

DOI: 10.11779/CJGE201412007

软土盾构隧道横向大变形侧向注浆控制机理研究

张冬梅^{1, 2}, 邹伟彪³, 闫静雅⁴

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 武汉市市政工程质量监督站, 湖北 武汉 430015; 4. 上海地铁维护保障有限公司, 上海 200070)

摘要: 注浆是治理软土盾构隧道横向变形等隧道病害经常采用的方法。提出了采用注浆引起的土体体积应变模拟隧道注浆效果的方法, 并利用上海地铁隧道注浆加固实践验证了该方法的合理性。利用该方法, 以注浆引起的隧道横向收敛、接头张开和错台变化为指标, 分析了隧道侧向注浆对隧道横向变形的影响规律, 揭示了注浆对隧道横向变形的作用机理; 研究了注浆量和注浆范围对注浆加固效果的影响规律。研究发现, 注浆能有效改善隧道横向收敛、减小接头张开量。在注浆初期, 注浆对隧道横向变形的影响以管片转动为主, 该阶段隧道接头张开量减小显著, 而隧道收敛减小则相对缓慢; 随注浆量的增加, 注浆引起的管片运动以刚体平动位移为主, 该阶段隧道横向收敛显著减小, 但注浆引起的接头错台量和隧道侧向位移则不断增加。最后, 以上海地铁隧道为背景, 对注浆量和注浆加固范围提出了优化建议。

关键词: 软土; 盾构隧道; 横向变形; 注浆

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)12-2203-10

作者简介: 张冬梅(1975-), 女, 博士, 教授, 主要从事软土盾构隧道长期性态及运营隧道结构安全方面的研究。
E-mail: dmzhang@tongji.edu.cn。

Effective control of large transverse deformation of shield tunnels using grouting in soft deposits

ZHANG Dong-mei^{1, 2}, ZOU Wei-biao³, YAN Jing-ya⁴

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Wuhan

Municipal Engineering Quality Supervision Station, Wuhan 430015, China; 4. Maintenance Management of Shanghai Metro Co., Ltd.,
Shanghai 200070, China)

Abstract: Grouting is frequently used to control and adjust the large transverse deformation of shield tunnels in clays. However, the grouting is usually performed based on the engineering experience. The control mechanism of grouting for the tunnel transverse deformation is not clear. In this paper, the method to simulate the performance of grouting through the resulted soil expansion is proposed and validated. The effect of grouting on the large transverse deformation of shield tunnels is investigated in terms of the change of tunnel diameter and joint movement using numerical simulation. The optimization is finally carried out through the parametric study. The researches indicate that the grouting can significantly reduce the tunnel transverse deformation and joint opening, and can also produce remarkable joint offset when the volumetric strain of ground caused by the grouting is larger than 3%. The grouting firstly causes rotation and then rigid movement of tunnel segments. Thereafter, the joint opening reduces more significantly due to the segmental rotation at the beginning of grouting. The joint offset increases significantly due to the rigid movement of tunnel segments when more grouting is injected.

Key words: soft deposit; shield tunnel; transverse deformation; grouting

0 引言

盾构施工技术的发展使盾构隧道成为城市轨道交通的主要结构形式, 因此, 盾构隧道结构安全已成为地铁网络化运营的命脉。然而, 随着运营盾构隧道服役时间的增加、隧道周边环境的变化以及受到隧道本

身结构和施工特点的影响, 建造在软土地层中的盾构

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278379); 国家基础研究技术项目(2011CB013800); 上海市自然科学基金项目(12ZR1433600); 上海青年科技启明星计划项目(14QB1401100)

收稿日期: 2014-04-29

隧道结构出现了大量危害隧道结构安全的病害, 如渗漏现象、纵向不均匀沉降、隧道横向变形、裂缝、混凝土破损等^[1-4]。对上海软土隧道现场检测也发现, 由于对运营隧道沉降采取了注浆加固等控制措施, 近年来, 隧道沉降及不均匀沉降均出现稳定趋势, 部分隧道沉降还出现了少量回升, 然而隧道横向变形问题却逐年增多。由于盾构隧道具有拼装多缝的特点, 横向变形如果导致一环管片的失效, 会引发一个区间、一条线路乃至整个网络的失效。王如路等^[4]发现, 隧道的渗漏水、混凝土破损等病害与隧道横向变形息息相关。因此, 控制隧道横向变形的发展是保证地铁隧道正常服役性能和结构体系安全的核心和基础。为了保护运营隧道结构安全, GB50175—2013《地铁设计规范》^[5]对隧道横向变形提出了具体的规定: 隧道拼装成环后在外部荷载作用下, 直径累计变化量小于5‰D (D为盾构隧道外径)。然而, 从运营盾构隧道实践来看, 隧道变形经常超出这一控制标准, 到2007年为止, 上海地铁1号线、2号线、4号线分别有70%, 49.5%和37.5%超过这一标准(Shen等^[6])。而且, 上海11条线路35万环管片中约1.5‰发生横向大变形(变形超过2‰D), 为保护隧道结构安全, 对大变形管片采用了钢环管片进行加固, 由于钢管片加固在隧道内施工, 施工时间受限, 且造价较高^[1]。因此, 为了控制隧道横向大变形的发展, 对横向变形发展不稳定的隧道通常采用侧向注浆的方法对横向变形进行调整和改善^[1, 4], 侧向注浆示意图如图3所示。

由于目前对盾构隧道的注浆主要是依据工程经验展开^[7-8], 注浆参数也主要依据经验进行选取, 理论研究严重滞后于工程实践, 因此, 注浆对隧道横向变形的作用机理仍不明确。本文针对侧向注浆对隧道横向变形作用机理及注浆加固参数优化展开研究, 以期为工程实践提供理论支撑。

1 侧向注浆模拟方法

隧道侧向注浆加固是一个复杂的过程, 由于目前隧道工程中注浆的目的主要是为了提高土体的物理力学性能, 因此目前对注浆的模拟主要以改变注浆区域土体的力学参数为主^[9-10]。然而对运营隧道进行侧向注浆的目的是为了减小和改善隧道横向变形, 因此不考虑注浆过程的影响则无法考虑注浆对隧道变形的调整作用, 无法获知注浆对隧道变形的作用机理。

考虑到本问题的复杂性, 本文利用FLAC^{3D}有限差分数值计算方法, 综合隧道结构的拼装特点, 以侧向注浆引起的土体体积应变为基础, 基于注浆引起的土体体积应变与隧道横向变形之间的关系, 揭示注浆对隧道横向变形的作用机理, 优化注浆参数。由于土

