

DOI: 10.11779/CJGE20221422

侧部注浆对已建盾构隧道受荷变形影响试验研究

黄大维^{1,2}, 赵栳錡^{1,2}, 徐长节^{*1,2}, 罗文俊^{1,2}, 耿大新^{1,2}, 石钰锋^{1,2}

(1. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学江西省防灾减灾及应急管理重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: 采用侧部注浆法整治盾构隧道横椭圆变形超限过程中, 盾构隧道周围附加土压力及隧道变形特性暂不明确。通过几何相似比为 1 : 10 的缩尺寸模型试验开展了侧部注浆对已建盾构隧道的影响试验研究, 试验结果分析表明: 在注浆挤压作用下, 将导致隧道周围的土压力在注浆点处局部增大, 两边有一定程度的减小, 产生了明显的水平被动土拱现象; 在注浆附加荷载影响下, 模型盾构隧道在注浆点附近发生了竖椭圆变形, 而在离注浆点较远处则发生了横椭圆变形, 且隧道发生了反弯现象; 注浆过程中发生了“渗透→挤密→劈裂”扩散模式与“挤密→劈裂→渗透”扩散模式, 并阐明了两种浆液扩散模式的扩散机制: 隧道外壁附加荷载主要由浆液通过渗透扩散与劈裂扩散的浆液压力所形成, 同时浆液挤压土体变形对隧道周围的浆液也将形成一定的挤压荷载。

关键词: 盾构隧道; 侧部注浆; 隧道纠偏; 模型试验; 被动土拱

中图分类号: U451

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)03-0510-09

作者简介: 黄大维(1984—), 男, 湖南郴州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地下铁道与岩土工程相关的研究工作。E-mail: gddthdw@126.com。

Experimental study on influences of side grouting on deformation of shield tunnels under loads

HUANG Dawei^{1,2}, ZHAO Zhiqi^{1,2}, XU Changjie^{1,2}, LUO Wenjun^{1,2}, GENG Daxin^{1,2}, SHI Yufeng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Disaster Prevention-mitigation and Emergency Management, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: When the lateral grouting method is used to control the transverse elliptic deformation of a shield tunnel, the additional earth pressure around the shield tunnel and the deformation characteristics of the tunnel are not clear. The effects of side grouting on the existing shield tunnel are studied through the shrinkage model tests with the geometric similarity ratio of 1 : 10. The test results show that under the action of grouting extrusion, when the soil pressure around the tunnel increases locally at the grouting point, both sides decrease to a certain extent, resulting in an obvious horizontal passive soil arching phenomenon. Under the influences of additional grouting loads, the vertical elliptic deformation occurs near the grouting point, while the transverse elliptic deformation occurs farther away from the grouting point, and the tunnel has reverse bending phenomenon. In the process of grouting, the diffusion mode of "penetration→compaction→splitting" and the diffusion mode of "compaction→splitting→penetration" occur, and the diffusion mechanism of the two grouting diffusion modes is clarified. The additional loads on the outer wall of the tunnel are mainly formed by the grouting pressure through osmotic diffusion and splitting diffusion. Meanwhile, the grout compresses the soil deformation of the grout to a certain extent on the grout around the tunnel.

Key words: shield tunnel; side grouting; correction of tunnel; model test; passive earth arching

0 引言

地铁建成将带动沿线开发建设, 因此区间盾构隧道不可避免地受到紧邻工程活动的影响, 如基坑开挖、桩基施工、地表堆载、隧道下部或上部新建地铁线路等, 由此使隧道周围土压力发生变化, 进而诱发盾构隧道横断面变形与纵向挠曲变形, 并极易导致接头破

损与渗漏水等结构病害^[1-5]。盾构隧道过程变形将严重危及行车安全, 因此如何有效地预防和治理这些病害尤为重要。在盾构隧道横断面变形超限整治方面, 现

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378398, 52078213, 52238009);

江西省主要学科科学技术带头人领军人才项目(20232BCJ22009)

收稿日期: 2022-11-17

*通信作者(E-mail: xucj@zju.edu.cn)

在普遍采用在隧道内部加钢片环或者是在管片内部贴芳纶纤维等措施,但内部加钢片环所需要的费用非常高,加一个钢环的费用就至少30万元;而在管片内贴芳纶纤维,其作用仅仅是对管片内侧受拉开裂有效果,而对隧道的整体刚度增加并没有作用。且这两种方法均不能使隧道周围的不利荷载模式得以改善,也无法使管片接头应力减小,且加固后需盾构隧道进一步发生不利的横断面变形才可使加固发挥效果。

盾构隧道变形恢复注浆理论研究主要集中在数值仿真分析与室内模型试验。在数值仿真方面,张继鹏通过对“注浆单元”施加体应变来模拟注浆,对宁波某区间盾构隧道注浆抬升进行了研究,分析了注浆位置与顺序对隧道内力与变形的影响。张冬梅等^[6]采用土体体积应变模拟隧道注浆,分析了隧道侧向注浆对隧道横向变形的影响规律。高翔等^[7]在数值仿真模拟时认为浆液不渗入周围土体,分析了注浆管打设角度、注浆压力、注浆范围对隧道竖向抬升影响规律。郑刚等^[8]以某深大基坑施工对天津地铁三号线影响进行了注浆主动控制研究,用体应变法仿真模拟注浆,分析了变形控制方法以及提出注浆优化方案。在数值仿真研究盾构隧道变形恢复注浆时,通过施加体应变或虚加膨胀力模拟注浆,而体应变或虚加膨胀力均无依据,也未考虑注浆材料在地层中的扩散形式对地层附加土压力大小的影响;将变形恢复注浆整个过程简化为一个分析步骤,因此无法定量分析不同浆液扩散形式及发展过程对盾构隧道的受荷变形影响;在仿真分析注浆对隧道结构变形影响上,未分析隧道受到的附加荷载形式与分布规律。

