在浏阳河隧道里程K1566+807.984、K1566+827.984处分别与地铁区间(右线里程为DK34+855.912、左线里程为DK34+856.476处)左、右线大角度相交,相交位置位于京珠高速公路与开元西路交叉口西侧,星沙湘绣城南侧。下穿段平面位置关系示意图如图2所示,下穿段盾构隧道与浏阳河隧道垂直净距为11.95 m。



图2 下穿段平面位置关系示意图

Fig. 2 Planar position relationship diagram of the in the undercrossing section

长沙轨道交通3号线湘星区间下穿武广高速铁路的地层从上至下依次为人工填土、粉质黏土、强风化砾岩、中风化泥质粉砂岩,其中,区间隧道与

浏阳河隧道间的夹岩为中风化泥质粉砂岩。下穿段地质纵断面分布示意图如图3所示。

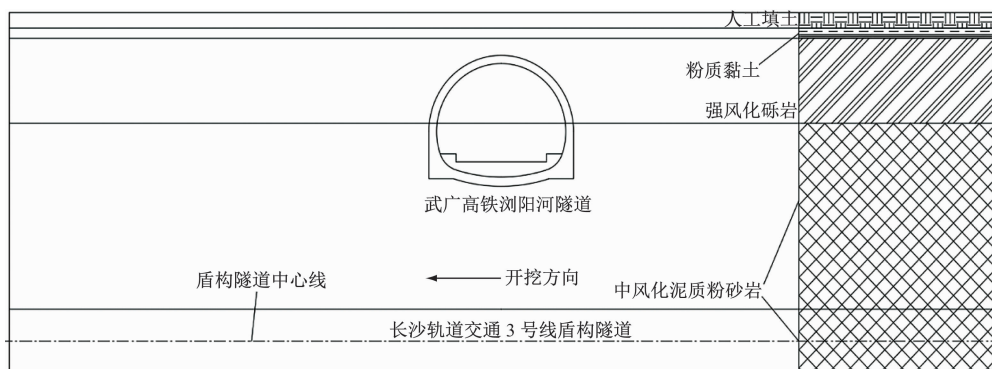


图3 下穿段地质纵断面分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of geological longitudinal section distribution in the undercrossing section

## 2 数值分析模型

### 2.1 基本假定

本文基于以下假定开展数值模拟研究:

1) 不考虑岩土体的各向异性,将其视为各向同性连续介质;

2) 现场地勘得到的岩土体力学特征可用于数值模拟;

3) 主要考虑施工期间掘进过程中的岩土体蠕变行为,不考虑盾构隧道施工完成后长期的蠕变行为。

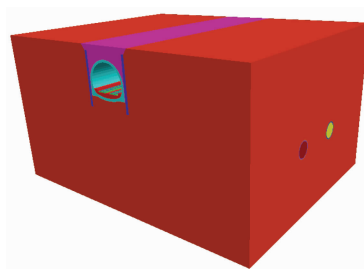
### 2.2 计算模型

采用FLAC 3D软件,建立三维仿真模型进行施工过程的模拟。计算模型的尺寸为110.0 m(长)×80.0 m(宽)×55.9 m(高)。盾构隧道中心距离模型边界均大于4倍洞径,可忽略模型边界效应对计算结果的影响。模型四周和底部边界采用法向约束,顶部为自由面。模型应力场按自重应力场考虑。整体模型及下穿段空间位置关系示意图如图4所示。

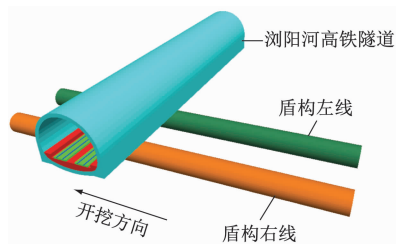
### 2.3 模型参数选取

#### 2.3.1 隧道及围岩常规参数

隧道围岩采用实体单元模拟,当其不考虑蠕变效应时,服从摩尔-库伦屈服准则;隧道支护结构、铁路道床、基坑孔灌注桩等均采用实体单元模拟,服从摩尔-库伦屈服准则;铁轨、盾构机盾壳等采用弹性本构模型模拟,基坑横撑采用梁单元模拟。数值模型物理力学参数如表1所示,盾构隧道土压平衡的土仓压力取为0.15 MPa。



a) 数值模拟模型



b) 下穿段空间位置关系

图4 整体模型及下穿段空间位置关系示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the overall model and the spatial position relationship in the undercrossing section

