

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.06.043

# 隧道全断面超前注浆对地层扰动特性研究

黄跃廷,王崇华,汪慧,王庆满

(机械工业勘察设计研究院有限公司,陕西 西安 710073)

**摘要:**超前注浆方法在隧道施工中具有广泛的应用,其效果受水文地质条件和施工工艺等因素影响。不当注浆会导致地层产生局部隆起,从而对隧道安全运营产生不利影响。该文依托深圳某地铁暗挖隧道施工案例,采用离散元法探究了隧道全断面预注浆对地层的扰动机制。由于隧道全断面超前注浆属于流固耦合问题,因此该文采用管一域模型模拟注浆过程。其中,管道用于连接各流体域,而流体域则用于存储流体压力、流量等信息。计算结果表明:在注浆过程中,浆液会在地层中产生渗透和劈裂作用,在两者共同作用下,地层扰动可以大致分为渗透填充、快速隆起、匀速隆起和缓慢隆起4个阶段。其中,劈裂作用会导致地层快速隆起,其发生条件为注浆压力大于地层最小主应力。因此,预防地层隆起的关键是控制注浆压力小于地层的的最小主应力,该结论与施工过程中观察到的现象一致。

**关键词:**隧道工程;超前注浆;劈裂注浆;地层隆起

**中图分类号:**U455

**文献标志码:**A

## 0 引言

隧道超前注浆方法具有技术成熟、造价低和施工速度快等优点,被广泛应用于城市地铁隧道的地层加固中<sup>[1-2]</sup>。注浆效果与地层水文地质条件、注浆材料和施工工艺等因素有关。在注浆过程中,浆体在土层中会产生渗透和劈裂作用,导致地层发生隆起变形。如:青岛地铁3号线泉李区间在采用超前深孔注浆施工后引起地表隆起达44.9 mm<sup>[3]</sup>;深圳地铁7号线安托山停车场出入线下穿深圳北环大道工程中也观察到16.64 mm的地表隆起<sup>[4]</sup>。深入探究隧道全断面超前注浆过程中浆液和土体之间的相互作用机理,对于控制土层隆起量并保证施工质量具有重要的意义。

众多学者通过理论计算、室内和现场试验以及数值模拟手段探究了注浆的影响。相较于前两者研究方法,数值模拟手段具有经济、便捷且易于探究浆液在地层中扩散过程的优势。目前注浆相关的数值模拟主要集中在注浆对地层的宏观扰动和浆液在地层中的细观扩散特性方面。宏观扰动方面,众多学者将注浆区域等效为注浆单元,并对注浆单元赋予

膨胀力、速度和位移来模拟注浆的宏观效果<sup>[5-8]</sup>。这种方法为研究注浆引起的地层抬升和上部建筑物变形提供了便利,缺点是忽略了浆液在地层中的流动过程;另一方面,越来越多的学者研究浆液在地层中的扩散特性,如:注浆的类型、浆脉的形状、注浆量和注浆压力的发展等<sup>[9-13]</sup>。这种方法便于揭示浆液的细观流动特性,缺点是难以扩展到工程量级。

本文依托某地铁暗挖工程,该工程在注浆过程中地表隆起超过50 cm。基于离散元方法,模拟隧道全断面预注浆过程,并建立浆液在地层中的流动性与其引起的地层扰动之间的联系,讨论注浆对地层的扰动机制,可为类似工程提供借鉴。

## 1 工程背景

深圳某地铁暗挖隧道轮廓为马蹄形,毛断面大小7.06 m×7.615 m,拱顶埋深为19~20 m,采用暗挖法施工,施工工法为环形开挖预留核心土法。图1为隧址区的地质剖面图,可以看到:隧道主要于粗砂、砂卵石和强风化花岗岩地层掘进。其中粗砂和砂卵石地层较为松散,因此在隧道掘进前采用超前注浆进行加固处理。