在模型试验方面,宫全美团队设计了隧道抬升过程土体位移与变形的透明土小型模型试验,在透明土中采用直径为20 mm的钢管模拟盾构隧道,向上拉起钢管过程通过上覆土的剪切滑移特征提出了极限上覆土压力计算方法,成果对注浆抬升有一定参考作用,但未涉及地层注浆模拟、注浆附加荷载、隧道受荷变形等问题研究^[9-10]。朱旻等^[11]通过向预埋扁平水袋注水(宽600 mm,高300 mm),模拟注浆对模型隧道(直径为200 mm PC塑料管)的影响,模型试验完全不考虑浆液扩散形式与影响因素对地层附加土压力形成的影响。付艳斌等^[12]假设注浆为圆形挤压注浆,不考虑浆液性能及土体变形的时效性,从平面应变角度分析注浆引起的隧道附加抬升力。在模型试验与理论分析过程中并未考虑浆液扩散形式对地层附加土压力与隧道附加荷载形成的影响,也未研究变形恢复过程中盾构隧道的纵、横向变形影响,成果难以用于指导盾构隧道变形恢复注浆方案设计与影响评估。

综上所述,现有研究并未阐明侧部注浆对盾构隧道周围土压力的影响,以及由此导致的隧道变形特性。为

此,本文通过设计几何相似比为1:10模型试验,开展了盾构隧道侧部注浆试验研究,对注浆导致的隧道受荷变形测试结果进行了分析,并对浆液扩散进行了取样分析。研究成果对盾构隧道注浆纠偏具有一定的指导意义。

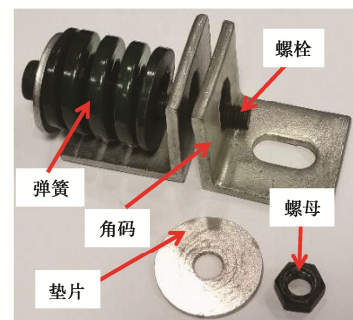
1 试验介绍

1.1 模型盾构隧道简介

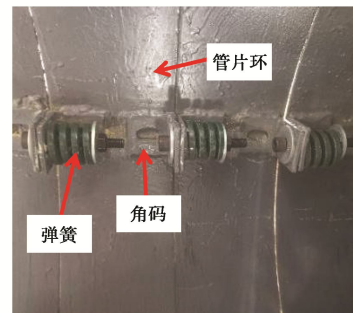
模型试验所用的模型盾构隧道几何相似比1:10(模型结构几何尺寸与原型结构几何尺寸之比),试验所用模型盾构隧道管片环采用均质圆环,用厚度为4.6 mm的钢板加工而成,其外径为575 mm,内径为570.4 mm,幅宽为120 mm(如图1(a)所示),其相似设计在参考文献[13]中进行了详细说明。管片内侧每隔90度焊接一个角码,再采用长度为9 cm、直径为1 cm的螺栓将两相邻管片环之间角码进行连接。为使环缝连接螺栓具有一定的拉伸弹性,在螺栓内垫入直径与长度均为4 cm弹簧,其压缩刚度为745 N/mm,管片环之间的连接如图1(b),(c)所示。



(a) 模型管片环



(b) 环缝连接方式



(c) 模型隧道内部

图1 模型盾构隧道管片环连接

Fig. 1 Connection of segment ring of model shield tunnel

采用简支梁法对模型盾构隧道的纵向刚度进行

了测试，如图 2 所示，纵向刚度测试的模型盾构隧道采用 27 环管片环拼接而成，总长度为 324 cm。两端支点支撑在两片管片环的中间位置，因此两支点的距离为 312 cm。在模型隧道中部进行逐级加载，每次加载 10 kg，直到加载总重为 50 kg。在模型隧道底部安装 7 个位移计，用于量测模型隧道的竖向挠曲变形。不同加载时模型隧道的竖向挠曲变形结果如图 3 所示，从图 3 可以看出，在等量加载时最大挠曲变形增量并不是呈现线性增长，由此可见，在逐级加载过程中，模型盾构隧道总体表现为一定的非线性特性。以最大加载（50 kg）时对应的最大挠曲变形反算得到模型盾构隧道的纵向刚度 EI 为 17.1 kN/m^2 ，并以 EI 为 17.1 kN/m^2 时得到各级加载对应的挠曲曲线（反算得到的挠曲曲线为虚线），从图 3 可知，在加载小于 50 kg 时，反算得到的挠曲量稍大于实测挠曲量。



图 2 简支梁法纵向刚度测试

Fig. 2 Longitudinal stiffnesses measured by simply supported beam method

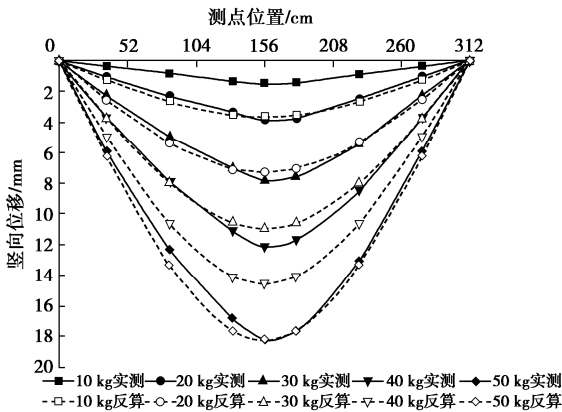


图 3 不同加载时模型隧道竖向挠曲变形

Fig. 3 Vertical deflections of model tunnel under different loading conditions

1.2 模型试验简介

本次试验所用土箱的长、宽、高分别为 4, 3, 3 m，采用方钢加工，四周镶嵌木板与有机玻璃板。本次试验所使用的填土有两种，分别为河砂与橡胶粒，两种填土的级配曲线如图 4 所示，主要物理力学参数如表 1 所示。从图 4 可以看出，约 90% 的橡胶粒粒径均分