#### 2.3.2 围岩蠕变参数

中风化泥质砂岩是近接工程中的主要围岩,其根据含水率的不同,具有一定的流变特性。相关研究表明,FLAC 3D软件中的Cvisc模型能够较好地描述泥质粉砂岩的衰减蠕变和稳定蠕变关系<sup>[8]</sup>,因此本文采用Cvisc模型进行蠕变分析,该模型由Maxwell体、Kelvin体和M-C塑性体共同构成。Cvisc模型构成示意图如图5所示。

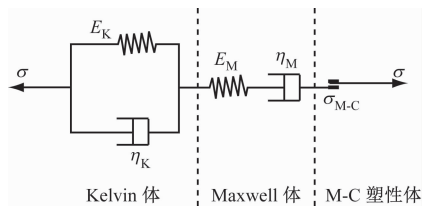
Cvisc模型在传统Burgers模型的基础上,加入了摩尔-库伦模型。当应力 $\sigma$ 较低( $\sigma < \sigma_s$ ,  $\sigma_s$ 为临界应力值)时,岩体先进入衰减蠕变阶段,然后进入



表 1 数值模型物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of numerical simulation model

名称	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	泊松比	弹性模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
素填土	1 970	0.35	0.019 5	0.012	15.60
粉质黏土	2 000	0.30	0.025 0	0.030	15.00
强风化砾岩	2 290	0.25	0.150 0	0.045	30.00
中风化泥质粉砂岩	2 310	0.22	2.500 0	0.150	32.00
盾构管片	2 500	0.20	35.500 0	3.990	51.18
高铁隧道衬砌	2 500	0.20	32.500 0	2.950	51.94
桩孔灌注桩	2 500	0.20	31.500 0	2.550	50.77
横撑	7 850	0.30	200.000 0	—	—
铁轨	7 850	0.30	200.000 0	—	—
轨道板	2 500	0.20	32.500 0	—	—
注浆层	2 250	0.24	0.120 0	0.050	35.00
盾构机盾壳	7 850	0.30	200.000 0	—	—



注:  $\sigma$  为围岩应力;  $E_K$  为 Kelvin 体弹性模量;  $\eta_K$  为 Kelvin 体弹性模量黏性系数;  $E_M$  为 Maxwell 体弹性模量;  $\eta_M$  为 Maxwell 体弹性模量黏性系数;  $\sigma_{M-C}$  为 M-C 塑性体屈服应力。

图 5 Cvisc 模型构成示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the composition of Cvisc model

稳定蠕变阶段; 当应力  $\sigma$  等于或大于某一临界值 ( $\sigma \geq \sigma_s$ ) 时, 岩体进入加速蠕变阶段。本构关系  $\varepsilon(t)$  可以表示为:

1) 当  $\sigma < \sigma_s$  时,

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[ \frac{1}{E_M} + \frac{t}{\eta_M} + \frac{1}{E_K} \left( 1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_K}} \right) \right] \quad (1)$$

2) 当  $\sigma \geq \sigma_s$  时,

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[ \frac{1}{E_M} + \frac{t}{\eta_M} + \frac{1}{E_K} \left( 1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_K}} \right) \right] + \varepsilon_p \quad (2)$$

式中:

$t$ ——围岩应力作用时间;

$\sigma_0$ ——常应力;