体注浆扩散过程十分复杂, 从上海地铁隧道沉降注浆加固效果来看, 注浆扩散过程主要表现为压密注浆的过程, Au等^[11]通过对隧道注浆的研究指出, 压密注浆过程和效果可以通过对注浆区域土体体积膨胀的模拟来实现。

针对FLAC数值模拟方法, 采用体积膨胀模拟隧道侧向注浆的过程可以由以下两种方法实现: 一是直接对注浆单元施加体积应变; 二是通过施加膨胀压力让单元体积产生膨胀。直接施加体积应变的方法是在“注浆单元”(代表注浆土体的单元)上施加一个体积应变来模拟注浆。施加膨胀应力的方法是对“注浆单元”施加内应力, 使其体积膨胀。后者包括两个步骤: 首先是增加注浆区域的土体刚度; 然后对“注浆单元”施加内应力, 使之体积膨胀到一定体积应变后停止施加内应力。相比而言, 施加膨胀压力的方法更接近注浆的实际情况, 其实施过程较施加体积应变的方法复杂^[12]。由注浆而引起的土体体积应变的大小可以通过注浆量和注浆区域大小来确定:

$$\Delta\epsilon_v = \frac{V_{\text{inj}}}{V_0} \quad (1)$$

式中: $\Delta\epsilon_v$ 为土体体积应变, V_{inj} 为注浆量(体积), V_0 为注浆区域土体的体积。

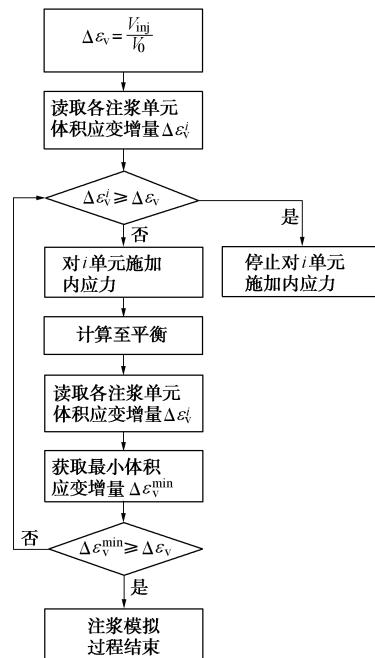


图1 模拟注浆流程图

Fig. 1 Flow chart of numerical simulation for grouting

通过施加膨胀力模拟注浆加固过程的流程如图1所示。注浆模拟过程中, 在注浆单元上逐步施加一个“虚拟”膨胀压力, 直到单元体积应变达到注浆土体体积应变值为止, 这一过程可以通过找出注浆单元的id, 编制fish语言程序实现。参照已有研究^[13], 对注浆区域土体的土性进行加强。

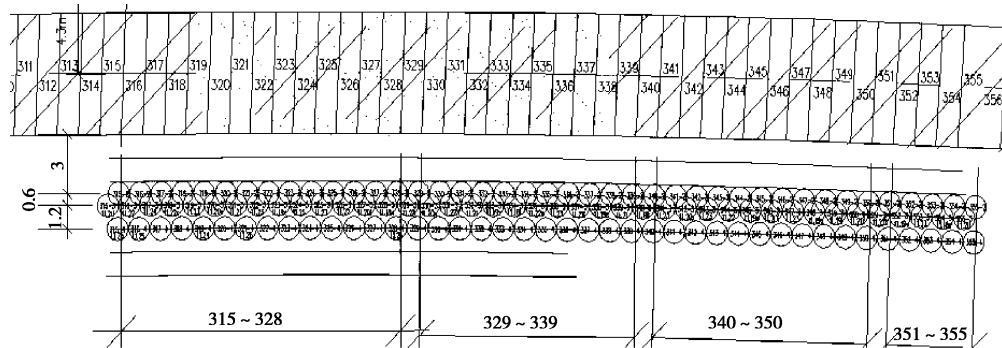


图 2 注浆加固平面图

Fig. 2 Plan view of grouting

2 注浆模拟方法的验证

以上海某地铁隧道横向变形整治为例, 对采用体积膨胀模拟隧道注浆整治过程的方法进行验证。

2.1 工程背景

由于周边环境影响, 上海地铁某区间隧道发生了较大的收敛变形, 隧道最大收敛变形达到 14.8 cm (2.4%D), 其中以第 315~335 环变形最为严重, 隧道顶部发生了严重的渗漏水现象。为了改善隧道收敛和控制变形发展, 对变形区域采用隧道外侧注浆加固处理。注浆区域在第 315~355 环之间, 共计 50 m 左右, 设孔 41 个。平面上在第 315~355 环范围内平行于隧道轴线布置 4 排注浆孔, 注浆孔中心距隧道外边线分别为 3.0, 3.6, 4.8 m, 注浆孔孔距 1.2 m, 如图 2 所示。在深度方向上, 距离隧道外边 3.6 m 和 4.8 m 的注浆孔, 其注浆深度为隧道顶到隧道底之间的土体, 高度为 6.2 m; 距隧道外边 3 m 的注浆孔, 其注浆深度为隧道顶下 1 m 至隧道底之间的土体, 高度为 5.2 m, 如图 3 所示。浆液采用水泥和水玻璃双液浆。在隧道外土层打设注浆管至设计要求的深度, 再进行“微扰动”注浆加固。

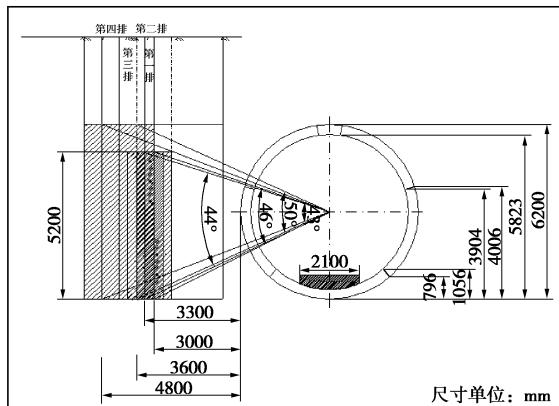


图 3 注浆加固剖面图

Fig. 3 Profile of grouting

注浆施工的同时对隧道管片的收敛变形进行严密监测。每次监测的时间分为两部分, 如果是列车停运前注浆, 则在注浆结束后测量; 如果是在列车停运后注浆, 在注浆前测量取一次初值, 同时在每次注浆结束后半小时再测量取一次变化值。注浆的监测范围为对应注浆桩位邻近的三环管片。