收稿日期:2022-10-22

作者简介:黄跃廷,男,大学本科,高级工程师.E-mail:huangyueyan2021@163.com

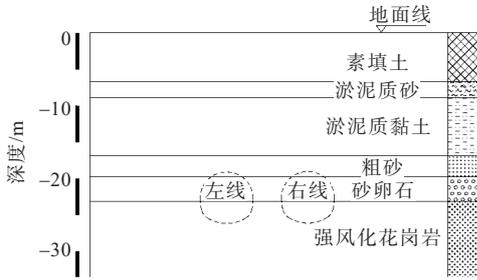
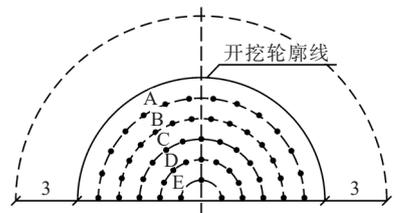


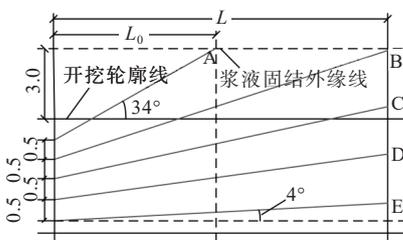
图 1 地质剖面图

砂卵石地层大量分布于隧道的上台阶,是注浆加固的重点,因此对现场砂卵石取样,并进行了一系列室内试验,如扁平度统计、矿物成分测试、粒径分析、抗剪强度测试等。现场砂卵石地层的性质总结为:①砂卵石土样级配良好,粗颗粒间被细粒充填较为充分,易被压实;②大于 $0.075\text{ mm}$ 的颗粒成分主要为石英,而小于 $0.075\text{ mm}$ 的颗粒,高岭石和方解石的含量明显增多,这是典型的黏土矿物,这可能会使砂卵石地层有微弱的黏聚力;③根据三轴试验结果,砂卵石地层的黏聚力和内摩擦角分别为 $34.6\text{ kPa}$ 和 $25.2^\circ$ 。

注浆孔主要分布于隧道上台阶,如图2(a)所示。注浆孔按照半圆布置,由外向内布孔,环向间距为 $50\text{ cm}$ ,设计加固范围为掌子面以外 $3\text{ m}$ 。注浆孔在隧道掘进方向按照图2(b)分布,注浆杆与水平方向夹角为 $4^\circ\sim 34^\circ$ ,以保证浆液在地层中均匀扩散。注浆纵向加固长度 $L$ 为 $16\sim 20\text{ m}$ ,不同循环注浆有所不同且 $L_0=L/2$ 。采用风钻钻孔至设计位置后进行



(a) 注浆孔分布图



(b) 注浆管沿隧道掘进方向分布图

图 2 注浆布孔平面和剖面图(单位:m)

后退注浆,边注边退,注浆终压控制为 $2.0\text{ MPa}$ ;注浆材料主要为普通硅酸盐水泥单液浆和普通水泥-水玻璃双液浆,单液浆配比为 $W:C=(0.6\sim 0.8):1$ ;普通水泥-水玻璃双液浆配比为 $W:C=(0.8\sim 1):1$ , $C:S=1:1$ 。

根据现场监测资料,注浆期间,隧道上方地表出现明显隆起,地表最大隆起数值超过 $50\text{ cm}$ 。同时,掌子上方的砂卵石地层揭露大量沿水平方向延伸的注浆浆脉,如图3所示,由此可以认为该区域发生劈裂注浆,并对地层隆起有重要影响。



图 3 掌子面揭露大量浆脉

## 2 离散元模型的建立

注浆是一项隐蔽工程,实时监测到注浆参数及其在地层中的扩散过程是十分困难的。在这方面数值模拟手段具有先天的优势。于是采用颗粒流分析程序(PFC<sup>2D</sup>)探究浆液在地层中的扩散过程及其对地层扰动的影晌。

流固耦合计算是模拟的重点,采用PFC<sup>2D</sup>软件中的“管-域模型”开展流固耦合计算,如图4所示。图中灰色颗粒为土颗粒,粗线条为颗粒接触,颗粒接触围成的封闭多边形即为“流体域”,黑色实点为流体域中心,流体域可以用于存储流体压力、流量等信息。连接“流体域”中心的蓝色线条为流体流通管道,即“管”。