$\varepsilon_p$ ——塑性体应变。

通过调研我国同类岩石的蠕变特性相关资料<sup>[9]</sup>, 可以得到干燥和天然含水率(根据地勘资料, 现场天然含水率接近饱和含水率)状态下, 泥质粉

砂岩的蠕变参数, 如表 2 所示。

表 2 泥质粉砂岩蠕变参数

Tab. 2 Creep parameters of argillaceous siltstone

含水率/%	$E_M$ /GPa	$\eta_M$ /(GPa/h)	$E_K$ /GPa	$\eta_K$ /(GPa/h)
0	2.37	—	29.80	27.00
6.88	1.40	—	6.72	2.19

## 2.4 计算模拟流程

利用数值模型进行模拟计算时, 根据实际施工情况对盾构隧道下穿高铁隧道进行全过程模拟, 以反映真实的应力和位移变化。相应的模拟计算步骤如下。

步骤 1 计算初始地应力场。根据隧道地层分布情况, 施加自重应力场, 设置边界条件, 并进行地层平衡计算。该过程中, 屏蔽 Cvisc 模型的蠕变作用, 即仅对围岩进行静力计算。

步骤 2 高铁隧道施工模拟。高铁隧道明洞段采用明挖法施工, 模拟明挖法钻孔灌注桩施工、基坑开挖、基坑横撑施工等施工步骤; 设置高铁隧道衬砌, 回填覆土, 并进行平衡计算。该过程中, 屏蔽 Cvisc 模型的蠕变作用, 即仅对围岩进行静力计算。

步骤 3 下穿盾构隧道掘进施工模拟。该过程中, 开启 Cvisc 模型中的蠕变效应作用, 根据盾构掘进速度确定每一环掘进的蠕变计算时间, 分析盾构隧道施工期间, 掘进过程中的岩土体蠕变行为。

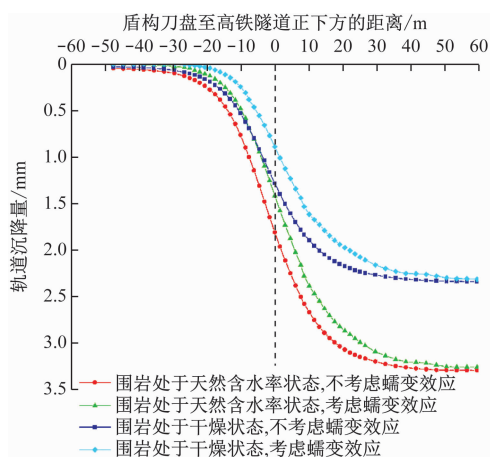
相关研究表明, 新建隧道下穿既有隧道施工过程中, 新建隧道正上方通常为既有隧道沉降变形最大点<sup>[10]</sup>。因此, 本文选取盾构隧道右线正上方对应

位置处高铁隧道的轨道作为监测对象,监控该位置轨道的沉降变形。

### 3 基于蠕变效应的近接施工影响分析

#### 3.1 蠕变效应

为研究蠕变特性对近接工程的影响,假设盾构隧道无管片支护状态下,右线盾构隧道按6 h/环的掘进速度开挖,围岩分别处于天然含水率和干燥两种状态,分析是否考虑蠕变特性对高铁轨道沉降变形的影响。基于数值模型可以计算得到,盾构右线正上方处高铁隧道轨道沉降量随右线开挖进程的变化情况,如图6所示。



注:盾构刀盘至高铁隧道正下方距离以沿盾构掘进方向为正,反之为负;余类同。

图6 高铁隧道轨道沉降量随盾构隧道右线掘进的变化情况  
Fig. 6 Variation of the high-speed railway tunnel track settlement with the right line shield tunnel excavation

由图6可知:当考虑蠕变效应时,围岩处于天然含水率状态的轨道最终沉降值为3.25 mm,大于围岩处于干燥状态的轨道最终沉降值(2.31 mm),二者在掘进至既有高铁隧道正下方时,轨道沉降值相差0.52 mm;当不考虑蠕变效应时,围岩分别处于天然含水率和干燥状态下的轨道最终沉降值,以及两种含水率状态下掘进至既有高铁隧道正下方的轨道沉降差值均与考虑蠕变效应时一致。由此可知,泥质粉砂岩为干燥状态时,岩石强度高,黏度系数大;当含水率增加时,岩石强度降低,黏度系数减小,岩体的含水状态对近接工程产生不利影响,在近接过程分析中不能忽视岩体的含水状态。

