

# 基于盾构隧道施工力学特性的注浆加固方案比较分析

张社荣<sup>1,2</sup> 郭紫薇<sup>1,2</sup> 曹克磊<sup>1,2</sup> 郭丽娜<sup>3</sup> 高朗<sup>4</sup> 陈娇<sup>4</sup>

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 300072, 天津; 2. 天津大学建筑工程学院, 300072, 天津;

3. 云南工商学院建筑工程学院, 651701, 昆明; 4. 中国水利水电第十四工程局有限公司, 650051, 昆明 // 第一作者, 教授)

**摘要** 为了研究隧道注浆加固对盾构施工力学特性的影响, 以昆明轨道交通5号线软弱地层盾构隧道下穿采莲河施工为例, 运用Abaqus软件建立隧道施工三维计算模型, 通过改变注浆范围及注浆压力等参数, 提出6种注浆加固方案并对这6种加固方案下地表沉降和管片内力变形进行对比分析。研究结果表明: 在该工程地质条件和施工因素下, 选择上、下半断面分别局部注浆, 并控制注浆压力0.1~0.2 MPa时注浆补偿效果最佳, 此时地表沉降较未注浆时减小54.3%~66.9%, 同时管片拉应力及内侧上浮量均满足控制要求; 考虑注浆加固效果对地层弹性模量的直接影响, 对其进行了敏感性分析, 当注浆圈弹性模量由80 MPa增至100 MPa时, 地表沉降减小了14.78%。故施工中应严格控制注浆质量, 保证注浆加固范围及注浆压力在要求范围内, 提高施工安全。

**关键词** 地铁; 盾构隧道; 注浆加固; 地表沉降; 管片应力变形

**中图分类号** U455.49

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2021.09.031

## Comparative Analysis of Grouting Reinforcement Schemes Based on Mechanical Characteristics of Shield Tunnel Construction

ZHANG Sherong, GUO Ziwei, CAO Kelei, GUO Lina, GAO Lang, CHEN Jiao

**Abstract** In order to study the influence of tunnel grouting reinforcement on the mechanical characteristics of shield construction, taking Kunming Rail Transit Line 5 weak stratum shield tunnel construction under-crossing Cailian River as an example, a three-dimensional calculation model of tunnel construction is constructed using Abaqus software. By adjusting parameters such as grouting pressure and grouting scope, six types of grouting reinforcement schemes are proposed and the ground settlement and internal force deformation of segments under these six reinforcement schemes are compared and analyzed. Research results show that considering the engineering geological conditions and construction factors, the upper and lower half sections are selected for local grouting, and the

grouting compensation effect is the best when the grouting pressure is controlled between 0.1 to 0.2 MPa, meanwhile surface settlement is reduced by 54.3%~66.9% compared to scenario without grouting, and the tensile stress of the segment and the amount of floating inside meet the control requirements. Considering the direct influence of the grouting reinforcement effect on the formation elastic modulus, a sensitivity analysis is conducted. When the modulus is increased from 80 MPa to 100 MPa, ground settlement decreases by 14.78%. Therefore, grouting quality should be strictly controlled during construction to ensure that the scope of grouting reinforcement and grouting pressure are within the required range, improving construction safety.

**Key words** metro; shield tunnel; grouting reinforcement; surface settlement; stress deformation of segment

**First-author's address** State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, 300072, Tianjin, China

随着城市轨道交通的快速发展, 区间隧道经常要下穿城市内河和道桥。盾构法施工与一般区间隧道施工相比, 施工难度和安全风险相对增加<sup>[1]</sup>。盾构机在推进过程中易造成地层扰动, 从而引发地表沉降, 管片脱出盾尾后管片极易发生上浮<sup>[2]</sup>。这些都是盾构隧道施工过程中普遍存在的问题。