2.2 数值计算模型

采用图 1 所示的模拟方法, 模型尺寸取为 $32 \times 32 \times 60$ m, 隧道外径 6.2 m, 内径 5.5 m, 每环宽度为 1.2 m, 隧道顶部埋深 10 m 左右, 本文虽以隧道横向变形的调整为研究目标, 但考虑隧道注浆的空间效应, 根据隧道纵向注浆的区间, 计算时纵向上取 50 环。数值计算模型如图 4 所示。

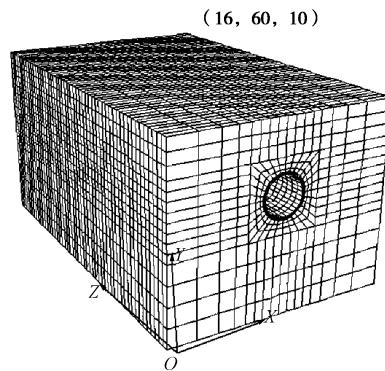


图 4 数值计算模型图

Fig. 4 Mesh of numerical simulation

数值计算模型边界条件如下: 地表为位移自由边界; 底部边界位移限制为零; 模型侧面位移边界为侧向位移边界限制为零。

2.3 隧道模型

被加固的隧道管片装配方式为典型的通缝拼装, 共由 6 块管片组成, 全环分成一块封底块 TD (84°), 2 块标准块 TB (65°), 2 块邻接块 TL (65°), 一块小封顶块 TF (16°)。管片厚度 350 mm, 环宽 1.2 m。管片拼装如图 5 所示, 纵向接头示意图如图 6 所示。

考虑到隧道拼装结构特点及接头刚度参数的非线性特性, 本文采用了张冬梅等^[14]提出的基于接头力学特性的、参数能够动态调整的接头模拟方法, 该方法的基本原理为管片接头部位的接触特性通过接触面之间的法向弹簧和剪切弹簧实现, 接头不同结构构造采用具有不同法向和切向刚度的弹簧来表示, 接头弹簧法向和剪切弹簧的分布如图 7 所示, 该模型能够通过隧道接头节点的开合判定接头弹簧的工作状态, 实现了模型参数的动态调整。数值计算中考虑隧道与土体之间的接触。

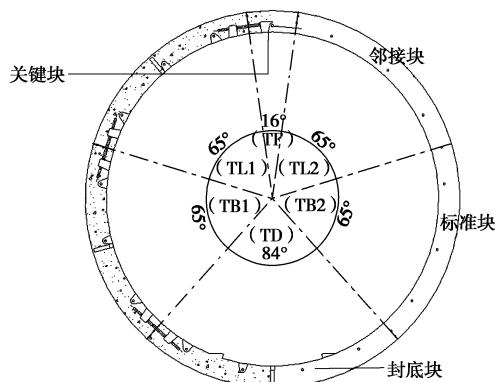


图 5 隧道拼装示意图

Fig. 5 Assembly of tunnel segments

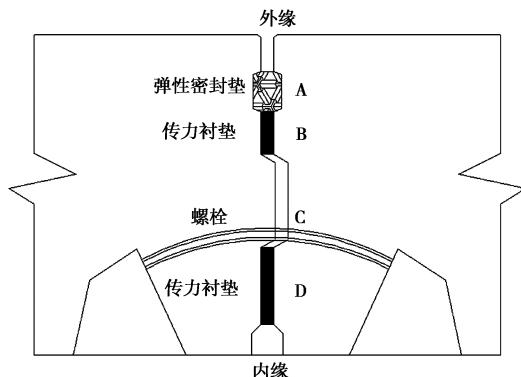


图 6 管片接头示意图

Fig. 6 Profile of segment joint

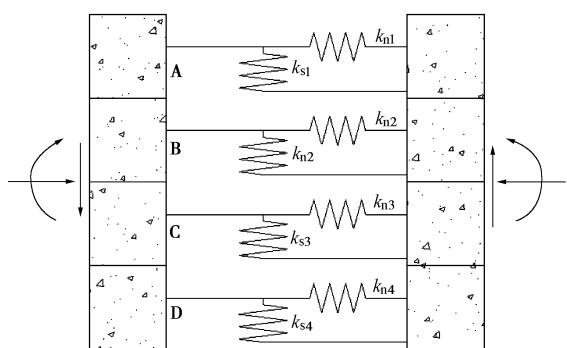


图 7 隧道接头计算模型

Fig. 7 Model of tunnel joints

2.4 计算参数

根据樊振宇^[15]对上海地铁接头特性的研究成果, 隧道纵向和环向接头刚度计算参数如表 1 所示。管片结构本身的弹性模量取为 34.5 GPa, 泊松比为 0.2。

表 1 接头弹簧压缩刚度^[15]

Table 1 Stiffness of joint springs

接头类型	内侧衬垫 /(10^{11} Pa·m $^{-1}$)	螺栓 /(10^9 Pa·m $^{-1}$)	外侧衬垫 /(10^{11} Pa·m $^{-1}$)	剪切刚度 /(10^8 Pa·m $^{-1}$)
纵向接头	1.70	7.1	1.134	2.25
环向接头	1.71	2.8	1.080	0.98

数值计算中按照实际的土体分层情况来模拟, 隧道周围土体分布如表 2 所示, 土体本构模型为莫尔-库仑模型, 根据地质勘查报告, 土体物理力学参数如表 2 所示。

表 2 土体物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of soils

土层名称	重度 /($kN\cdot m^{-3}$)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	压缩模量 E/MPa	层厚 /m
①填土	18.0	8.0	8.0	1.50	1.22
②褐黄色粉质黏土	18.5	26.0	17.0	5.11	2.00
③淤泥质粉质黏土	17.5	11.0	15.5	4.08	4.10
④灰色淤泥质黏土	16.8	11.0	12.0	2.45	8.20
⑤-1 灰色黏土	17.7	17.0	17.5	5.75	3.20
⑤-2 灰色砂质粉土	18.4	5.0	32.0	8.26	13.2

2.5 数值模拟过程

注浆对横向变形的作用模拟过程如下: 首先通过加载实现隧道的变形发展, 在隧道变形发展到一定程度时, 停止加载, 进行侧向注浆加固, 以注浆引起的隧道水平直径收敛值、竖向直径收敛值、接缝张开量、错台量为指标, 研究注浆对隧道变形的影响规律。依据现场监测结果, 本文仅以注浆引起的隧道水平直径收敛变化为目标展开了验证分析。