此外,相同含水率条件下,考虑、不考虑蠕变效应的最终轨道沉降值相差仅为0.03 mm,但在开挖过程中,尤其是掘进至既有高铁隧道正下方时,二

者的轨道沉降值相差约0.39 mm。相同含水率条件下,轨道沉降曲线具有相同的变化趋势,可将考虑蠕变效应的轨道沉降变化曲线近似当作不考虑蠕变效应的轨道沉降变化曲线“向右平移”的结果。由此可知,考虑蠕变特性后,轨道沉降变形情况具有一定的滞后性,岩石的蠕变特性为开挖和支护留有更多的时间和安全裕量,定性地说明了蠕变特性对近接工程施工的有利性。

#### 3.2 盾构掘进速度

研究盾构隧道施工过程中与时间相关的关键变量——盾构掘进速度,对近接工程的施工影响。在盾构隧道无管片支护状态和岩石处于天然含水率状态下,分析5种盾构掘进速度(见表3)对高铁隧道轨道变形的影响,计算结果如图7所示。

表3 盾构掘进速度及其说明

Tab. 3 Shield tunneling speed and its explanation

掘进速度/(h/环)	说明
0.32	盾构掘进速度上限为80.000 mm/min
1.25	盾构掘进速度为20.000 mm/min
4.00	盾构掘进速度为6.250 mm/min
6.00	盾构掘进速度为4.170 mm/min
8.00	盾构掘进速度下限为3.125 mm/min

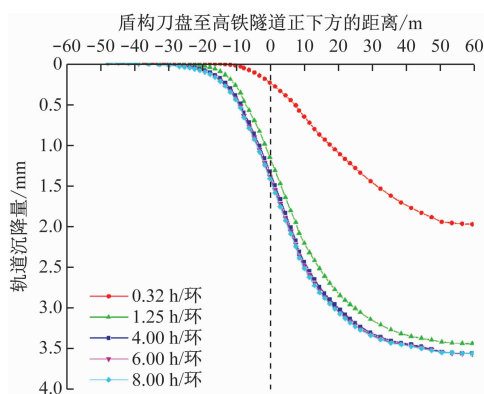


图7 不同掘进速度下高铁隧道轨道沉降量随盾构隧道右线掘进的变化情况(无管片支护)

Fig. 7 Variation of the high-speed railway tunnel track settlement under different driving speeds of the right line shield tunnel excavation (without segment support)

由图7可知:随着盾构掘进速度从8.00 h/环加快至0.32 h/环,盾构掘进至既有高铁隧道正下方时,轨道沉降值由1.41 mm减小为0.29 mm,前者已经超过变形控制标准1.40 mm(本文以TB 10621—2014《高速铁路设计规范》为依据,预留

30% 安全裕量后确定控制标准),而后者仍有裕量。研究表明,盾构掘进速度越快,轨道变形越小,这是由岩石蠕变的黏滞特性导致的。但掘进速度对近接施工的影响是否显著与岩石的蠕变曲线特征(见图 8)有关,当每环的掘进时间处于衰减蠕变段时,盾构掘进速度对近接施工影响显著;当每环的掘进时间处于等速蠕变段时,盾构掘进速度对近接施工影响较小。