近年来, 盾构隧道施工对地表沉降或管片应力变形的影响研究已取得了一定的成果, 并指导了相关工程的顺利实施<sup>[3-8]</sup>。但在软弱地层, 盾构隧道下穿河流时, 盾构施工对地表沉降、管片内力及变形的影响规律有待深入研究。控制隧道变形的一种有效措施即在隧道周围采用深孔注浆对地层进行加固, 因此, 研究注浆加固对隧道变形的控制作用具有重要意义。目前, 国内外对注浆加固原理的研究较多<sup>[9-11]</sup>, 但针对具体工程的注浆加固优化却鲜有研究。为此, 本文以昆明轨道交通5号线盾构

隧道下穿河流段工程为例,采用有限元法对盾构施工过程进行模拟分析,研究隧道注浆加固对盾构施工力学特性的影响,并对注浆加固方案进行比较,归纳总结较为经济安全的施工方案。

## 1 注浆加固优化计算模型建立

### 1.1 隧道注浆加固数学模型分析

隧道在注浆加固后,洞室周边会产生阻碍围岩发生变形的力,围岩的二次应力状态也会随之改变。阻力的大小和方向影响着围岩的应力状态<sup>[12]</sup>。为了便于分析,将隧道围岩的受力状态转换为圆环或厚壁圆筒的模型,假定:围岩内半径为  $a$ ,外半径为  $b$ ,内部受到的均布压力为  $p_a$ ,外部受到的均布压力为  $p_b$ ,如图 1。

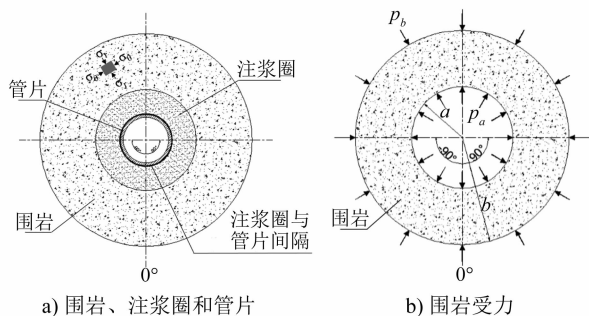


图 1 注浆加固后隧道围岩受力图

根据弹性理论,在内外压力  $p_a$  和  $p_b$  的作用下,当  $b \gg a$  时,  $p_a = \sigma_0$  时围岩应力值为:

$$\sigma_r = \sigma_0 \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + p_a \frac{a^2}{r^2} \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_0 \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - p_a \frac{a^2}{r^2} \quad (2)$$

$$\sigma_0 = \gamma H_c$$

式中:

$\sigma_0$ ——围岩初始应力;

$\gamma$ ——围岩容重;

$r$ ——围岩到隧洞中心的距离;

$H_c$ ——地表到隧洞中心的距离;

$\sigma_r$ ——径向应力;

$\sigma_\theta$ ——切向应力。

由式(1)、式(2)可知,隧道注浆加固后,其围岩重分布应力  $\sigma_r$  和  $\sigma_\theta$  由开挖以后围岩的重分布应力和注浆压力引起的附加应力组成,前项即为开挖以后围岩的重分布应力,后项即为注浆压力引起的附加应力值,即:

$$\sigma_r = p_a \frac{a^2}{r^2} \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = -p_a \frac{a^2}{r^2} \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可知,注浆压力使围岩产生负的环向应力,即拉应力。由此可见,在一定程度上上的注浆压力会使周边的径向应力增大,而使切向应力减小,实质上是使围岩受力状态由单向变为双向,进而提高围岩的承载能力及隧道稳定性。但注浆压力太大会使切向应力超过围岩的抗拉强度,严重时可能造成隧道失稳<sup>[12]</sup>。因此,合理地确定注浆压力及注浆范围对盾构隧道注浆加固安全施工非常重要。

### 1.2 数值模型

昆明轨道交通 5 号线迎海路站—滇池学院站区段全长 680.6 m。隧道的内径为 5.5 m,外径为 6.2 m,盾构机刀盘直径为 6.4 m,隧道洞室的衬砌为 350 mm,隧道左线与右线圆心间距 14 m。左线先始发,右线后开挖。该区段工程地质条件较差,隧道上方的采莲河对本工程施工有较大影响,因此有效控制地面沉降及管片应力变形对安全施工尤为重要。