流固耦合计算的实现过程为:①在输入端(特定范围内的“流体域”)施加流体压力,因此不同“流体域”之间存在着压差;②在流体压力的驱使下,流体开始通过具有一定长度 $L$ 和宽度 $a$ 的“管”向压力小的“流体域”流动;③流体域流量发生变动,进而会导致该“流体域”的流体压力存在变化,该“流体域”压力会通过一定的形式施加到“流体域”周围的颗粒,进而实现流固耦合过程。

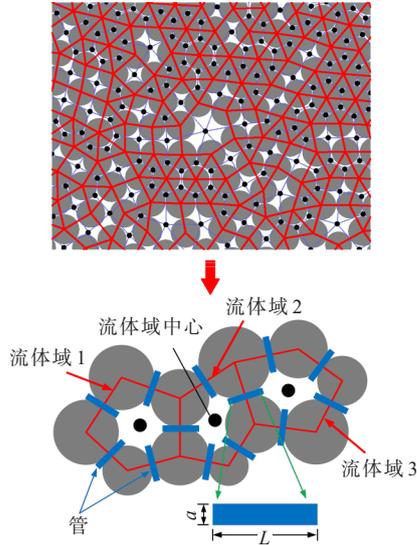


图4 “管-域”模型示意图

在流固耦合计算中,流量压力方程尤为关键。流量方程用于计算每一时步流体域的注浆量,压力方程用于计算“流体域”内的压力变化,并将其等效成对其周围颗粒产生“推移力”。流量方程和压力方程如式(1)和(2)所示:

$$q = Ka^3 \frac{(p_2 - p_1)}{L} \quad (1)$$

$$\Delta p = \frac{K_f}{V_d} (\sum q \Delta t - \Delta V_d) \quad (2)$$

式中: $K$ 为流体的传导系数, $L$ 根据相邻流体域中心的间距计算得到, $p_2 - p_1$ 为相邻两个“流体域”的压力差,正值使得流体从“流体域2”中流向“流体域1”。 $K_f$ 为流体的体积模量, $V_d$ 为“流体域”的表观体积。

图5给出了离散元注浆模型。相较于粗砂和砂卵石地层,淤泥质黏土和强风化花岗岩地层的渗透系数几乎可以忽略不计,这意味着浆液在竖直方向仅在粗砂和砂卵石地层扩散。此外,图5所示旋喷桩为前期降水施工时施作,为人工止水帷幕,同时也切断了浆液在水平方向的流动通道。因此,实际注浆范围不超过图5中红色区域。

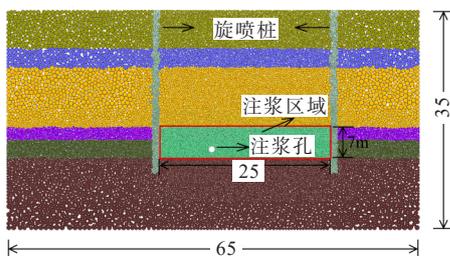


图5 离散元注浆模型(单位:m)

### 3 数值模拟结果

#### 3.1 浆液在地层中的扩散特性

图6给出了浆液在地层中的扩散过程,图中,坐标(0,0)点为注浆孔位置。发现在注浆过程中,浆液一方面在较大注浆压力下在地层中劈开裂缝;另一方面,在压力差的驱使下在地层中均匀渗透,即劈裂注浆和渗透注浆同时发生。劈裂注浆主要发生在新开展的裂缝尖端,而渗透注浆则主要发生在其他区域,尤其是已开展裂缝的两侧。

(1) 注浆开始时(计算<200步),浆液以注浆口为中心,向四周地层均匀扩散,此时注浆以渗透为主。

(2) 随着时间增加,浆液在注浆口两侧劈裂开水平裂缝,且裂缝两侧颗粒间距不断增加,浆液流通通道变宽,从而大量灌入裂缝,裂缝在注浆压力的作用下迅速蔓延(200~1600步)。

(3) 裂缝在水平方向上开展并对裂缝两侧地层施加挤压,使得地层竖向应力不断增加,从而使浆液在水平方向上的开展变得困难,于是其他方向的衍生裂缝开始出现,方向大多为斜向上(或向下),其形状类似于河流的支流(1600~6000步之后)。