(1) 加载变形阶段

通过地面加载的方式使隧道发生横向变形, 将其作为隧道初始变形, 加载方式为: 在地表 ($-3 < x < 3$, $20 < y < 30$) 范围内施加 120 kPa, ($-3 < x < 3$, $15 < y < 20$)、($-3 < x < 3$, $30 < y < 35$) 范围内施加 80 kPa 的竖向荷载, 使隧道发生初始变形。

(2) 注浆加固阶段

根据本工程的实践, 因注浆而引起的土体体积应变增量 $\Delta \varepsilon_v$ 为 3.0%, 数值模拟中设定的膨胀应力为 2.0

MPa。注浆区域如图 8 所示。

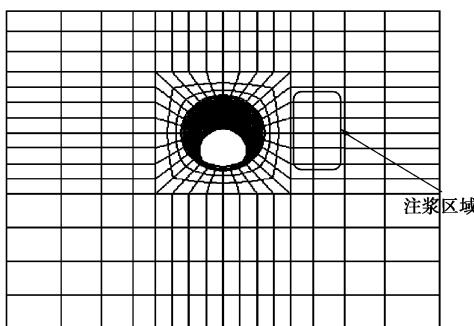


图 8 模型横断面注浆区域图

Fig. 8 Grouting model

2.6 结果对比与分析

为了验证数值模拟的合理性, 以现场实测隧道横向收敛变形为目标进行了对比和分析。注浆前后实测和计算得到的隧道水平直径的收敛如图 9, 10 所示。注浆后隧道的水平直径收敛明显减小, 实测得到的隧道直径收敛减小量在 12.0~16.9 mm 之间; 数值模拟得到的隧道水平直径收敛值减小量在 10.6~18.1 mm 之间。将现场实测和数值模拟得到的注浆对隧道水平直径收敛值的影响对比如图 11 所示。尽管实测得到的隧道水平直径的变化出现一定的波动, 但是实测和数值计算结果在量值上和发展规律上具有较好的一致性, 二者对比结果验证了数值模拟方法的合理性。

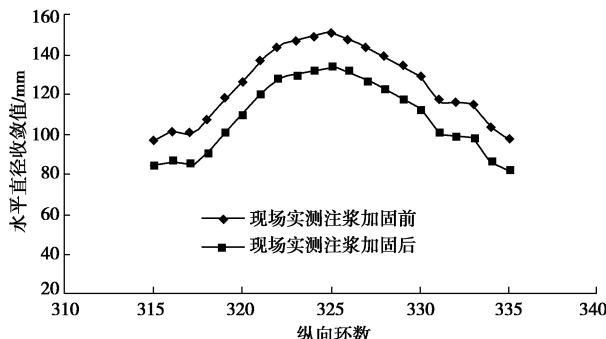


图 9 隧道水平直径收敛变化实测值

Fig. 9 Measured variation of horizontal diameter of tunnel along longitudinal direction

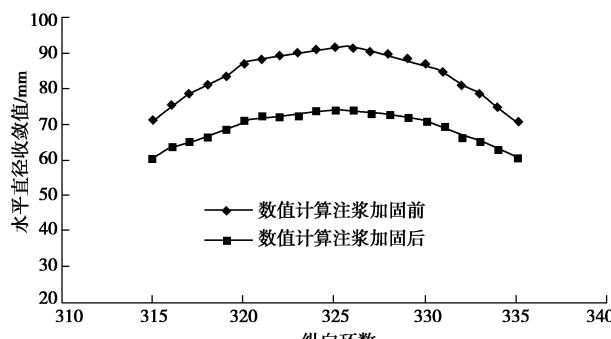


图 10 隧道水平直径收敛变化计算值

Fig. 10 Calculated variation of horizontal diameter of tunnel along longitudinal direction

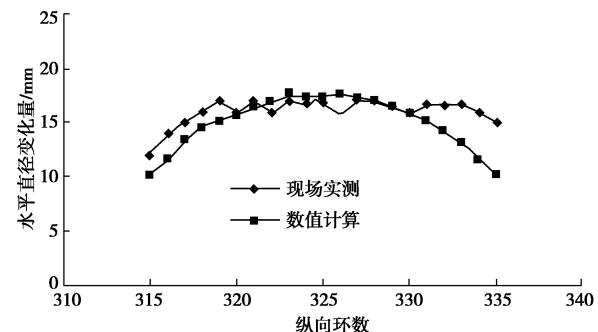


图 11 注浆引起的隧道水平直径变化实测值和计算值对比图

Fig. 11 Comparison between calculated and measured variation of horizontal diameter of tunnel caused by grouting

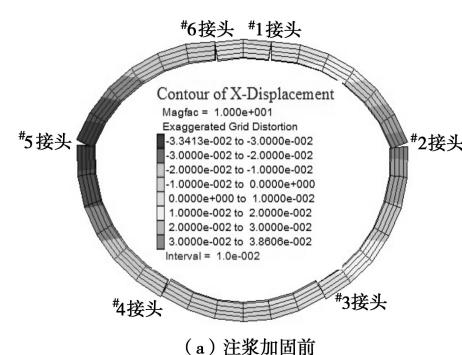
此外, 注浆引起的隧道各环直径收敛变形减小量比较均匀, 从而避免了注浆引起隧道环与环之间产生较大的错台现象, 降低了因错台而引起的隧道渗漏水的风险。

3 注浆对隧道横向变形作用机理

通过地面加载实现隧道初始变形, 得到隧道水平直径收敛值、竖向直径收敛值、接缝张开量、错台量作为注浆加固过程中隧道变形的初始值, 与注浆后隧道的变形特性进行比较, 揭示注浆加固的作用机理。隧道变形和注浆过程的模拟同第 2 节。注浆引起的土体体积应变取为 3%。计算中注浆区域为: 纵向上在第 23~28 环共 6 环范围, 水平方向上距离隧道外侧 2.0~5.3 m, 竖直方向为隧道顶以上 1 m 至隧道底以下 1 m 之间的土体进行注浆。

为了分析注浆后隧道的变形机理, 以隧道第 25 环为例, 得到如图 12 所示的隧道变形。在下述分析中, 以封顶块右侧接头为 #1 接头, 顺时针旋转依次为 #2~#6 接头。

