

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.05.020

# 考虑注浆作用的盾构隧道施工环境影响分析

刘钧<sup>1</sup>, 龚湘源<sup>1</sup>, 黄栩<sup>1</sup>, 刘念武<sup>2</sup>, 徐浩东<sup>3</sup>

(1. 中铁二院华东勘察设计有限责任公司, 浙江 杭州 310016; 2. 浙江理工大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310018; 3. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

**摘要:**为分析盾构隧道施工过程中的注浆过程对周边环境的影响,文章利用FLAC 3D有限元软件建立数值模型,通过设置孔压模拟注浆对地层的作用,采用流固耦合的数值方法模拟施工过程引起的地层变形。通过与实际工程对比,验证该方法的准确性,进一步分析盾构施工中注浆压力、临空时间对地表最大沉降的影响规律。结果表明:注浆压力越大,地表最大沉降越小,选用注浆压力为1.10倍上覆土重作用压力为最佳;临空时间越长,地表最大沉降越大。

**关键词:**注浆作用;流固耦合;数值模拟;环境变形

**中图分类号:**TU447 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)05-0708-05

## Environmental impact analysis of shield tunnel construction considering grouting action

LIU Jun<sup>1</sup>, GONG Xiangyuan<sup>1</sup>, HUANG Xu<sup>1</sup>, LIU Nianwu<sup>2</sup>, XU Haodong<sup>3</sup>

(1. CREEC East China Survey and Design Co., Ltd., Hangzhou 310016, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 3. School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In order to analyze the influence of grouting process on the surrounding environment during shield tunnel construction, a numerical model was established by using FLAC3D finite element software. The effect of grouting on strata was simulated by setting pore pressure, and the strata deformation caused by construction process was simulated by fluid-structure coupling numerical method. By comparing with the actual project, the accuracy of the proposed method was verified, and the influence law of grouting pressure and air time on the maximum surface settlement in shield construction was further analyzed. The results show that the greater the grouting pressure, the smaller the maximum surface settlement, and the best choice is 1.10 times the pressure induced by overlying soil weight. The longer the air time, the greater the maximum surface settlement.

**Key words:** grouting action; fluid-structure coupling; numerical modeling; environmental deformation

随着我国轨道交通建设的快速发展,地铁隧道的需求量和规模日益增长,盾构隧道因其对环境影响小、地层适应性好、机械化程度高、施工速度快等优点<sup>[1-2]</sup>,被广泛用于城市地铁、地下通道、输水隧道等地下工程建设。但盾构施工过程不可

避免地对周边水土环境产生扰动影响,探究盾构施工过程中周边环境的响应过程,并以此控制施工参数就成了盾构研究的重要内容。多数学者已开展了关于盾构注浆施工对周边水土环境影响的研究。文献[3]通过改变注浆加固范围及注浆压

收稿日期:2023-11-29;修回日期:2024-05-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078466);上海市自然科学基金资助项目(22ZR1430800)

作者简介:刘钧(1983—),男,江苏靖江人,中铁二院华东勘察设计有限责任公司高级工程师;

刘念武(1987—),男,山东枣庄人,博士,浙江理工大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:zjulnw@163.com.

力,得到控制地表沉降的最优注浆加固方案;文献[4]发现地表沉降随盾构掘进表现出逐渐增大的趋势,同步注浆对地表沉降的发展起一定的抑制作用;文献[5]研究注浆量、注浆压力和注浆材料等对地表沉降影响,地表沉降受注浆压力波动影响较大,注浆压力过大会导致劈裂、跑浆,不利于沉降控制;文献[6]发现不对称注浆压力导致沉降槽呈不规则状,注浆压力较大的一侧易发生地表隆起;文献[7]发现在相同注浆率下,埋深越深土体越容易形成土拱效应,地表受到扰动的影 响减小,因此地表沉降值越小;文献[8]通过理论分析得到在一定范围内,地表沉降值随注浆率、隧道开挖半径的增大而增大,随隧道埋深、土体泊松比的减小而增大。