(4) 当计算至6000步时,注浆口左侧浆液已经扩散至旋喷桩位置,浆液水平通道被堵塞,因此左侧水平裂缝不再扩展。注浆口左侧浆液水平扩散受阻后,其扩散形态发生转变,浆液扩散方式变为以渗透扩散为主,而右侧旋喷桩距离注浆口较远,裂缝仍继续开展(6000~10000步)。在竖直方向上,浆液以渗流为主,但由于地层间渗透系数差异较大,渗流主要发生在砂卵石和粗砂地层。

#### 3.2 注浆对地层的扰动特性

为研究注浆对地层的扰动,设置了5条位移监测线(L5~L1),分别位于地表下0、-5m、-10m、-15m和-20m,用于监测注浆对地层隆起的影响,注浆结束后地层不同深度处的地层隆起如图7所示。

受注浆的影响,地层不同深度位置均出现较为明显的隆起,埋深位置越大,隆起数值越大,L5测线隆起最大值仅为L1测线的27.2%。这是因为注浆对地层的扰动是一个渐进的过程。与隧道开挖引起地层损失类似,注浆对地层及其上部建筑的扰动过程可简述为:注浆→洞周初始应力改变→地层变形向

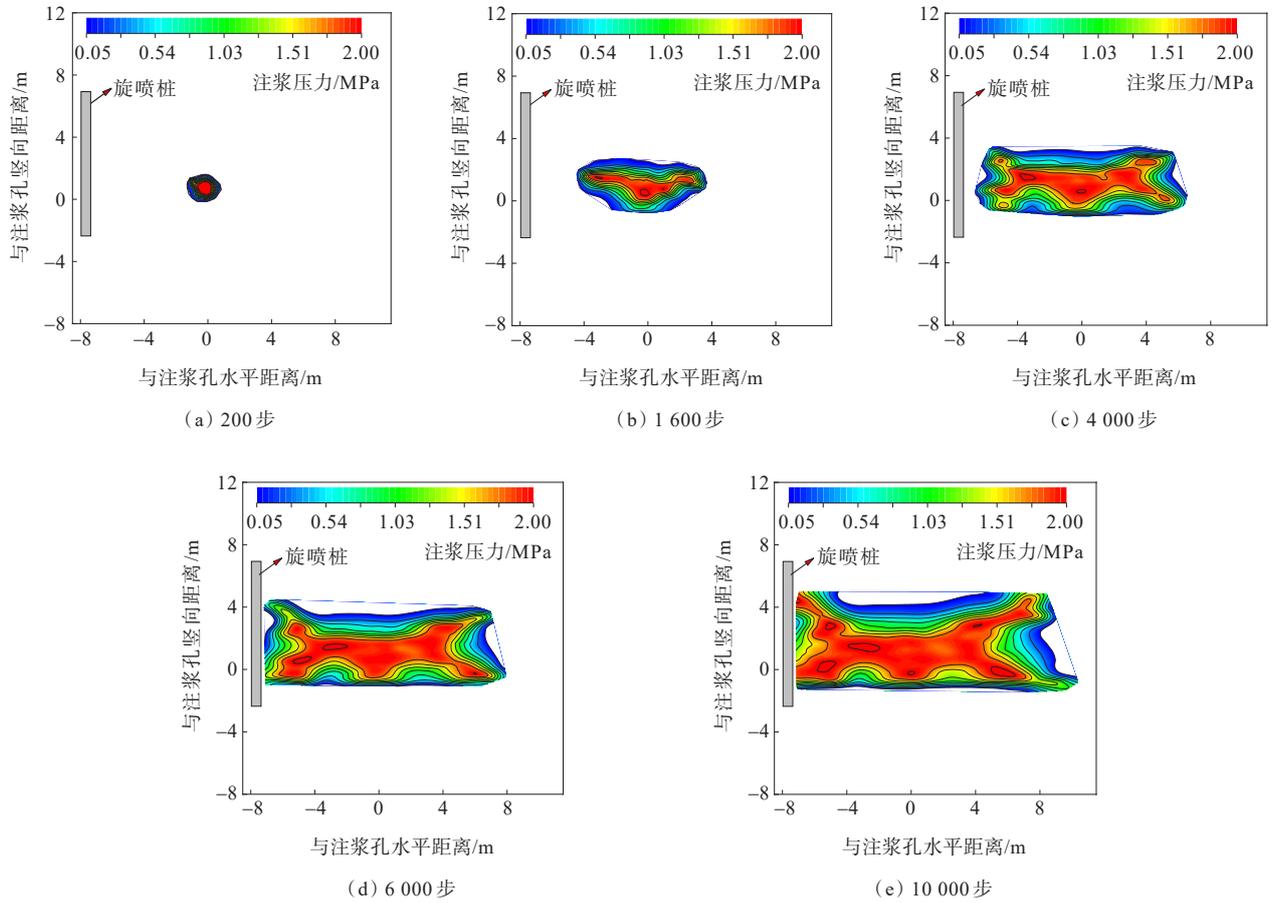


图6 浆液在地层中的扩散过程

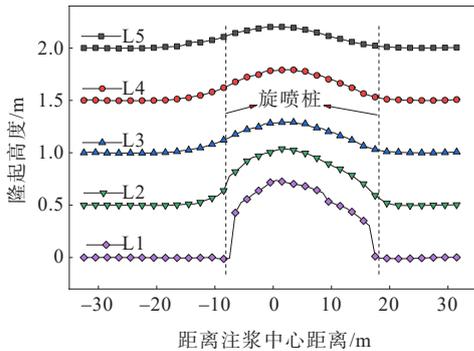


图7 注浆结束时的地层隆起

外传递→作用于地表建筑物基础及上部结构。因此接近地表的土层位移滞后于注浆口附近的土层位移。