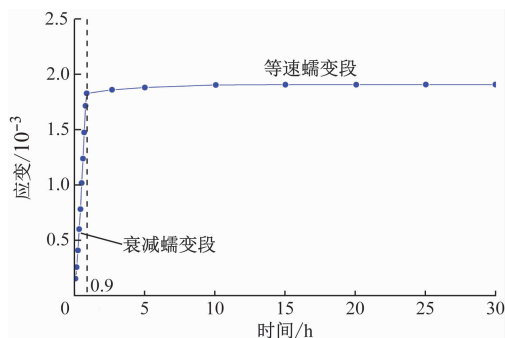


图 8 泥质粉砂岩单轴压缩蠕变曲线

Fig. 8 Uniaxial compression creep curve of argillaceous siltstone

模拟盾构隧道正常施工,管片支护条件下,不同掘进速度下的高铁隧道轨道沉降量随盾构隧道右线掘进的变化情况,如图 9 所示。由图 9 可知:在正常掘进和管片支护条件下,随着盾构掘进速度从 8.00 h/环加快至 0.32 h/环,盾构掘进至既有高铁隧道正下方时,轨道沉降值由 0.23 mm 减小为 0.09 mm;右线施工完成后,当采用掘进上限速度 0.32 h/环掘进时,其引起的轨道沉降最终值最小,为

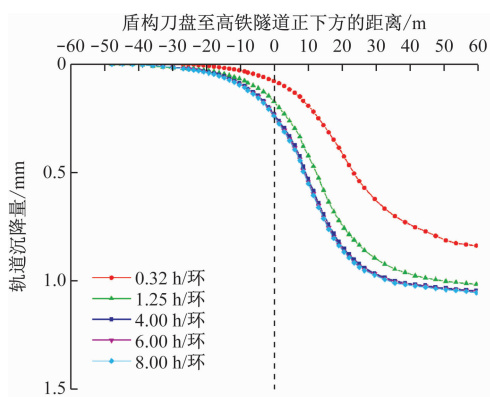


图 9 不同掘进速度下高铁隧道轨道沉降量随盾构隧道右线掘进的变化情况(管片支护)

Fig. 9 Variation of the high-speed railway tunnel track settlement under different driving speeds with the right line excavation of shield tunnel (with segment support)

0.84 mm;另外 4 种掘进速度引起的轨道最终沉降值差别不大,特别是相较于衰减蠕变段临界时间(0.9 h),每环掘进时间的耗时越长,所引起的轨道最终沉降值越接近。由此可知,若盾构机每环的掘进时间能处于衰减蠕变段,近接施工过程中可充分利用该特点,采取“快挖、快支护”措施,实现“以时间换空间”的目的,为后续隧道变形控制争取更多的安全裕量。

## 4 结语

以长沙轨道交通 3 号线盾构隧道下穿高铁浏阳河隧道为例,建立盾构隧道下穿高铁隧道的数值分析模型,分析了围岩的蠕变效应及对盾构掘进速度对近接工程的施工影响。主要获得以下结论:

1) 不论是否考虑蠕变效应,泥质粉砂岩含水率的增加,会对近接工程产生不利的影响,在施工过程中需重视围岩的含水状态。

2) 在同一含水率下,考虑围岩蠕变效应后,虽然轨道最终沉降值不变,但高铁轨道沉降变形在开挖过程中呈现出一定的滞后性,说明了围岩的蠕变特性对近接工程施工过程中的位移变形控制有利。

3) 随着盾构掘进速度的增加,高铁轨道沉降变形的滞后性越来越明显。采用“快挖、快支护”措施,即在围岩处于衰减蠕变阶段时及时施作衬砌,能够实现“以时间换空间”的目的,为后续隧道变形控制争取更多的安全裕量。

## 参考文献

- [1] 洪开荣,冯欢欢.近 2 年我国隧道及地下工程发展与思考(2019—2020 年)[J].隧道建设(中英文),2021(8):1259. HONG Kairong, FENG Huanhuan. Development and thinking of tunnels and underground engineering in China in recent 2 years (from 2019 to 2020) [J]. Tunnel Construction, 2021 (8): 1259.
- [2] 冯爱军.中国城市轨道交通 2021 年数据统计与发展分析[J].隧道建设(中英文),2022(2):336. FENG Aijun. Data statistics and development analysis of urban rail transit in China in 2021 [J]. Tunnel Construction, 2022 (2): 336.
- [3] 魏纲,杨波,俞国骅.盾构不同穿越形式引起既有盾构隧道变形机理分析[J].现代隧道技术,2018,55(增刊 2):1020. WEI Gang, YANG Bo, YU Guohua. Mechanism analysis of deformation of existing shield tunnel caused by different shield crossing forms [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55 (S2): 1020.