首先建立隧道盾构施工三维有限元模型,如图 2 所示。计算模型中,土体、管片、盾壳、注浆体等均采用三维实体单元;数值模型宽度为 80 m,纵向长度 94 m,高度为 35.7 m;模型中地表为自由面;模型四周施加水平向约束,底部施加全约束。

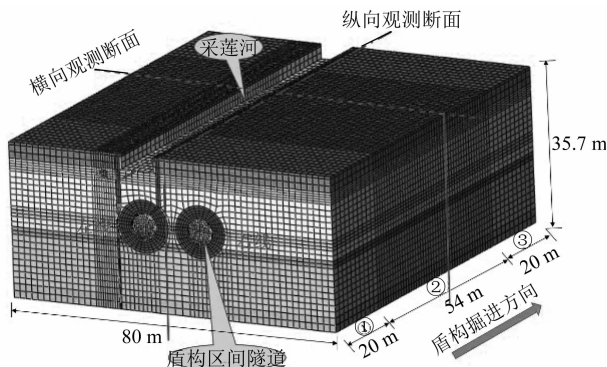


图 2 昆明轨道交通 5 号线迎海路站—滇池学院站区段三维整体计算模型

### 1.3 计算参数选取

根据勘察单位提供的地质报告,地层、管片衬砌及注浆材料等结构的物理力学参数如表 1 所示。

表 1 昆明轨道交通 5 号线迎海路站—滇池学院  
站区段地层土体及结构参数

材料	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量 E/MPa	泊松比 $\nu$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
素填土	1 700	18.0	0.40	28.7	12.0
粉砂	1 850	75.0	0.25	30.0	34.0
黏土	1 730	32.7	0.35	28.0	12.0
泥炭质土	1 350	25.4	0.40	21.3	9.0
黏土	1 730	32.7	0.35	28.0	12.0
黏质粉土	1 910	58.0	0.30	12.3	24.0
黏土	1 730	32.7	0.35	28.0	24.0
C50 管片	2 450	34 500.0	0.20		
盾壳	2 400	210 000.0	0.20		
注浆圈	2 400	80.0	0.30	30.0	30.0

2 计算方法

2.1 施工过程模拟方法

本文采用有限元软件 Abaqus 作为计算工具,应用生死单元法来模拟盾构开挖掘进过程。首先施加土体自重及边界约束条件,移除衬砌、注浆等支护单元,得到隧洞开挖前的初始应力;然后通过杀死土体单元来模拟开挖过程,激活衬砌单元及注浆单元模拟支护过程。

2.2 判别标准

以地表沉降值、管片应力及管片上浮量为指标,研究注浆加固范围及注浆压力等参数对隧道地表及管片的变形作用。隧道地表沉降控制值及结构管片竖向位移应满足 GB 50911—2013《城市轨道交通工程监测技术规范》<sup>[13]</sup> 的要求,管片应力应满足 C50 混凝土的抗拉强度标准值。

2.3 计算工况

模拟未注浆加固情况(基本工况),将得到横断面地表沉降位移、管片应力及内侧上浮量作为隧道变形的基准值,比较加固前后隧道各工况的变形特性,揭示注浆加固的作用效果。为研究注浆加固范围及注浆压力对地表沉降及管片应力变形的影响,选取 4 种施工建议范围,并对同一注浆范围下不同注浆压力作用效果进行对比分析。计算工况如表 2 所示。

3 注浆圈加固范围优化分析

为便于分析盾构隧道掘进下穿采莲河过程中地表沉降规律,分别选取横向及纵向断面作为观测面。横向断面为纵向 56.0 m 处,即开挖第 12 环处;纵向断面为河道边缘右侧 1.45 m 处。

表 2 隧道盾构施工注浆加固计算工况

工况	隧道注浆加固范围/( $^{\circ}$ )		注浆压力/ MPa	示意图
	左线隧道	右线隧道		
基本工况				
工况一	0~360	0~360	0.1	
工况二	-78.75~78.75 146.25~213.75	-78.75~78.75 146.25~213.75	0.1	
工况三	90~270	90~270	0.1	
工况四	33.75~326.25	33.75~326.25	0.1	
工况五	-78.75~78.75 146.25~213.75	-78.75~78.75 146.25~213.75	0.2	
工况六	-78.75~78.75 146.25~213.75	-78.75~78.75 146.25~213.75	0.3	