布在 2~5 mm 范围，即为典型的均匀颗粒材料，经测定，橡胶粒的孔隙率为 37.1%，主要是在隧道周围模拟软土地层。试验时两种土分阶段填筑，每层填筑厚度约 20 cm，采用人工夯实。

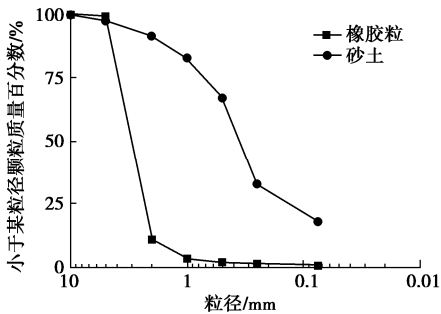


图 4 填土的级配曲线表

Fig. 4 Grain-size distribution curves of fill

表 1 填土参数

Table 1 Parameters of soil fill

参数	河砂	橡胶粒
填筑密度/(g·cm ⁻³)	1.093	0.617
压缩系数	0.617	1.612
压缩模量/MPa	0.617	1.333
抗剪强度/kPa	35.989	120.596
弹性模量/MPa	4.51	0.35
泊松比	0.40	0.45
重度/(kN·m ⁻³)	15.68	9.80
黏聚力/kPa	0	22
摩擦角/(°)	20	12

试验时对隧道周围的土压力及隧道的直径变形及挠曲变形进行了测量。所用的土压力盒为振弦式土压力盒，直径为 114 mm，厚度为 30 mm，量程为 300 kPa。土压力盒布置在隧道第 5, 9, 13, 16, 20, 24 环管片环的四周（上、下、左、右各一位），与管片环的净距约为 5 cm（因管片环表面为曲面，不宜直接布设土压力盒）。隧道断面变形与挠曲变形布设了 10 个断面，分别位于隧道第 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26, 29 环。土压力盒及隧道变形布设如图 5 与图 6 所示，其中隧道断面变形测量由两个测量尺构成，每个测量尺由两根部分重叠的钢尺加工而成，每根钢尺尺寸端部通过磁铁固定在隧道内壁上。通过两根部分重叠的钢尺相对位移读取隧道的相对变形；通过固定滑轨上的滑动小车的激光在钢尺上的刻度读取隧道的绝对变形。固定滑轨上的滑动小车安装有摄像头，通过拉动小车来读取测量尺上的刻度。首先通过光标读数，用试验后的光标读数减去初始的光标读数可以得到模型盾构隧道左侧和底部的内壁挠曲变形。

（1）竖直方向以向上为正，向下为负；直径增大为正，直径减小为负。计算公式为：①顶部内壁挠曲变形=底部内壁挠曲变形+竖向直径变化；②隧道竖向中心挠曲变形=顶部内壁挠曲变形+1/2 竖向直径变化。

(2) 水平方向以向左为正, 向右为负; 直径增大为正, 直径减小为负。计算公式为: ①右侧内壁挠曲变形=左侧内壁挠曲变形-水平直径变化; ②隧道中心水平挠曲变形=右侧内壁挠曲变形+1/2 水平直径变形。测量装置如图 6 (b) 所示。

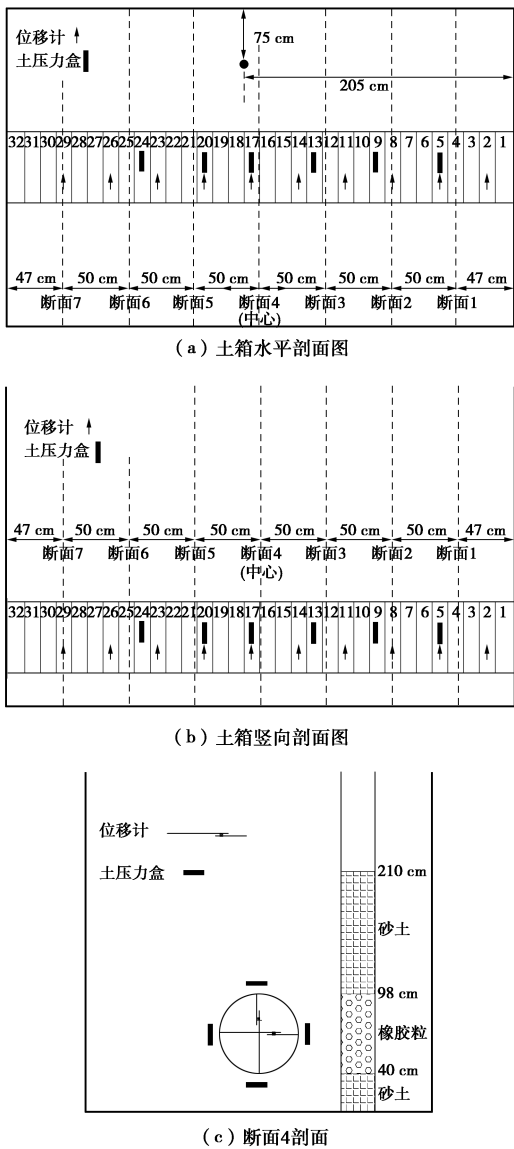


图 5 测量元件布置示意图
Fig. 5 Layout of measuring elements

1.3 注浆方案

将注浆点布置在隧道第 17 环和第 18 环之间, 距离隧道端部的纵向距离约为 205 cm, 距离土箱内壁约 75 cm 的位置 (图 5 (a)), 与隧道中心轴在同一高度, 距离隧道外壁约 45 cm。注浆管从土箱表面打入, 为了防止地层土体进入钢管内而影响注浆浆液流通, 在注浆管前端设置了可伸缩的铁锥结构, 如图 7 所示。在注浆管打到预定位置后, 再向上拔出约 4 cm, 以使铁锥结构伸出。注浆材料采用 56 kg 水泥、10 kg 膨润土、54 kg 水配制而成, 浆液的含水率为 81.82%。试验时每次注入约 40 kg 浆液 (试验所用注浆机如图 8