由于数值模拟方法的计算效果可靠、计算成本低及简便快捷等特点,相对于室内试验与现场实测,数值模拟方法已成为盾构法的主要研究方法之一。文献[9]通过数值模拟手段,分析得出在一定范围内增大注浆量和注浆压力可以有效地减少地面沉降;文献[10]采用基于地层损失理论的盾构掘进有限元方法模拟浆液硬化过程,分析盾尾浆液硬化对地层沉降影响,指出浆液的硬化能够有效减小地表和拱顶的沉降;文献[11]采用计算流体力学方法分析盾尾同步注浆的主要流动特征,指出注浆孔注入的浆液在盾尾间隙内呈发散式流动;文献[12]使用 COMSOL 有限元软件创建盾尾壁的局部模型,考虑浆液黏度的时变性、入口注浆压力及注浆孔位置对注浆扩散形态的影响;文献[13]采用等效弹性模量的方法对不同充填率注浆层进行数值模拟,分析不同充填率下地表沉降的变化,指出盾构隧道同步注浆充填率对地表的沉降影响显著;文献[14]基于弹性力学 Mindlin 解,采用数值积分法对同步注浆压力引起的地表变形进行计算分析,结果表明浆液压力导致的地表隆起可部分抵消土体损失造成的沉降。

但在目前的数值模拟中,多数学者选择忽略渗流过程或只考虑静水压力作用,但在实际的施工过程中,土体变形过程中伴有土中流体的渗流过程,流体渗流、土体变形相互耦合并产生对应的响应结果。因此在数值模拟过程中引入流固耦合的概念,充分考虑流体与固体的耦合作用,能够使得数值模拟结果更加可靠。

本文使用数值模拟软件 FLAC 3D,基于全流固耦合模式进行数值模拟计算,在每个计算步中对力学模块与流体模块相互作用并响应,通过设

置孔压模拟注浆对地层的作用,更加符合实际工程中的真实注浆过程。该方法将盾构施工过程进行细分,并充分考虑盾尾间隙及注浆临空的时间,在数值模拟过程中不仅能得到盾构施工过程中的土体变形,还能得到渗流场的响应过程。

## 1 基于流固耦合的数值模拟方法

为验证数值模型的可靠性,本文以上海地铁四号线隧道施工过程为例,对实际工程进行模拟。本文采用 HS-Small 本构模型描述土体的应力应变行为。HS-Small 模型是文献[15]在 HS 模型的理论基础上进行适当的修正后提出的,通过引入土体初始剪切刚度及剪切应变水平这 2 个小应变参数来描述土体的刚度衰减特性,以进一步考虑土体小应变刚度。目前,多数研究表明该模型与其他模型相比,在分析岩土工程问题方面具有显著的优势。

### 1.1 数值模型

数值模型的深度 50 m,横向距离 120 m,沿隧道方向为单位厚度,如图 1 所示,图 1 中红色圈部分为隧道所在位置,隧道的半径为 3.17 m、埋深为 20.0 m,地下水位假定位于地表。盾构产生的盾尾间隙大小为 0.07 m。该隧道的详细信息和相关岩土勘察信息可参考文献[16]。

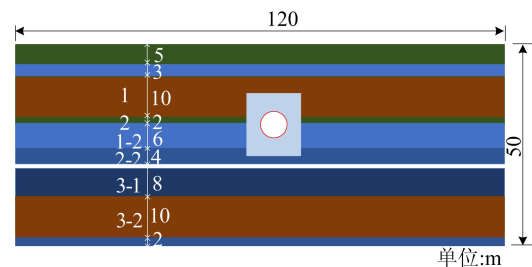


图 1 上海地铁四号线隧道有限元模型

### 1.2 参数取值

从图 1 可以看出,该隧道直径较大,穿过多个不同土层,图 1 中描述了各土层顺序和相应的厚度。HS 本构模型中包括了 3 个土体模量,即参考割线模量  $E_{50}^{ref}$ 、切线模量  $E_{ocd}^{ref}$  和卸载再加载模量  $E_{ur}^{ref}$ 。相比于 HS 本构模型,文献[15]通过引入 2 个小应变参数以进一步考虑土体的小应变特性,参考初始剪切模量  $G_0^{ref}$ ,当割线剪切模量衰减到初始剪切模量  $G_0$  的 72.2% 时对应的剪应变  $\gamma_{0.7}$ 。各土层的土体详细物理力学参数见表 1 所列。