注:示意图只显示单线注浆,左、右线注浆范围相同。

3.1 注浆范围

《迎海路站—滇池学院站区间洞内加固范围表》显示,研究区段左、右线隧道 0~360°全断面注浆,而在其他区段则非全断面注浆。注浆加固范围不仅控制着地层加固范围,而且直接与工程造价有关。

为研究注浆加固范围的影响,选取表 2 中的工况 1—工况 4 进行分析,各工况沿隧道径向长度均为 3 m。

图 3 为不同注浆范围下双线贯通地表横断面沉降曲线。由图 3 可知,左、右线全部开挖完后,不同工况下横断面各点地表沉降值有明显差异,同一位置位移差异可达 23 mm 左右。工况一、工况二、工况三及工况四下地表沉降最大值分别为 26.37 mm、17.59 mm、15.69 mm、23.97 mm,分别较基本工况时减小了 31.47%、54.3%、59.2%、37.7%。

图 4 为不同注浆范围下管片最大主应力变化曲线(取右线每 3 环管片中的最大主应力值绘制曲线,如图中横坐标 23.6 m 处的应力值为纵向 20.0~23.6 m 内 3 环管片的最大主应力值,下同)。由图 4 可知:工况三下的管片应力明显大于其他工况的;研究区间最大主应力值为 3.89 MPa,超过 C50 混凝土

土的抗拉强度标准值;工况一及工况二的相差较小,工况四的最小。

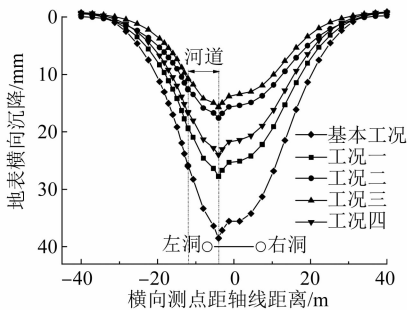


图3 不同注浆范围下双线贯通地表横断面沉降

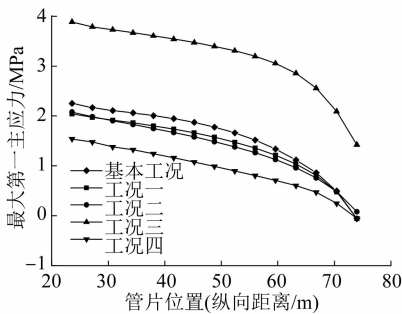


图4 不同注浆范围下双线贯通管片最大主应力变化曲线

图5为不同注浆范围下双线贯通管片内侧上浮变化曲线。工况一、工况二、工况三及工况四的底部内侧最大上浮量依次分别为12.66 mm、13.83 mm、18.53 mm、15.17 mm,其值均大于基本工况。综上可知,工况三可有效降低地表沉降,但其管片应力及内侧上浮量均较大。综合考虑注浆范围对地表沉降及管片变形的作用,选择上、下半断面分别局部注浆时效果最好。

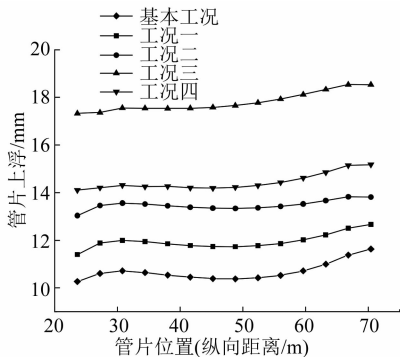


图5 不同注浆范围下双线贯通管片内侧上浮变化曲线

### 3.2 注浆压力

在众多注浆参数中,合理选择注浆压力是确保盾构隧道注浆效果良好的重要因素。如果注浆压

力过大,会发生地面隆起和管片变形,还易漏浆;如果注浆压力过小,可能引起地表沉降超出限值等<sup>[14]</sup>。通常,注浆压力可以取值为1.1~1.2倍静水压力且不超过0.3~0.4 MPa<sup>[15]</sup>。本文选取注浆压力分别为0.1 MPa、0.2 MPa及0.3 MPa时对注浆圈加固范围优化后的结果(上下断面分别局部注浆)进行敏感性分析。