(下转第 187 页)

- 析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2022, 35(4): 75.
- WANG Mingsheng, DONG Qiqi. Analysis of the influence of broken spring on the vibration characteristics of floating slab track structure[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2022, 35(4): 75.
- [8] 郑翔, 罗信伟, 李平, 等. 市域快线预制钢弹簧浮置板轨道振动特性研究[J]. 振动工程学报, 2021, 34(5): 951.
- ZHENG Xiang, LUO Xinwei, LI Ping, et al. Vibration performance of a prefabricated steel-spring floating-slab track for urban express rail transit[J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(5): 951.
- [9] 蒋吉清, 张佳斌, 董北北, 等. 剪力铰对地铁列车-劣化浮置板轨道振动的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(10): 2978.
- JIANG Jiqing, ZHANG Jiabin, DONG Beibei, et al. Effects of dowel joints on vibrations of metro train-deteriorated floating slab track system[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(10): 2978.
- [10] 王永安. 地铁钢弹簧浮置板轨道振动及隧道不均匀沉降影响分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- WANG Yongan. Analysis of track vibration and uneven settlement of subway steel spring floating slab[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 浮置板轨道技术规范: CJJ/T 191—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for floating slab track: CJJ/T 191—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- 收稿日期:2024-06-05 修回日期:2024-08-11 出版日期:2025-05-10  
Received:2024-06-05 Revised:2024-08-11 Published:2025-05-10  
· 第一作者:朱梅,工程师,739246514@qq.com  
通信作者:韩翔宇,工程师,739246514@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 180 页)
- [4] 高利宏. 双线盾构隧道近接下穿既有隧道结构沉降变形与施工节点控制分析[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(4): 194.
- GAO Lihong. Analysis of settlement deformation and construction node control of a double-line shield tunnelling passing under existing tunnel in close distance[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(4): 194.
- [5] 邢慧堂, 徐前卫, 刘浩, 等. 盾构近距离上跨既有隧道施工影响及控制研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(9): 61.
- XING Huitang, XU Qianwei, LIU Hao, et al. Research on the construction impact and control of shield crossing over existing tunnel at close distance[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(9): 61.
- [6] 曾铁梅, 王金峰, 吴贤国, 等. 盾构下穿既有隧道位移控制施工参数多目标优化[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(2): 98.
- ZENG Tiemei, WANG Jinfeng, WU Xianguo, et al. Multi-objective optimization of displacement of shield tunneling underpass existing tunnel based on GA-LSSVM combining NSGA-II [J]. Railway Standard Design, 2022, 66(2): 98.
- [7] 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[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(3): 123.
- 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.
- [8] 钱文喜, 耿大新, 梁国卿. 围岩蠕变对运营隧道衬砌安全性的影响[J]. 公路交通科技, 2020, 37(9): 90.
- QIAN Wenxi, GENG Daxin, LIANG Guoqing. Influence of Surrounding Rock Creep on Safety of Lining of Operating Tunnel [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(9): 90.
- [9] 黄明. 含水泥质粉砂岩蠕变特性及其在软岩隧道稳定性分析中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- HUANG Ming. Creep characteristics of cement-bearing siltstone and its application in stability analysis of soft rock tunnel [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [10] 杨春山, 莫海鸿, 陈俊生, 等. 近距离下穿盾构隧道对上覆运营地铁隧道的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(5): 145.
- YANG Chunshan, MO Haihong, CHEN Junsheng, et al. Influence of the approaching construction of underlying shield tunnels on overlying metro tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(5): 145.
- 收稿日期:2023-03-24 修回日期:2023-04-24 出版日期:2025-05-10  
Received:2023-03-24 Revised:2023-04-24 Published:2025-05-10  
· 第一作者:王有旗,高级工程师,1961098081@qq.com  
通信作者:仇文革,教授,qiwen\_qw@163.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