表 1 土层相关参数

土层序号 及名称	$\gamma/$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$c/$ kPa	$\varphi/$ ( $^\circ$ )	$e$	$E_{50}^{\text{ref}}/$ MPa	$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}/$ MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/$ MPa	$G_0^{\text{ref}}/$ MPa	$\gamma_{0.7}/$ $10^{-4}$	$m$	$R_t$	$k/$ ( $10^{-7} \text{ cm/s}$ )
粉质黏土	13.8	10	27	0.95	8.79	7.16	50.142	200.57	2.7	0.8	0.9	5.31
淤泥粉土夹黏粉土	12.4	10	25	1.16	6.96	5.80	40.620	162.48	2.7	0.8	0.6	6.11
1 淤泥质黏土	11.2	6	24	1.41	7.08	5.79	40.555	162.21	2.7	0.8	0.6	2.43
2 黏土	14.1	4	30	0.88	9.23	7.69	53.836	215.34	2.7	0.8	0.9	8.95
1-2 黏粉土夹粉黏土	13.4	5	28	1.01	7.05	5.88	41.156	126.63	2.7	0.8	0.9	8.95
2-2 粉质黏土	13.3	2	30	0.99	7.16	5.97	41.790	167.16	2.7	0.8	0.9	3.13
3-1 粉质黏土	13.4	4	28	0.99	6.81	5.67	39.572	122.31	2.7	0.8	0.9	2.75
3-2 砂质粉土	13.8	5	30	0.66	6.98	5.82	40.739	125.35	2.7	0.8	0.9	1.60
粉细砂	15.3	1	30	0.73	13.3	13.3	53.231	266.15	2.7	0.5	0.9	7.13

### 1.3 边界条件

孔压的大小与实际盾构施工过程中的注浆压力相对应,以上覆土的质量为标准进行调整。在传统的数值模拟方法中,注浆压力的施加方法主要包括施加轴向荷载、施加膨胀应力、施加体应变。本文选用固定孔压的方式施加注浆压力,主要原因如下:注浆压力更偏向各向同性的孔隙水压力,并不是简单的施加轴向荷载;注浆压力的施加不仅影响应力场改变,更影响渗流场改变,故在流固耦合的状态下,通过施加固定孔压边界,能够很好模拟注浆对应力场和渗流场的影响。

## 2 数值模拟方法的验证

### 2.1 模拟工况

隧道开挖位置如图 1 红圈内部分,隧道半径和盾构产生的盾尾间隙大小均与文献[16]中的数据一致,分别为 3.17、0.07 m。施工工况示意图如图 2 所示。盾构隧道的施工过程模拟工况具体如下:

1) 隧道开挖前,此时整个模型已经在重力下完成地应力平衡,隧道即将开挖。

2) 隧道开挖完毕,此时隧道盾尾还未注浆完成,并且顶管管片还未支护完成,此时上覆土体将临空一段时间,这段时间称为临空时间。

3) 临空时间结束之后,盾尾间隙注浆填充完成,同时盾构管片完成安装,管片与盾尾间隙的内径重合,管片参数见表 1 所列。

4) 在管片的外围处红色范围施加注浆压力边界条件,图 2 中深灰色圆环为盾构管片,浅灰色部分为被浆液填充后的盾尾间隙。在盾构施工的过程中,盾构机开挖土体后,开始安装管片,盾尾间隙产生的同时盾尾开始注浆,浆液首先填充盾尾间隙、当间隙被填充完毕之后,在注浆压力的作用下,浆液发生扩散。管片的安装、盾尾间隙的产