图6为不同注浆压力下双线贯通地表横断面沉降曲线。如图6可知:随着注浆压力增大,地表沉降值逐渐减小;注浆压力为0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa时,地表沉降最大值分别为17.59 mm、12.73 mm、8.32 mm,分别较未注浆时减小54.3%、66.9%、78.4%。

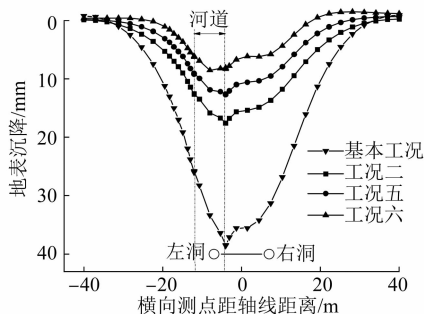


图6 不同注浆压力下双线贯通地表沉降变化曲线

图7为不同注浆压力下管片最大主应力变化曲线。由图7可知:随着注浆压力增大,管片主应力逐渐减小;注浆压力为0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa时,管片主应力最大值分别为2.08 MPa、1.80 MPa、1.51 MPa,均满足C50混凝土的抗拉强度标准值要求。

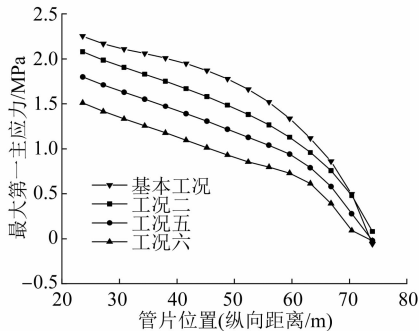


图7 不同注浆压力下双线贯通管片最大主应力变化曲线

图8为不同注浆压力下双线贯通管片内侧上浮变化曲线。工况二、工况五及工况六底部内侧最大上浮量依次分别为13.83 mm、15.28 mm、16.80 mm。综上可知,注浆压力增大,在一定程度上降低地表

沉降及管片应力的同时,管片内侧上浮量会相应增大。综合考虑注浆压力对地表及管片变形的作用,可控制注浆压力在 0.1~0.2 MPa 范围内。

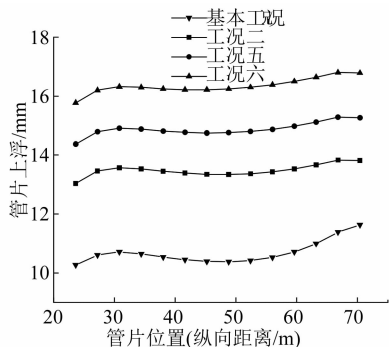


图8 不同注浆压力下双线贯通管片内侧上浮变化曲线

#### 4 注浆圈弹性模量敏感性分析

目前,多数试验研究成果表明:注浆能有效提高土体变形模量,且加固体的弹性模量体现了注浆加固效果,注浆加固效果好,则加固体的弹性模量大;反之则小。

图9为不同注浆圈弹性模量下双线贯通地表横断面沉降曲线。由图9可知:弹性模量越大,地表沉降值越小;当弹性模量为 100 MPa 时,横断面最大沉降值为 14.99 mm,地表沉降相对基本工况的减小了 61.34%,相对工况二的减小了 14.78%。