由图 12 可以发现, 对隧道右侧采用注浆加固以后, 隧道衬砌变形发生了明显的变化。以下将从隧道水平直径、竖向直径、接缝张开量、错台量对注浆加固机理展开分析。



(a) 注浆加固前

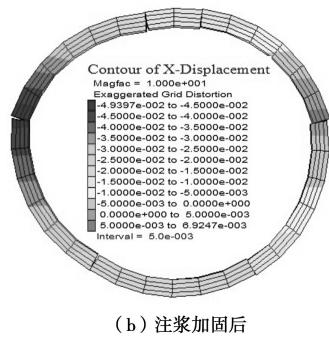


图 12 注浆加固前后管片变形图

Fig. 12 Effect of grouting on transverse deformation of tunnel

3.1 隧道直径收敛值

注浆对隧道横向直径和竖向直径的影响如图 13 所示, 图中直径的变化为注浆前变形量减注浆后变形量所得, 因此, 从图 13 可以看出, 注浆能有效改善隧道直径的收敛变形。而且离注浆区域越近, 水平直径收敛变化量越大, 注浆加固区域中第 23~28 环的隧道水平直径变形分别减小了 18, 20.5, 22, 21.9, 19.1, 16.3 mm, 隧道竖向直径变形分别减小了 13.1, 15.4, 16.1, 15.6, 13.7, 11.5 mm, 而且沿隧道纵向呈现相同的规律。随着距注浆中心距离的增大, 直径收敛值的变化呈明显减小趋势, 在小于第 17 环和大于第 23 环的区段直径收敛值基本没有变化, 说明注浆加固在纵向上对隧道直径收敛值的影响范围非常有限, 在注浆区域 5 环之外的范围, 注浆影响基本消失。

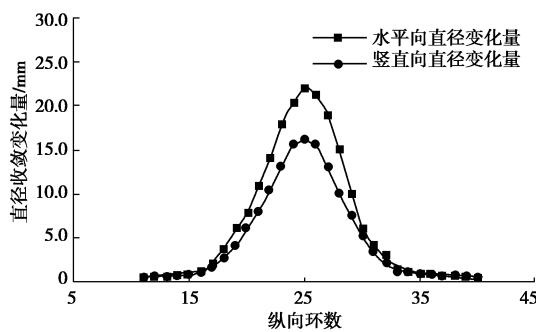


图 13 注浆对隧道直径收敛的影响

Fig. 13 Effect of grouting on variation of tunnel diameter

3.2 隧道接缝张开量

尽管注浆能有效改善隧道横向变形, 然而由于隧道由不同管片拼装而成, 在注浆过程中, 除了隧道直径发生明显变化之外, 其接头变形的发展规律对隧道结构的性态也产生重要的影响。而且从图 12 还可以发现, 在注浆过程中由于各管片的位移特性不同, 由此而产生的隧道接头变形也不同。

以注浆区中间管片即模型中第 25 环管片为例, 对注浆引起的纵缝张开量变化进行分析, 注浆前后隧

道纵缝张开量的变化如图 14 所示。由图 14 可以看出, 注浆使隧道各接头的张开量显著减小, 接头 1 至接头 6 的减小量分别为 1.38, 3.4, 2.69, 1.8, 2.3, 1.35 mm, 接头张开量分别减小了 25%, 39%, 42%, 34%, 21%, 21%。然而, 由于注浆位置的影响, 对处于对称位置的隧道接头, 注浆侧隧道接头张开量的减小较为显著。沿隧道环向, 注浆侧#2 接头张开量的减小最为显著。而且从图 12 可以看出, 注浆加固前的隧道变形中, #2 接头的张开量最为显著, 而且为外侧张开, 这对隧道的防水带来严重威胁。而注浆则有效减小了接头张开量, 降低了隧道防水失效的风险。

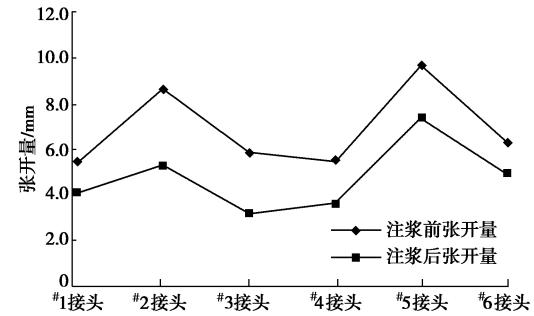


图 14 注浆前后隧道第 25 环纵缝张开量

Fig. 14 Effect of grouting on joint opening at ring No. 25

注浆对接头张开量的变化表明, 注浆引起了管片之间的相对转动, 根据隧道接头张开量的变化特点, 注浆过程中管片的相对转动如图 15 所示。

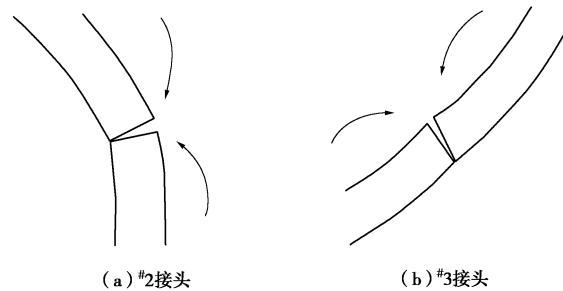


图 15 注浆引起的接头相对转动

Fig. 15 Rotation of segmental joint induced by grouting

3.3 隧道接缝错台量

在注浆发展过程中, 伴随着接头张开量的变化, 隧道接头之间的错台量也发生了变化, 图 16 为注浆对第 25 环管片各接头错台量的影响。

由图 16 可以看出, #1 接头和#6 接头的错台量基本没有变化, 可见在注浆作用下, 封顶块和邻接块之间的相对刚体位移基本可以忽略。然而#2 接头的错台量由 2.5 mm 增大至 5.1 mm, #3 接头和#4 接头的错台量明显减小, 分别从注浆前的 4.7 mm 和 4.3 mm 减小为 2.6 mm 和 3.2 mm。注浆明显改善了#3 接头和#4 接

头的错台位移, 但也显著增加了#2 接头的错台量。注浆对接头错台发展的影响表明, 注浆使标准块产生了显著的相对连接快和封底块的侧向平动位移, 从而增加了接头的错台量。

根据隧道注浆对接头变形的影响可以看出, 注浆对隧道横向变形的调整以注浆引起的管片侧向相对平动和相对转动来实现。通过管片间的相对运动改善隧道横向变形, 减小接头的张开量, 尤其是张开量较大的#2 接头得到最为显著的改善; 但同时也引起接头错台量发生了较为复杂的变化; 注浆一方面可以减小调整注浆前错台量较大的接头变形, 但同时也会增加#2 接头的错台量, 因此, 注浆对隧道接头的影响特点给注浆参数的优化提出了要求。