生、注浆填充盾尾间隙这三者不会有很大的时间差距,故在本数值模拟中对该流程进行简化。

由图 2 可知,在隧道开挖之后,隧道和盾尾间隙范围内单元被全部删除,此时隧道上覆土体经历一定的临空时间,在临空结束之后,管片的安装和盾尾间隙的填充同时完成,即图 2c 中的深灰色圆环以及浅灰色圆环同时产生,此时浅灰色部分的“盾尾间隙”已经被浆液填充完全,并将该处单元的参数修改为浆液的相关参数。

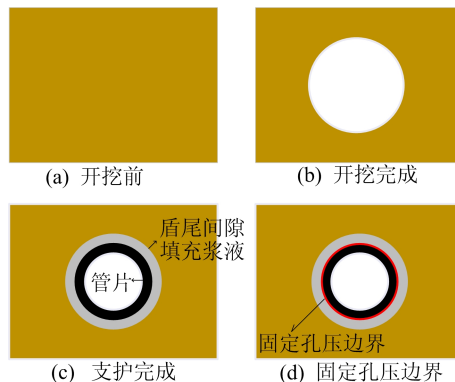


图 2 施工过程工况示意图

### 2.2 计算结果对比分析

通过文献[16]中的实际工程参数,建立盾构法隧道模型,得到地表沉降曲线如图 3 所示。

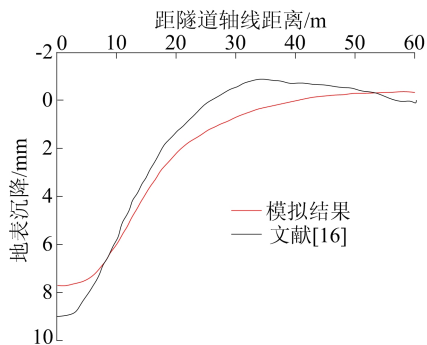


图 3 地表沉降曲线对比

从图 3 可以看出,本文模拟方法所得的地表沉降数据与文献[16]基本一致,验证了本文的盾构模拟模型以及浆液扩散模型的可靠性。综上所述,本文在考虑了全流固耦合的基础上,采用小应变本构模型对实际工程进行模拟,并通过对比实测数据验证了该模型的可靠性。

### 3 参数分析

#### 3.1 注浆压力

注浆压力作为注浆控制技术中最重要的参数之一,在很大程度上决定了注浆过程对周边环境的影响,注浆压力太小会出现注浆过程无法有效抬升地面、地表沉降过大的问题,注浆压力太大会导致隧道不稳定、土体扰动过大等问题。同时浆液在注浆压力的作用下填充间隙,注浆压力的大小也会影响注浆量的大小,注浆压力太小也会出现注浆困难、无法注浆等问题。故选择注浆压力作为参数分析的对象,选定上覆土重作用压力  $p_z$  为基本单位,研究注浆压力对环境的影响规律。

注浆压力为  $0.70p_z$ 、 $1.35p_z$  下的位移云图如图 4 所示。由图 4 可知,在不同的注浆压力下,周边环境的响应规律基本一致。上覆土体在重力作用下出现沉降,隧道下方土体由于卸荷而隆起,隧道周边土体均有向隧道中心位移的趋势。在较大注浆压力下,隧道周边土体向隧道中心的位移较小,说明注浆压力能够有效地抬升周边土体来抵抗卸荷产生的回弹作用。

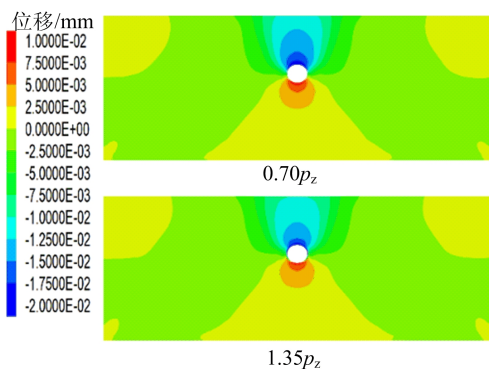


图 4 不同注浆压力下的竖向位移云图

为精确分析不同注浆压力下的竖向沉降,选定注浆压力为  $0.60p_z \sim 1.35p_z$ ,计算可得地表沉降及注浆压力-最大沉降值曲线如图 5 所示。

从图 5 可以看出,注浆压力在  $0.90 \sim 1.10$  倍上覆土重作用压力范围内对地表沉降的影响最为显著,注浆压力越大,地表最大沉降越小。考虑到注浆压力小于上覆土重作用压力时,容易出现注