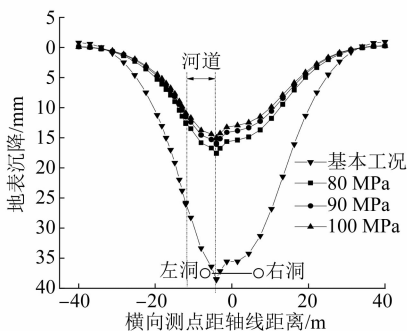


图9 不同注浆圈弹性模量下双线贯通地表沉降变化曲线

图10~11分别为不同注浆圈弹性模量下管片最大主应力曲线及管片内侧上浮变化曲线。由图10~11可知:注浆圈弹性模量由 80 MPa(工况二)增至 100 MPa 时,管片最大主应力的最大值逐渐减小,管片底部上浮量逐渐增大;但同一位置不同工况管片最大主应力相差幅度不超过 0.4 MPa,底部上浮增加量集中在 1.5 mm 左右,差值很小。与土体相比,管片对注浆圈弹性模量的变化不太敏感。

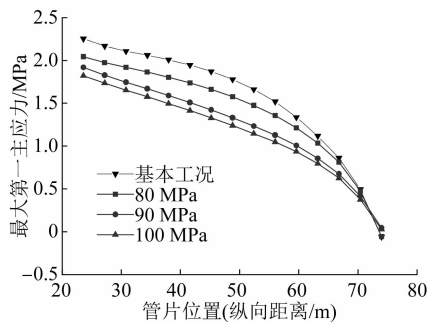


图10 不同注浆圈弹性模量双线贯通管片最大主应力变化曲线

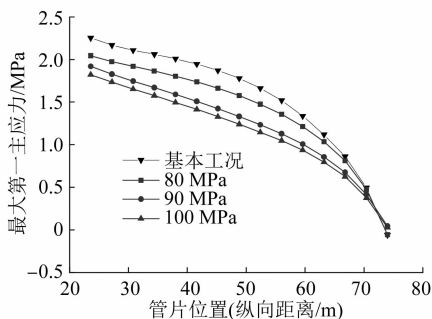


图11 不同注浆圈弹性模量双线贯通管片内侧上浮变化曲线

综上所述,注浆加固效果对地表沉降影响较为显著。故施工过程应严格保证注浆质量,控制注浆加固范围、注浆压力等条件在要求范围内,使土体维持较好的水平。

#### 5 加固效果实测分析

为了研究隧道盾构施工过程中地表及管片的变形规律,在特定位置设监测点,对采用如上加固方案后的地表沉降、管片拱顶沉降等指标进行量测和观察。本文选取位于 DK16+430 断面左线隧道正上方的地表监测点 DBC5-5 及位于 DK16+440 断面左线隧道正上方的拱顶沉降点 GXC2-5 为研究对象,监测点布置如图12所示,监测点沉降历时曲线如图13所示。

由图13可知,随着左线开始施工,地表监测点 DBC5-5 及拱顶测点 GXC2-5 持续沉降。当施工步骤还未到达监测点时,监测点处已经出现一定程度的沉降;当施工通过监测点时,地表沉降发生较大突变;随着施工持续进行,地表沉降的速率有所降低,拱顶沉降出现一定回弹。以最终阶段来看,监测点 DBC5-5 沉降值稳定在 8.0 mm 附近,GXC2-5