所示, 试验时无法进行注浆压力控制, 所采用等量注浆控制), 每次注浆约 3 min, 注浆时间间隔 30 min, 注入 3 次, 共 120 kg。

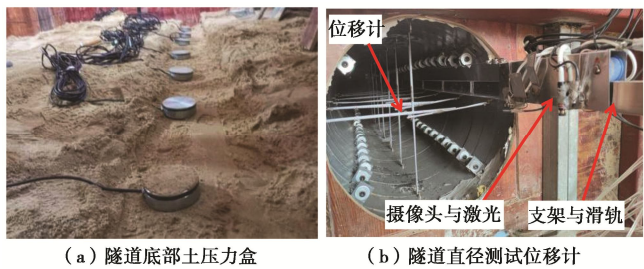


图 6 测试元件
Fig. 6 Elements of tests



图 7 注浆管
Fig. 7 Grouting pipe

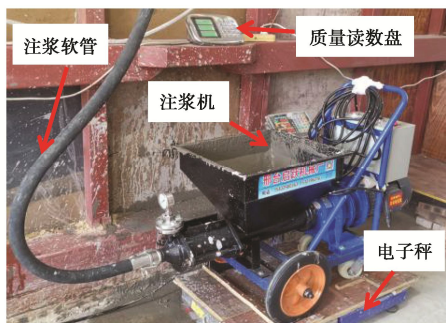


图 8 注浆机
Fig. 8 Slip casting machine

2 注浆导致的隧道附加土压力分析

图 9 为不同工况下隧道周围所受到的注浆附加土压力, 其中图 9 (a) 为注浆一侧隧道侧部的水平附加土压力, 从图中可看出, 离注浆点最近的土压力盒 (距离隧道端部 198 cm 位置) 的附加土压力最大, 三次近似等量注浆时, 第一次注浆导致的附加土压力最大, 约为 14 kPa, 而第二次注浆与第三次注浆导致的附加土压力增量分别为 6 kPa 与 4 kPa, 即相同注浆量时, 前期导致的附加土压力增量要大于后期导致的附加土压力增量。最大附加土压力位置在注浆完成后 12 h 时, 其附加土压力由约 24 kPa 降至约 12.5 kPa, 在注浆完成后 24 h 时, 其附加土压力降至约 11.5 kPa, 而在注浆完成 24 h 后注浆导致的附加土压力基本稳定。

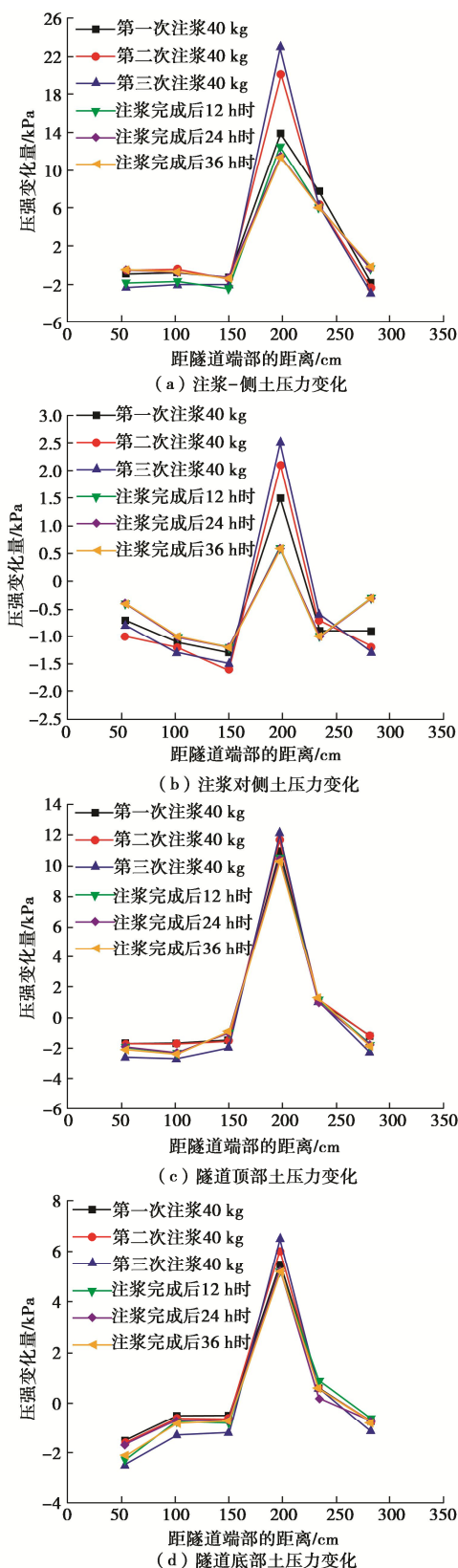


图9 侧部注浆导致的隧道周围附加土压力

Fig. 9 Additional earth pressures around tunnel caused by side grouting

从图9(a)还可以看出,尽管在注浆侧离注浆最近位置的土压力因注浆而有显著的增加,但在距离隧道端部54, 102, 150 cm位置的附加土压为负值,即注浆过程中土压力有一定的减小,而在距离隧道端部