浆困难、无法注浆等问题,故注浆压力应当增大,同时注浆压力大于  $1.10$  倍上覆土重作用压力后,注浆压力的增大对地表沉降的影响不大,因此,综合考虑实用和经济角度,应选用注浆压力为  $1.10$  倍上覆土重作用压力为最佳。

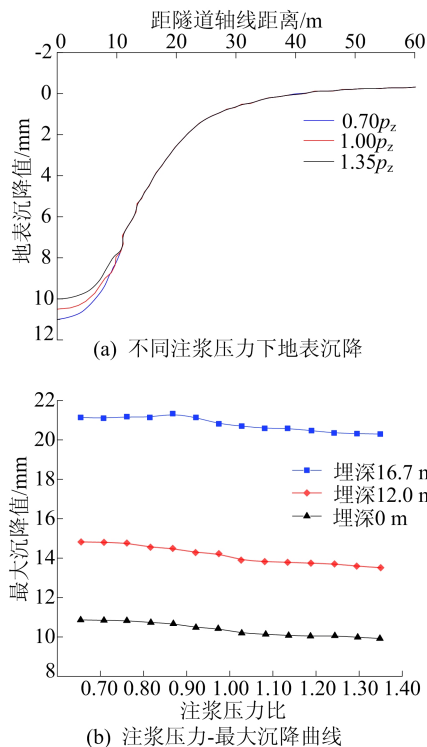


图 5 地表沉降及注浆压力-最大沉降值曲线

#### 3.2 临空时间

盾构法开挖隧道的壁后注浆方法从开始的环形注浆到同步注浆,主要目的是为减少隧道开挖后上覆土体的临空时间,但即使是同步注浆技术,也无法避免上覆土体有一定时间的临空状态。在数值模拟过程中,可通过调整隧道开挖至盾尾间隙注浆完成的这一段时间,用以模拟上覆土体的临空时间。对比无临空与临空 90 s 的竖向位移沉降云图如图 6 所示。

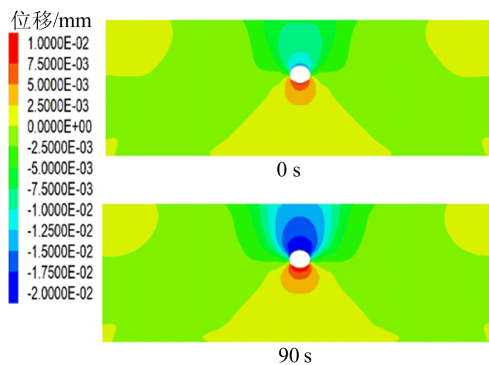


图 6 不同临空时间竖向位移云图

由图 6 可知,临空时间对竖向位移影响较大,无临空状态下隧道周边土体位移很小,而 90 s 的临空状态下隧道周边土体位移明显增大。

参照工程经验上,在其他参数相同的情况下,临空时间越短,地表的最大沉降将越小。为研究临空时间对地表最大沉降的影响,本文调整临空时间的取值范围为 0~90 s,结果如图 7 所示。

由图 7 可知,临空时间越长,地表最大沉降越大,且临空时间对地表沉降最大值的影响较为显著,曲线的最大值约为最小值的 2 倍。因此,在整个盾构施工过程中需保证注浆系统的完备性,以减少上覆土体的临空时间,在确保同步注浆与隧道开挖的同步性可有效控制地表沉降。