沉降值稳定在 10.5 mm 附近,远小于沉降控制值。这说明地表及拱顶的沉降值都是处于安全范围内的。

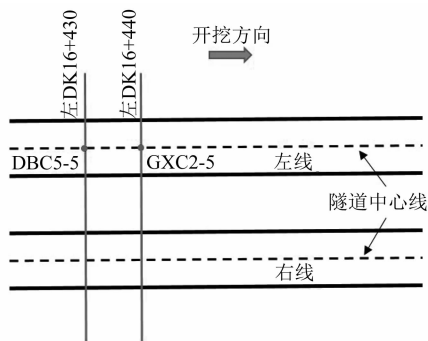


图 12 监测点 DBC5-5、GXC2-5 布置示意图

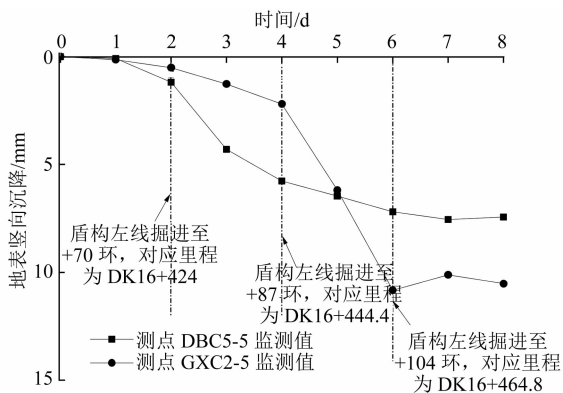


图 13 监测点 DBC5-5、GXC2-5 沉降历时曲线

## 6 结语

针对昆明轨道交通 5 号线盾构隧道下穿采莲河工程,对隧道施工全过程力学特性进行了数值模拟。通过改变注浆加固范围及注浆压力,得到了控制地表沉降及管片应力变形的最优注浆加固方案。结论如下:

1) 上半断面注浆时可有效降低地表沉降,但对管片较为不利,管片应力及内侧上浮量均较大。考虑注浆范围对地层及管片的双重影响,施工过程选择上、下半断面分别局部注浆时效果最好。

2) 地表沉降值及管片应力随注浆压力的增大而减小,而管片内侧上浮量相应增大。考虑注浆压力对地层及管片的双重影响,可将注浆压力控制在 0.1~0.2 MPa。综合以上控制措施,可使地表沉降减小 54.3%~66.9%。

3) 注浆加固效果对地层沉降有直接影响,施工中应严格控制注浆质量,保证注浆加固范围及注浆压力在要求范围内,进而提高施工安全性能。

4) 结合数值模拟结果及现场监测结果,建议的注浆方案能有效控制地表及管片沉降变形,研究结果可靠。

## 参考文献

- [1] 李奎,高波. 地铁隧道下穿小河和桥梁的施工方
- [2] 刘重庆,曾亚武,朱泽奇,等. 厦门地铁上软下硬地层盾构施工引起的地表沉降研究[J]. 铁道科学与工程学报,2018(2): 444.
- [3] 郭玉海. 大直径土压平衡盾构引起的地表变形规律研究[J]. 土木工程学报,2013(11): 128.
- [4] 王长虹,朱合华,徐子川,等. 考虑岩土参数空间变异性的盾构隧道地表沉降分析[J]. 岩土工程学报,2018(2): 270.
- [5] 宫亚峰,王博,魏海斌,等. 基于 Peck 公式的双线盾构隧道地表沉降规律[J]. 吉林大学学报(工学版),2018(5): 1411.
- [6] 周振梁,谭忠盛,苏河修,等. 隧道下穿富水软弱不均匀地层沉降控制技术研究[J]. 土木工程学报,2017(增刊2): 153.
- [7] 魏纲,洪杰,魏新江. 盾构隧道施工阶段管片上浮的力学分析[J]. 岩石力学与工程学报,2012(6): 1257.
- [8] 杨广武,李兴高,吴晓军,等. 盾构隧道施工过程中管片内力的研究[J]. 中国铁道科学,2009(3): 57.
- [9] HENDERSON T O, TAYLOR R N, HARRIS D I, et al. Observations of ground and structure movements for compensation grouting during tunnel construction at Waterloo station[J]. Géotechnique, 1994, 44(4): 691-713.
- [10] QIAN D, ZHANG N, ZHANG M, et al. Application and evaluation of ground surface pre-grouting reinforcement for 800-m-deep underground opening through large fault zones[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(13): 285.
- [11] 张冬梅,邹伟彪,闫静雅. 软土盾构隧道横向大变形侧向注浆控制机理研究[J]. 岩土工程学报,2014(12): 2203.
- [12] 邓宗伟,陈建平,冷伍明. 盾构隧道壁后注浆作用机理的计算研究[J]. 塑性工程学报,2005(6): 114.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通工程监测技术规范: GB 50911—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2013.
- [14] 叶飞,苟长飞,毛家骅,等. 黏土地层盾构隧道临界注浆压力计算及影响因素分析[J]. 岩土力学,2015(4): 937.
- [15] 徐新,王帆,齐保栋,等. 软硬不均地层盾构近接下穿施工掘进参数优化分析[J]. 路基工程,2017(3): 212.

(收稿日期:2019-10-14)