234 cm位置的附加土压变化主要发生在第一次注浆,附加土地压力总体在6.5~8 kPa。由此可见,在注浆过程中,在注浆侧的隧道侧部水平土压力并不是均增大,而是在离注浆点一定位置的土压力呈现减小。

图9(b)为注浆对侧隧道侧部的水平附加土压力,在距离隧道端部198 cm位置的土压力增大值约2.75 kPa,其他均有一定程度的减小,最大减小值在2 kPa内。注浆侧的附加土压力增量与注浆对侧的附加土压力并不相等,主要与隧道向注浆对侧发生变形时隧道顶部与底部受到一定的水平摩擦力有关。图9(c)与9(d)分别为隧道顶部与隧道底部的竖向土压力变化,其变化趋势非常接近,有所不同的为隧道顶部的竖向土压力变化值要大于隧道底部的竖向土压力变化值,顶部与底部的附加土压力不等同,这与隧道两侧受到了一定的摩擦力有关。且图9(c), (d)与图9(a)的附加土压力变形趋势也接近。

3 注浆导致的隧道附加变形分析

3.1 隧道附加直径变形

图10为侧部完成注浆后隧道的直径变形,从图10可以看出,注浆点附近在隧道侧部注浆的挤压作用使隧道发生了竖椭圆变形趋势,即最大水平直径变形与竖向直径变形较为接近,最大直径变形约为0.8 mm。在完成注浆后,隧道的直径变形均有所恢复。而在隧道端部,隧道则发生横椭圆变形趋势。

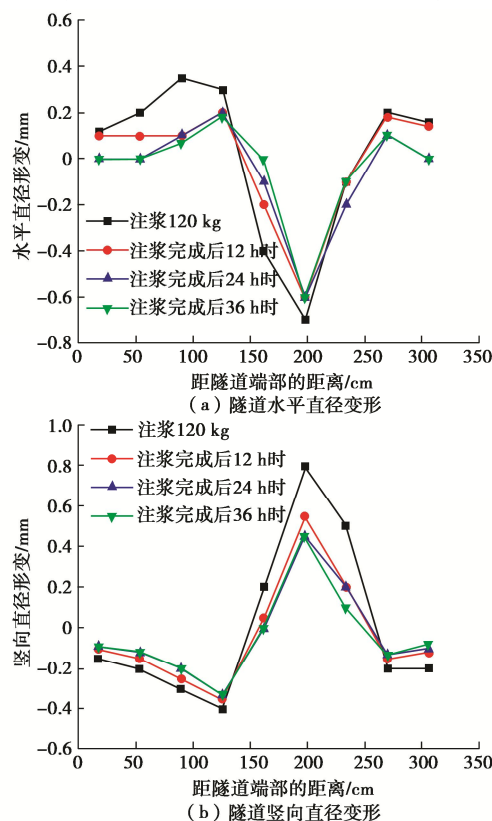


图10 侧部注浆导致的隧道直径变形

Fig. 10 Tunnel diameter deformation caused by side grouting

结合侧部注浆导致的隧道周围附加土压力可知,在侧部注浆时,注浆点附近隧道水平挤压力增加显著,而在隧道两端位置隧道的水平土压力有所减小,因此隧道在注浆点附近发生竖椭圆变形,而在隧道两端位置发生横椭圆变形。因注浆点位于隧道侧部,因此注浆点位置为隧道发生变形的“主动力”,因在注浆点附近隧道发生竖椭圆变形,隧道的竖直径增大,导致隧道的顶部与底部形成竖向相对挤压,从而形成竖向“地层抗力”,因此隧道在注浆点附近隧道的顶部与底部的竖向土压力均增大。而隧道两端的土压力与变形将结合隧道的纵向挠曲变形进一步分析。

3.2 隧道附加纵向挠曲变形

图 11 为隧道的纵向挠曲变形,以隧道中心向注浆对侧发生水平位移为正,隧道中心向上发生竖向位移为正。从图 11 (a) 可看出,完成注浆后,在注浆点附近,隧道中心向注浆对侧发生最大水平位移约为 1.6 mm,而在注浆点两端,隧道发生了反弯现象,即隧道中心向注浆侧发生了一定的水平位移。注浆后随着注浆材料的固结收缩,隧道的变形均有所恢复,到注浆完成 24 h 后隧道水平变形基本稳定。

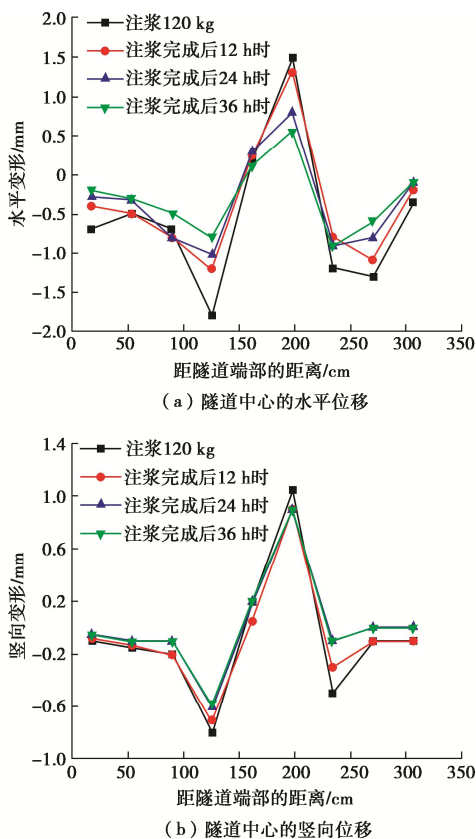


图 11 部注浆导致的隧道水平挠曲变形

Fig. 11 Horizontal deflections of tunnel caused by side grouting

从图 11 (b) 可看出,注浆完成后,在注浆点附近,隧道中心向上发生最大竖向位移约为 1.1 mm,这也是图 9 (c) 在注浆点附近隧道顶部的竖向土压力要大于隧道底部的竖向土压力主要原因。从图 11 (b)