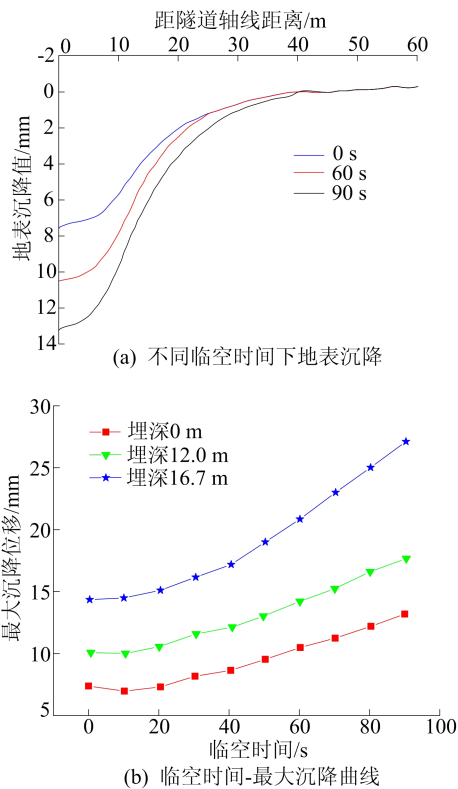


图 7 地表沉降及临空时间-最大沉降曲线

## 4 结 论

本文对影响地表沉降的注浆压力及临空时间进行分析,根据分析的结果可以得出以下结论:

1) 注浆压力增大能降低地表沉降,注浆压力越大地表最大沉降越小。在注浆压力小于 $1.10p_z$ 时,注浆压力对地表沉降的影响最为显著;注浆压力大于 $1.10p_z$ 时,注浆压力的增大对于地表沉降的影响并不显著。

2) 临空时间越长,地表最大沉降越大。临空时间内,隧道上覆土体在重力的作用下会产生竖向位移,应确保注浆与隧道开挖的同步性,以此有效控制地表沉降。

## [参 考 文 献]

- [1] 魏纲,赵得乾麟,黄睿. 盾构施工对邻近隧道影响的模型试验研究综述[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(5): 1-8.
- [2] 傅浩,胡可,闫瑾. 盾构维保技术的综述[J]. 工程机械文摘, 2021(5): 33-34.
- [3] 张社荣,郭紫薇,曹克磊,等. 基于盾构隧道施工力学特性的注浆加固方案比较分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(9): 147-152.
- [4] 董宏振. 盾构同步注浆对地表和隧道周围土体影响研究[J]. 山西建筑, 2023, 49(21): 151-154, 167.
- [5] 颜静,王飞,付春青,等. 地铁盾构隧道同步注浆地表沉降控制效果影响因素的现场试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(10): 48-53.
- [6] 郑爽,刘超,朱德霖,等. 大直径盾构掘进非对称同步注浆地层扰动规律研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(2): 168-177.
- [7] 罗志刚. 砂卵石地层盾构隧道同步注浆机理模型试验研究[D]. 广州: 广州大学, 2023.
- [8] 尤玉云. 盾构隧道同步注浆施工引起的地层变形分析[D]. 杭州: 浙江科技学院, 2018.
- [9] 雷华阳,仇王维,吕乾乾,等. 盾构施工中注浆因素对地表沉降的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(5): 1303-1309.
- [10] 肖明清,龚彦峰,周坤,等. 基于地层损失的复合地层盾构隧道施工沉降研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(8): 113-117, 174.
- [11] 李培楠,英旭,石来,等. 基于 CFD 的盾构同步注浆填充扩散运动力学分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增刊 1): 126-132.
- [12] 李文广,王东武,张晨光,等. 黏度时变双液浆盾构壁后注浆过程数值模拟研究[J]. 浙江工业大学学报, 2022, 50(4): 420-427.
- [13] 林志宇,路开道,王先明,等. 盾构隧道同步注浆充填率对地表沉降影响分析[J]. 四川建筑, 2020, 40(1): 140-142.
- [14] 张雪辉,陈吉祥,白云,等. 类矩形土压平衡盾构施工引起的地表变形[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(2): 317-324.
- [15] THOMAS B, SCHWAB R, VERMEER P. Small-strain stiffness in geotechnical analyses[J]. Bautechnik, 2009, 86(Suppl 1): 16-27.
- [16] 张海波. 地铁隧道盾构法施工对周围环境影响的数值模拟[D]. 南京: 河海大学, 2005.

(责任编辑 吴 亮)