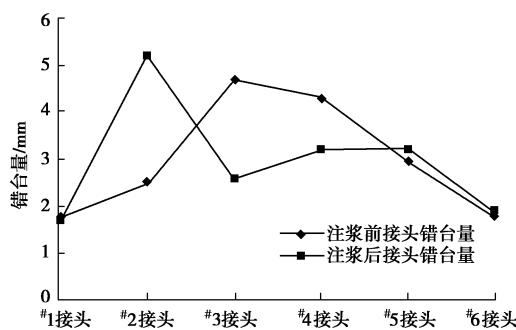


图 16 注浆前后隧道第 25 环纵缝错台量

Fig. 16 Effect of grouting on joint offset at ring No. 25

4 注浆参数影响分析

根据注浆对隧道横向变形的影响机理及注浆工艺特性, 对隧道变形产生重要影响的注浆参数主要为注浆量和注浆范围, 通过对注浆参数影响分析, 可为隧道注浆参数优化提出建议。在参数影响分析中, 计算模型同前节, 隧道的初始收敛仍采用加载方法实现, 注浆加固所对应的隧道初始水平直径收敛值为 76.5 mm。

4.1 注浆量的影响

注浆量采用注浆引起的土体体积应变 $\Delta\varepsilon_v$ 表示, 参数分析中注浆引起的土体体积应变由 0.5%, 0.6%, 0.7%, 0.8%, 0.9%, 1.0%, 1.2%, 1.4%, 1.6%, 1.8%, 2.0%, 2.5%, 3.0%, 3.5%, 4.0%, 4.5%, 5.0% 共 17 个工况。

注浆量对隧道水平直径收敛变化、隧道水平位移的影响如图 17 所示, 图 17 中隧道水平位移分别采用隧道水平直径两端点的水平位移表示。而由前述分析可知, 注浆对竖直直径收敛的影响与水平直径收敛规律相同, 因此, 图 17 中注浆量隧道直径收敛变化的影响仅以水平直径变化为对象展开研究。从图 17 可以看出, 在 $\Delta\varepsilon_v$ 小于 2.0% 时, 直径收敛减小量随注浆量变化较平缓, 当注浆量 $\Delta\varepsilon_v$ 大于 2.0% 时, 直径收敛

的减小量随注浆量的增加显著增加, 并呈线性关系。

图 17 同时也表明, 随着注浆量的不断增加, 隧道发生了较为显著的水平向侧移, 且隧道水平直径右端的侧移量显著大于其左端的侧移量, 这一方面带来隧道水平直径收敛的减小, 改善了隧道的横向变形, 但同时带来了隧道的附加侧向位移。由此也可发现, 隧道直径收敛的改善主要由注浆引起的注浆侧管片平动位移所致。

对比水平直径收敛的减小量与隧道水平直径右端点之间的差异看以看出, 在 $\Delta\varepsilon_v$ 在大于 2.0% 以后, 二者的差异逐渐增加, 这说明注浆对隧道横向变形的改善和修复程度逐渐增加, 但当注浆量超过 4% 时, 因注浆引起的隧道侧向水平位移超过 5 mm。因隧道注浆沿隧道纵向是区域性的, 注浆引起的隧道侧向水平位移表现为隧道纵向不均匀变形, 影响隧道纵向稳定。基于注浆对隧道横向变形和侧向位移的影响特点, 注浆量宜控制在 2%~4%。

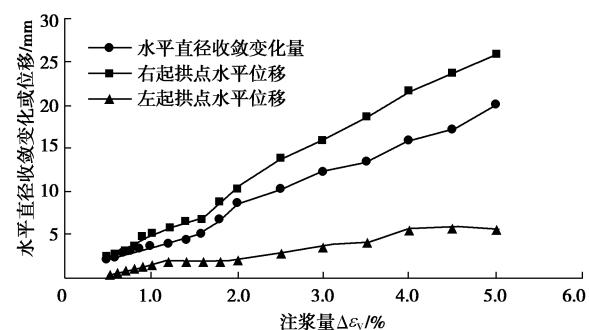


图 17 注浆量对隧道水平直径收敛及隧道水平位移的影响

Fig. 17 Effect of grouting on tunnel transverse deformation and horizontal motion

从第 2 节分析已知, 注浆能有效减小隧道接头张开, 但会增加接头错台量, 以受注浆影响较大的接头 2 为例, 分析注浆对接头变形的影响。不同注浆量对接头 2 的张开量和错台量的影响如图 18 所示。

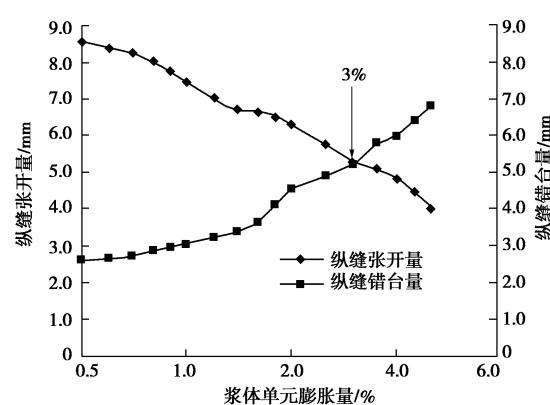


图 18 注浆量对#2 接头变形的影响

Fig. 18 Effect of grouting on No. 2 joint motion

图 18 表明, 随着注浆量的增加, 纵缝张开量呈下降趋势, 而纵缝错台量却呈增加趋势。而当注浆量 $\Delta\varepsilon_v$ 小于 1.5% 时, 纵缝张开量的减小显著, 而错台量的变化则相对缓慢, 对比图 17, 18 可以发现, 在注浆量较小时, 注浆对隧道的调整以接头张开量的闭合为主, 随着注浆量不断增加, 注浆对隧道的影响主要表现为直径收敛的减小, 并随之带来接头错台量的发展。这就表明, 在注浆初期, 注浆对隧道变形的调整以邻接块与标准块的转动为主; 随着注浆量的增加, 注浆对隧道变形的调整以管片的平动为主。

虽然隧道注浆量能有效减小隧道接头张开, 但在注浆量超过 3% 以后, 接头错台量的增加速率急剧增大, 考虑到接头张开量和错台量的发展规律, 注浆量控制在 3% 既能有效减小隧道接头的张开, 又能有效控制由于注浆而引起的接头错台量。

4.2 注浆范围

工程实践上, 坚向上注浆范围一般为隧道顶到隧道底之间的土体; 考虑到注浆对隧道的扰动, 水平方向上一般离开隧道外侧 3 m 左右开始布置注浆管, 考虑上述因素并结合计算模型特点, 选取 8 个不同注浆区域进行分析, 如图 19 和表 3 所示。注浆量仍采用注浆引起的土体体积应变 $\Delta\varepsilon_v$ 来表示, 大小仍取为 3%, 注浆对应的隧道初始变形为 76.5 mm。