可知,隧道在注浆点附近向上发生竖向位移时,在注浆两侧隧道在竖向上发生了一定的反弯,即向下发生了一定的竖向位移。

4 浆液扩散模式与附加荷载形成机制

4.1 浆液扩散模式分析

为了使注浆材料在地层中产生足够的强度,在注浆完成约 40 d 后再次将土箱内土体卸出,以便查看注浆材料的扩散形态。其中图 12 (a) 为注浆口周围的浆液分布状态。从图 12 可看出,出浆口周围的橡胶粒孔隙中充填着注浆材料;在出浆口形成了直径约 11 cm、高度约 35 cm 的浆泡;同时在浆泡周围出现了多条劈裂扩散形成的浆脉。从试验取样来看,有多种典型的浆液分布形态:①注浆管出浆口周围一定量的浆液聚集而形成浆泡,如图 12 (a) 所示;②橡胶粒孔隙中充填着注浆材料同时含有劈裂扩散形成的浆脉,如图 12 (b) 所示;③劈裂扩散形成浆脉一定范围内的橡胶粒孔隙中充填着注浆材料,而离浆脉较远处的橡胶粒孔隙中则无注浆材料,如图 12 (c) 所示。由于试验过程中地层内浆液扩散无法做到可视化,因此只能根据浆液分布形态分析浆液的扩散过程与可能模式如下:

(1) “渗透→挤密→劈裂”扩散模式

因模型土(橡胶粒)约 90% 的橡胶粒粒径均分布在 2~5 mm 范围,其孔隙率达到 37.1%,且其孔隙尺寸比均匀土体的孔隙要大。当浆液到达注浆管出浆口后,浆液渗透至土体孔隙内;浆液在孔隙内流动时,随着流动距离的增加,其流动阻力也不断增加^[14],出浆口的浆液进入土体孔隙内的难度也越大,由此导致出浆口处的浆液压力增大,对周围土体形成挤压,从而使土体的孔隙减小,浆液进入土体孔隙内的难度进一步增大,出浆口处的浆液压力也持续增大;当出浆口处的浆液压力到一定值时,将形成浆泡,压力继续增大时,会在浆泡周围发生劈裂,浆液将发生劈裂扩散。“渗透→挤密→劈裂”扩散模式的示意图见图 13 (a)。

(2) “挤密→劈裂→渗透”扩散模式

当注浆管位置的出浆速度较快时,浆液到达出浆口时其压力迅速上升,从而对周围土体形成挤压;随着浆泡的增大,土体挤压变形的所需要的压力也增加,当出浆口处的浆液压力到一定值时浆液将发生劈裂扩散;浆液到达劈裂缝后,将向周围土体内的孔隙中渗透,如图 12 (c) 所示,距离劈裂扩散形成的浆脉中一定范围内的土体中有明显的渗透扩散浆液。“挤密→劈裂→渗透”扩散模式的如图 13 (b) 所示。