此外,竖向旋喷桩的施作对地层隆起范围影响显著。从图7可以看出:隆起较大的位置被限制在两侧旋喷桩内部。这是因为两侧旋喷桩的存在使得浆液水平流通通道受阻,浆液的水平流动范围被约束在两侧旋喷桩内部,因此旋喷桩以外位置的土层几乎没有受到影响。

为建立浆液的细观流动特性和地层宏观变形之间的联系,选取L1~L5测线中位于注浆口正上方测

点,将这些测点的隆起数值和注浆速率进行对比,如图8所示。

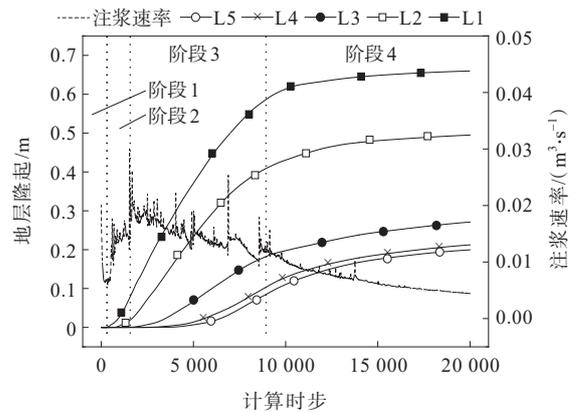


图8 地层隆起与注浆速率对比曲线

由图8可以看到:随着注浆时间的推进,注浆速率的发展大致可划分为4个阶段,每个阶段对地层隆起的影响各有不同:①在阶段1,注浆以渗透为主,注浆速率快速降低,此时注浆对地层的扰动较小,测点几乎没有隆起;②在阶段2,注浆以劈裂为主,注浆速率迅速增大,该阶段为地层快速隆起阶段;③在阶段

3,劈裂导致的注浆速率增大与渗透导致的减小同时发生,劈裂注浆占据一定优势但并未完全主导。在这一阶段,注浆速率保持在一个较大值,因此地层也保持在一个较大数值快速隆起;④在阶段4,渗透注浆占据主导地位,注浆速率迅速降低,地层隆起速度逐渐减慢最终趋于稳定。

#### 4 隧道预注浆对地层扰动机制的讨论

本文模拟中,浆液在较大的注浆压力的驱动下,在地层中扩散同时有渗透和劈裂两种形式,两种扩散形式的注浆对注浆速率的影响是对立的。在二者共同影响下,隧道全断面注浆对砂卵石地层的扰动可分为渗透填充、快速隆起、匀速隆起和缓慢隆起4个阶段。