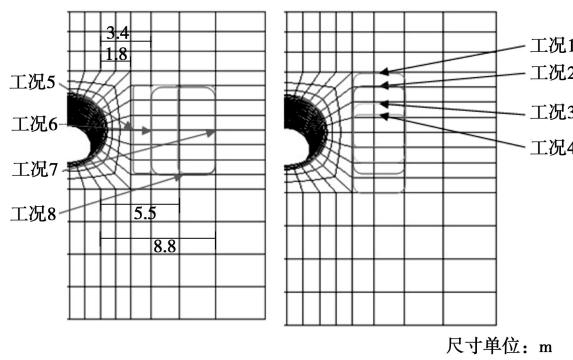


图 19 注浆区域图

Fig. 19 Profile of grouting areas

表 3 横向注浆范围

Table 3 Grouting ranges

工况	水平方向		竖直方向	
	隧道外侧 1.8 m 至 5.3 m	隧道外侧 3.4 m 至 5.3 m	隧道顶以上 2 m 至隧道底以下 2 m	隧道顶至隧道底
1	隧道外侧 1.8 m 至 5.3 m			隧道顶以上 1 m 至隧道底以上 1 m
2	隧道外侧 1.8 m 至 5.3 m			隧道顶以下 2 m 至隧道底以上 2 m
3	隧道外侧 1.8 m 至 5.3 m			隧道顶至隧道底
4	隧道外侧 1.8 m 至 5.3 m			隧道顶至隧道底
5	隧道外侧 1.8 m 至 3.4 m			隧道顶至隧道底
6	隧道外侧 3.4 m 至 5.3 m			隧道顶至隧道底
7	隧道外侧 5.3 m 至 8.8 m			隧道顶至隧道底
8	隧道外侧 3.4 m 至 8.8 m			隧道顶至隧道底

(1) 坚向注浆范围对注浆效果的影响

注浆离开隧道外侧距离一定的条件下, 坚向注浆区域对隧道直径收敛的影响如图 20 所示。

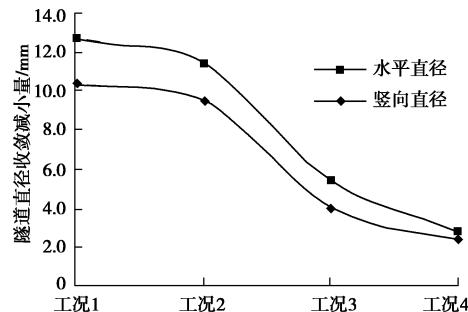


图 20 坚向注浆区域对隧道直径收敛的影响

Fig. 20 Effect of grouting range on tunnel transverse deformation

总之, 在离开隧道相同距离条件下, 坚向注浆区域越大, 对隧道直径收敛的调整幅度越大。然而, 当加固区域从工况 1 变化到工况 2 时, 尽管加固区域在坚向范围上减少了 40%, 但是对隧道直径收敛调整量只减小了 10%。而当加固区域从工况 2 减小到工况 3、加固区域减小了 30% 的情况下, 隧道水平直径收敛的减小量下降了 52.6%。而继续减小坚向注浆范围, 注浆对隧道直径收敛的调整幅度也明显变缓。由此可发现, 坚向上隧道变形对隧道顶至隧道底之间的土体加固区域最为敏感, 对该区域进行加固能有效改善隧道横向变形。

(2) 注浆体和隧道间距对注浆效果的影响

注浆体和隧道之间水平距离对加固效果的影响如图 21 所示。图 21 表明注浆体和隧道之间间距对注浆效果影响显著, 二者之间的距离越小, 注浆加固效果越明显。从工况 5 到工况 7, 随着注浆体和隧道之间距离的增加, 注浆对隧道变形的调整效果呈线性减小的趋势。对比工况 6 和工况 8 也发现, 在注浆体和隧道之间距离相同的情况下, 注浆宽度增加了 66%, 而对隧道横向变形的调整仅增加了 15% 左右。从这个

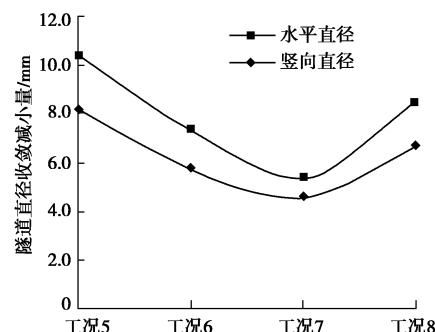


图 21 注浆体和隧道之间水平距离对注浆效果的影响

Fig. 21 Evolution of tunnel transverse deformation with distance between grouting and tunnel

意义上讲, 注浆距离对注浆效果起着决定性的影响, 而且注浆体与隧道之间距离越近, 加固效果越好。然而考虑到注浆过程对隧道周围土体的扰动、注浆设备的安放空间等问题, 实践上以离开隧道外侧 2 m 为宜。根据注浆区域对隧道变形影响和调整规律, 隧道外侧 2 m 至 5 m 左右是对注浆加固效果的核心影响区域。

(3) 纵向注浆范围对注浆效果的影响

以表 3 中的工况 2 为基础, 注浆量引起的土体体积应变仍为设 3%, 隧道初始变形仍为 76.5 mm, 纵向上的注浆范围为: 工况 1: 第 25~26 环; 工况 2: 第 24~27 环; 工况 3: 第 23~28 环; 工况 4: 第 22~29 环; 工况 5: 第 21~30 环。纵向不同注浆区域对隧道水平直径收敛变化的影响如图 22 所示。

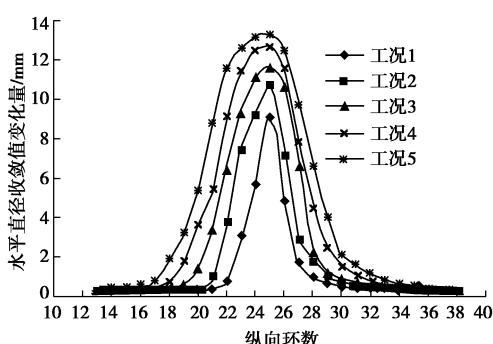


图 22 纵向注浆范围对注浆效果的影响

Fig. 22 Evolution of tunnel diameter convergence with grouting area along tunnel

图 22 表明, 注浆长度对加固区域内的隧道水平直径收敛影响显著, 纵向注浆长度越大, 对隧道水平直径收敛的减小越明显, 隧道最大直径收敛的减小量发生在纵向注浆区域的中心位置。如工况 1 条件下, 隧道最大水平直径收敛变化量为 9.1 mm, 而在工况 5 条件下, 隧道最大水平直径变化量达到 13.2 mm, 较工况 1 增加 45.1%。但是随着纵向加固长度的增加, 纵向加固长度对隧道最大水平直径收敛变化量的影响趋于稳定, 这与注浆范围沿纵向的影响范围是一致的。从前述分析可知, 注浆沿纵向的影响范围为 3 环左右, 因此, 纵向注浆对超过 6 环以外的隧道直径收敛影响迅速减小, 表现为注浆区域中心隧道水平直径的收敛不再随纵向注浆长度增加而减小。