4.2 注浆附加荷载形成机制分析

经卸土后发现,在离注浆点一定范围内的模型隧

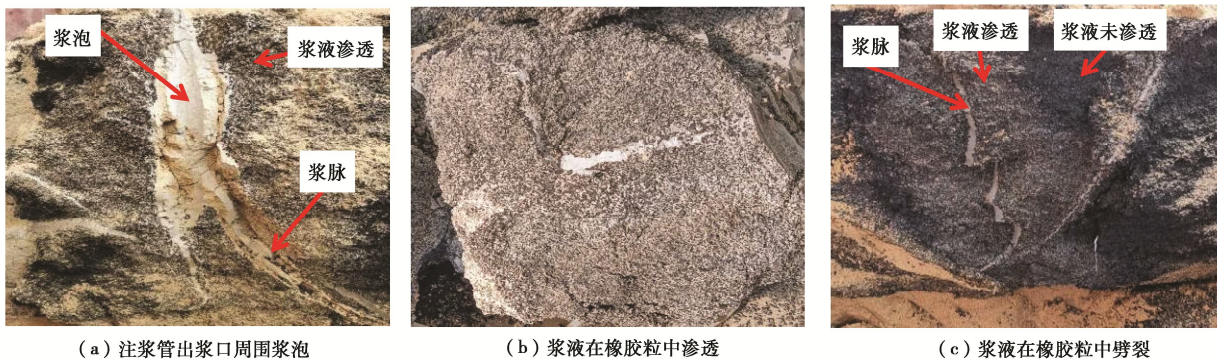


图 12 浆液扩散形态

Fig. 12 Patterns of slurry diffusion

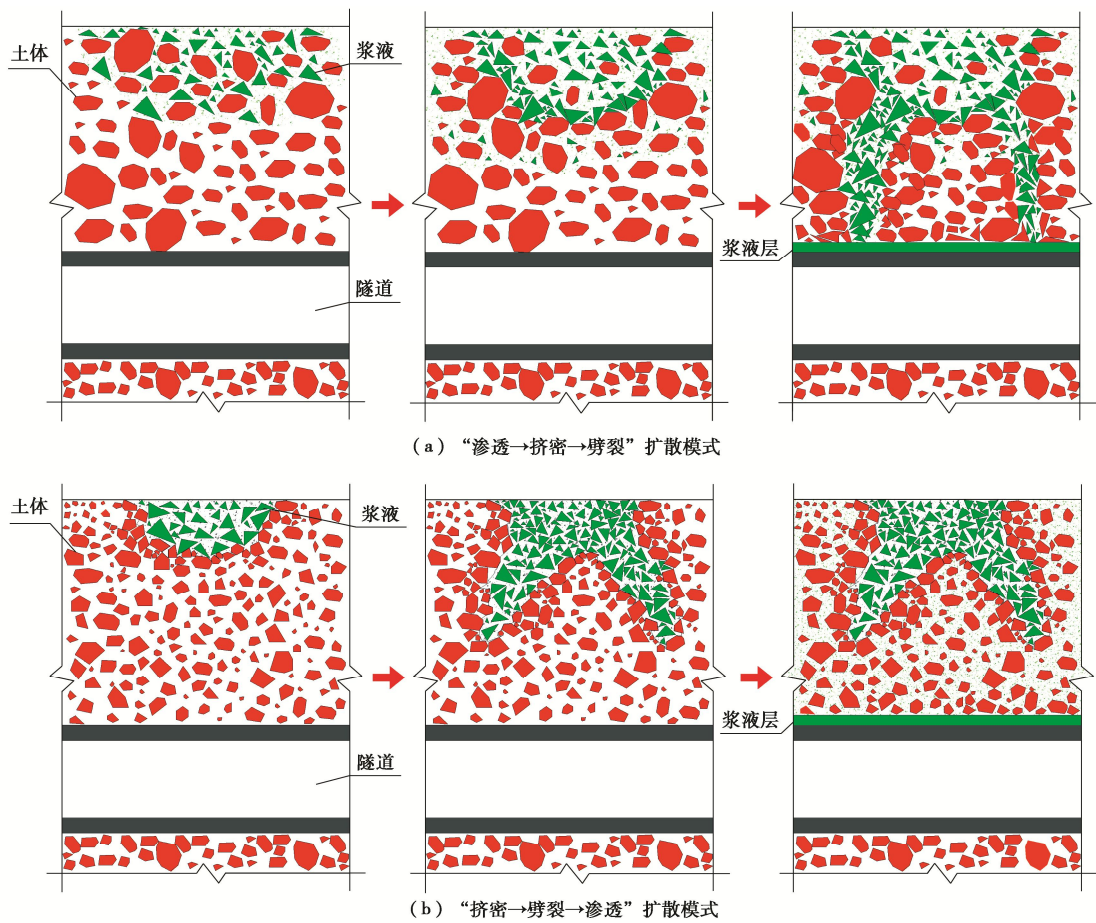


图 13 不同浆液扩散模式对应的发展过程

Fig. 13 Corresponding development of different slurry diffusion modes





图 14 模型隧道外壁及其聚集的浆液

Fig. 14 Model tunnel wall and its accumulated grout

道外壁有凝固的浆液（最厚位置约为 3.5 mm），如图 14（c）所示（位于图 14（a）中的 1 号区域）。模型隧道外壁上有的与浆脉连通，如图 14（d）所示（位于图 14（a）中的 2 号区域），有的与孔隙内含浆液的土体接触，而在离注浆较远的位置隧道外壁虽然有浆液，但浆液基本未向周围土体发生扩散，如图 14（e）所示（位于图 14（a）中的 3 号区域）。根据隧道外壁的浆液形态可知，由于地层土体的渗透性较强，隧道外壁的附加荷载主要由浆液通过渗透扩散与劈裂扩散的浆液压力所形成。在注浆口周围形成了浆泡而对周围土体形成挤压，土体变形对隧道周围的浆液也将形成一定的挤压荷载。

根据注浆过程隧道周围的土压力可知，隧道注浆时产生了水平方向的被动土拱现象，由此导致隧道周围的土压力在局部增大时，两边有一定程度的减小，如图 15（a），（b）所示；因此隧道在注浆点附近发生竖椭圆变形，而在离注浆点较远处则发生的横椭圆变形（如图 15（c）所示）。

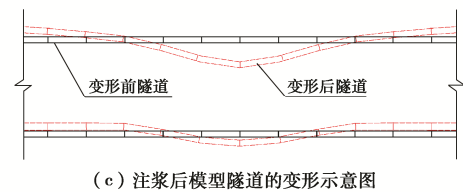
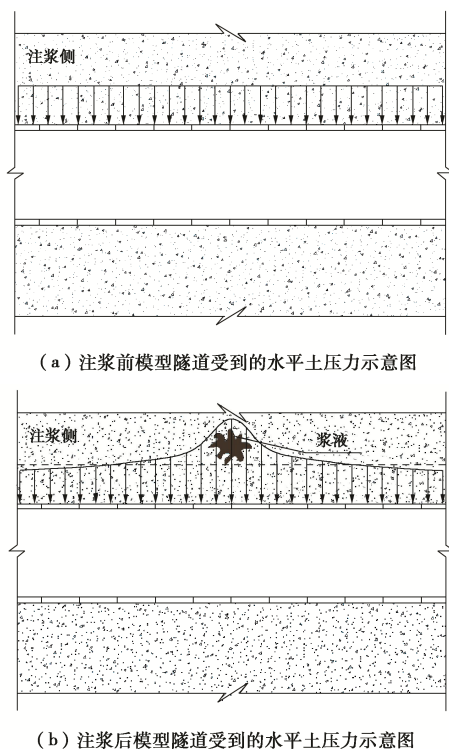


图 15 水平被动土拱作用下模型隧道土压力与变形示意图
Fig. 15 Schematic diagram of soil pressure and deformation in a model tunnel under horizontal passive soil arching