本案例浆液对地层的扰动阶段与文献[14]提出的浆液在地层按照分鼓泡压密、劈裂流动和被动土压力3阶段流动形式存在较大区别,主要体现在两点:①文献[14]提出的浆液在软土地层中首先以压密注浆为主,在注浆口形成浆泡挤压周围地层,而在砂卵石地层中,浆液首先以扩散为主,因为两种地层渗透性存在较大差别;②文献[14]认为浆液在地层中的劈裂方向首先为竖向,然后再为水平,因为地层在发生劈裂前最小主应力方向为竖向,在浆液竖向劈裂挤压地层后最小主应力方向转变为水平方向,随即出现水平劈裂。而本案例中浆液在地层中的劈裂先为水平方向,在水平方向上劈裂有足够长度后,浆液在地层中的劈裂方向才会开始出现偏移。这很有可能与隧道施工前期在两侧施作竖向旋喷桩有关,竖向旋喷桩引发的挤土效应改变了地层的初始应力状态,使得水平应力大于竖向应力,因此劈裂首先在水平方向上发生。

由图8可知:劈裂注浆发生后,地层快速隆起。因此,对于类似案例,控制注浆压力小于地层的最小主应力,避免劈裂注浆的发生是减小注浆对地层扰动的关键。

#### 5 结论

本文通过隧道全断面预注浆的离散元模拟,得到了浆液的扩散特点及其对地层的实时扰动过程,主要结论如下:

(1)浆液在地层中流动受到劈裂和渗透的双重影响,在二者共同作用下,地层隆起阶段式发展,表现为渗透填充、快速隆起、匀速隆起和缓慢隆起4个阶段。

(2)不同埋深的地层隆起形式相同但不同步,埋深较浅的地层相较于埋深较深的地层隆起具有滞后性。

(3)控制注浆压力小于地层的最小主应力,从而防止劈裂的发生是预防地层严重隆起的关键。

#### 参考文献:

- [1] 胡德华,段景川.上软下硬地层双线地铁隧道下穿既有城市道路地层变形规律研究[J].防灾减灾工程学报,2017,37(6):910-915.
- [2] 吴旦,皮圣,荆永波,等.超前小导管支护快速进洞技术在软弱围岩隧道工程中的应用[J].中外公路,2021,41(1):186-189.
- [3] 王迪,徐涛.富水流砂区间隧道注浆加固技术研究[J].公路,2017,62(1):246-250.
- [4] 王杰,杜嘉鸿.岩土注浆技术的理论探讨[J].长江科学院院报,2000,17(6):82-86.
- [5] KOMIYA K, SOGA K, AKAGI H, et al. Soil consolidation associated with grouting during shield tunnelling in soft clayey ground[J]. Géotechnique, 2001, 51(10):835-846.
- [6] NICOLINI E, NOVA R. Modelling of a tunnel excavation in a non-cohesive soil improved with cement mix injections[J]. Computers and Geotechnics, 2000, 27(4):249-272.
- [7] ZHANG M, WANG X H, WANG Y. Mechanism of grout bulb expansion and its effect on ground uplifting[J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18(3):874-880.
- [8] ZHANG M, WANG X H, WANG Y. Numerical evaluation of uplifting effect for upper structure by grouting[J]. Journal of Central South University of Technology, 2012, 19(2):553-561.
- [9] 唐智伟,赵成刚.注浆抬升地层的机制、解析解及数值模拟分析[J].岩土力学,2008,29(6):1512-1516.
- [10] 孙锋,张顶立,王臣,等.劈裂注浆抬升既有管道效果分析及工程应用[J].岩土力学,2010,31(3):932-938.
- [11] 王起才,张戎令.劈裂注浆浆液走势与不同压力下土体位移试验研究[J].铁道学报,2011,33(12):107-111.
- [12] 张忠苗,邹健.桩底劈裂注浆扩散半径和注浆压力研究[J].岩土工程学报,2008,30(2):181-184.
- [13] 李鹏,张庆松,张霄,等.基于模型试验的劈裂注浆机制分析[J].岩土力学,2014,35(11):3221-3230.
- [14] 白云,侯学渊.软土地基劈裂注浆加固的机理和应用[J].岩土工程学报,1991,13(2):89-93.