5 结 论

利用数值模拟方法, 基于隧道侧向注浆引起的土体体积应变, 分析了隧道侧向注浆对隧道横向大变形的影响规律, 揭示了侧向注浆的作用机理, 分析了注浆参数对隧道变形调整的影响规律, 得到以下 4 点结论。

(1) 侧向注浆加固能显著减小隧道横向变形和纵向接头张开量, 降低隧道渗漏水风险。注浆对隧道水平直径变形的调整量大于对隧道竖向直径变形的调整量; 沿隧道环向, 注浆对隧道肩部接头张开量(文中“2 接头, 也即连接块和标准块之间接头)的减小最为显著。

(2) 侧向注浆对隧道变形和接头张开量的调整主要通过管片转动和刚体平动移动实现。在注浆初期, 注浆引起的管片运动主要以转动为主, 因此, 该阶段, 隧道接头张开量的减小显著, 而收敛变形的减小相对缓慢; 随着注浆量的增加, 注浆引起的管片刚体平动移动增加, 隧道收敛迅速减小, 而注浆引起的接头错台量也显著增加, 并引起较大的隧道侧向位移。

(3) 以上海地铁隧道为背景, 综合注浆对隧道直径收敛、接头错台量和隧道刚体位移的影响规律, 提出最优注浆量($\Delta\varepsilon_v$)为 3%。

(4) 基于注浆对隧道收敛变形的影响和调整规律, 发现最优注浆范围为竖向上为隧道顶至隧道底、水平方向上为距离隧道 2~5 m 之间的注浆区域。

必须指出的是, 本文以上海地铁为背景提出了最优注浆量, 但是由于注浆工艺复杂, 影响因素较多, 不同工程其最优注浆量也有所差异。而且, 由于隧道注浆会引发土体中超孔隙水压力的发展, 因此, 注浆对隧道变形的长期效果也是工程中必须关注的问题, 目前对该问题的研究正在进展中。

参考文献:

- [1] 王如路. 上海软土地铁隧道变形影响因素及变形特征分析 [J]. 地下工程与隧道, 2009(1): 1~6. (WANG Ru-lu. Factors influencing deformation of Shanghai soft soil metro tunnel and deformation analysis[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2009(1): 1~6. (in Chinese))
- [2] SAGASETA C. Patterns of soil deformations around tunnels: application to the extension of Madrid Metro[J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28(6/7): 445~468.
- [3] 叶耀东, 朱合华. 软土地铁运营隧道病害现状及成因分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2007(2): 157~160. (YE Yao-dong, ZHU He-hua. Analysis on the current status of metro operating tunnel damage in soft ground and its causes[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007(2): 157~160. (in Chinese))
- [4] 王如路, 张冬梅. 超载作用下软土盾构隧道横向变形机理及控制标准研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1092~1011. (WANG Ru-lu, ZHANG Dong-mei. Evolution of transverse deformation and assessment index for operation

- shield tunnel under surface surcharge in soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(6): 1092 - 1011. (in Chinese))
- [5] GB 50175—2013 地铁设计规范[S]. 2013. (GB 50175—2013 Code for design of metro[S]. 2013. (in Chinese))
- [6] SHEN S L, WU H N, CUI Y J, et al. Long-term settlement behavior of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, **40**: 309 - 323.
- [7] SOGA K. Laboratory investigation of multiple grout injections into clay[J]. Géotechnique, 1997, **47**(2): 81 - 90.
- [8] WISSEER C. Numerical modelling of compensation grouting above shallow tunnels[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2005, **29**(5): 443 - 471.
- [9] 晏启祥, 何川, 姚勇, 等. 小净距隧道施工小导管注浆效果的数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2004, **25**(增刊 2): 239 - 242. (YAN Qi-xiang, HE Chuan, YAO Yong, et al. Numerical simulation analysis of little tremie grouting effect while construction of going into portal at small-distance tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(S2): 239 - 242. (in Chinese))
- [10] 来弘鹏, 谢永利, 杨晓华. 地表预注浆加固公路隧道浅埋偏压破碎围岩效果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(11): 2309 - 2315. (LAI Hong-peng, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua. Treatment effect analysis of shallow-buried crushed surrounding rocks under unsymmetrical pressure reinforced with surface pregrouting technology in highway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(11): 2309 - 2315. (in Chinese))
- [11] AU S K A, SOGA K, JAFARI M R, et al. Factors affecting long-term efficiency of compensation grouting in clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(3): 254 - 262.
- [12] 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): 484 - 489. (TANG Zhi-wei, ZHAO Chen-cang. Mechanisms of ground heave by grouting and analytical solutions & numerical modeling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(6): 484 - 489. (in Chinese))
- [13] 张忠苗, 邹健, 贺静漪, 等. 黏土中压密注浆及劈裂注浆室内模拟试验分析[J]. 岩土工程学, 2009, **31**(12): 1817 - 1824. (ZANG Zhong-miao, ZOU Jian, HE Jing-yi, et al. Laboratory tests on compaction grouting and fracture grouting of clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(12): 1817 - 1824. (in Chinese))
- [14] 张冬梅, 樊振宇, 黄宏伟. 考虑接头力学模型的衬砌结构计算方法研究[J]. 岩土力学报, 2010, **31**(8): 2546 - 2553. (ZHANG Dong-mei, FAN Zhen-yu, HUANG Hong-wei. Calculation method of shield tunnel lining considering mechanical characteristics of joints[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(8): 2546 - 2553. (in Chinese))
- [15] 樊振宇. 软土盾构隧道衬砌结构计算方法及纵向变形分析[D]. 上海: 同济大学, 2009. (FAN Zhen-yu. Calculation method and longitudinal deformation analysis on shield tunnel lining in soft soil[D]. Shanghai: Tongji University, 2009. (in Chinese))