5 结 论

（1）3 次近似等量注浆导致注浆点附近隧道的水平附加土压力增量不同，第一次注浆导致的附加土压力最大，后两次均依次减小。因注浆材料含水率较高，完成注浆后注浆点附近隧道的水平附加土压力减小了约 50%。在注浆挤压作用下，导致隧道周围的土压力在注浆点局部增大时，两边有一定程度的减小，产生了明显的水平被动土拱现象。

（2）在注浆附加荷载影响下，模型盾构隧道在注浆点附近发生了竖椭圆变形，而在离注浆点较远处则发生了横椭圆变形。由于地层的水平被动土拱作用，隧道在注浆点附近向远离注浆点发生变形，而在离注浆点较远处则向注浆点侧发生变形，由此导致隧道发生反弯现象。

（3）根据地层中浆液凝固后的分布形态分析，提出了浆液扩散的两种模式，分别为“渗透→挤密→劈裂”扩散模式与“挤密→劈裂→渗透”扩散模式，并阐明了两种浆液扩散模式的扩散机制。

（4）隧道外壁附加荷载主要由浆液通过渗透扩散与劈裂扩散的浆液压力所形成。在注浆口周围形成了浆泡而对周围土体形成挤压，土体变形对隧道周围的浆液也将形成一定的挤压荷载。

参考文献：

- [1] 黄大维, 周顺华, 赖国泉, 等. 地表超载作用下盾构隧道劣化机理与特性[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1173-1181. (HUANG Dawei, ZHOU Shunhua, LAI Guoquan, et al.

- Mechanisms and characteristics for deterioration of shield tunnels under surface surcharge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(7): 1173-1181. (in Chinese))
- [2] LI Mi G, CHEN J J, WANG J H, et al. Comparative study of construction methods for deep excavations above shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **71**(9): 329-339.
- [3] LIANG R Z, WU W B, YU F, et al. Simplified method for evaluating shield tunnel deformation due to adjacent excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **71**: 94-105.
- [4] 黄大维, 周顺华, 宫全美, 等. 钢管压入土体施工挤土机制与案例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(1): 176-183. (HUANG Dawei, ZHOU Shunhua, GONG Quanmei, et al. Analysis of squeezing mechanism for jacked-in construction of steel pipe and project case[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(1): 176-183. (in Chinese))
- [5] LIN X T, CHEN R P, WU H N, et al. Deformation behaviors of existing tunnels caused by shield tunneling undercrossing with oblique angle[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, **89**: 78-90.
- [6] 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, **36**(12): 2203-2212. (ZHANG Dongmei, ZOU Weibiao, YAN Jingya. Effective control of large transverse deformation of shield tunnels using grouting in soft deposits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(12): 2203-2212. (in Chinese))
- [7] 高翔, 龚晓南, 朱旻, 等. 盾构隧道注浆纠偏数值模拟研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, **17**(6): 1480-1490. (GAO Xiang, GONG Xiaonan, ZHU Min, et al. Numerical simulation of grouting remediation in shield tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, **17**(6): 1480-1490. (in Chinese))
- [8] 郑刚, 潘军, 程雪松, 等. 基坑开挖引起隧道水平变形的被动与注浆主动控制研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(7): 1181-1190. (ZHENG Gang, PAN Jun, CHENG Xuesong, et al. Passive control and active grouting control of horizontal deformation of tunnels induced neighboring excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(7): 1181-1190. (in Chinese))
- [9] GONG Q M, ZHAO Y, ZHOU J H, et al. Uplift resistance and progressive failure mechanisms of metro shield tunnel in soft clay[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **82**(8): 222-234.
- [10] 周俊宏, 宫全美, 周顺华, 等. 盾构隧道抬升作用下极限上覆土压力计算方法[J]. 岩土力学, 2016, **37**(7): 1969-1976. (ZHOU Junhong, GONG Quanmei, ZHOU Shunhua, et al. Calculation method of limit overlying earth pressure on shield tunnel during lifting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(7): 1969-1976. (in Chinese))
- [11] 朱旻, 龚晓南, 高翔, 等. 盾构隧道注浆纠偏模型试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, **17**(3): 660-667. (ZHU Min, GONG Xiaonan, GAO Xiang, et al. Model tests of correction of displaced shield tunnel using grouting technique[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, **17**(3): 660-667. (in Chinese))
- [12] 付艳斌, 陈湘生, 吴沛霖. 既有地铁隧道纵向注浆抬升机理分析[J]. 现代隧道技术, 2020, **57**(5): 184-192. (FU Yanbin, CHEN Xiangsheng, WU Peilin. Analysis on mechanism of longitudinal grouting uplift of existing metro tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, **57**(5): 184-192. (in Chinese))
- [13] 黄大维, 陈后宏, 罗文俊, 等. 纵向残余顶推力对盾构隧道纵向刚度影响试验研究[J]. 中国铁道科学, 2023, **44**(1): 142-152. (HUANG Dawei, CHEN Houhong, LUO Wenjun, et al. Experimental study on the influence of shield tunnel longitudinal rigidity induced by longitudinal residual jacking force[J]. China Railway Science, 2023, **44**(1): 142-152. (in Chinese))
- [14] 黄大维, 罗仲睿, 罗文俊, 等. 盾构隧道施工同步注浆材料流动性测试方法及影响因素分析[J]. 中国铁道科学, 2022, **43**(3): 94-102. (HUANG Dawei, LUO Zhongrui, LUO Wenjun, et al. Test method and influencing factors of fluidity of synchronous grouting material in shield tunnel construction[J]. China Railway Science, 2022, **43**(3): 94-102. (in Chinese))