

盾构隧道微扰动注浆对土体强度和衬砌横向收敛的影响

赵 帅^{1,2}, 张东明^{1,2}, 邵 华³, 黄宏伟^{1,2}

(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, 上海 200092;
3. 上海地铁维护保障有限公司, 上海 200070)

摘要: 软土盾构隧道横向变形直接关系到结构安全, 常采用微扰动注浆方法控制。为研究隧道微扰动注浆效果, 针对一段隧道双侧微扰动注浆加固后的地层, 开展了静力触探试验, 分析注浆对隧道周围土体的影响规律; 对现场获取的土样开展了室内 K_0 固结不排水伸长剪切实验, 获得了注浆前后土体伸长剪切强度 s_u 和刚度 E_{50} 的变化量; 采用线性模型拟合注浆量和收敛值比值数据, 建立了可描述相对注浆量与注浆前后收敛值比值关系的方程式, 分析了注浆对收敛值降低的效果。研究表明, 注浆使锥尖阻力提高了 110.8% (注浆中心区) 和 97.6% (注浆边缘区), 注浆加固效果呈现非均匀性; 注浆后土体的 s_u 比注浆前提高了约 112%, E_{50} 提高了约 132%; 注浆使隧道的横向收敛累计值平均降低了约 24%。利用得到的结果, 可根据浆液用量对隧道横向收敛的恢复进行估算, 为后续设计微扰动注浆方案治理软土盾构隧道的横向收敛提供借鉴。

关键词: 微扰动注浆; 静力触探锥尖阻力; 剪切强度; 横向收敛; 注浆加固效果

中图分类号: TU41

文献标志码: A

Influence of Perturbation Grouting of Shield Tunnel on Soil Strength and Transverse Convergence of Tunnel Linings

ZHAO Shuai^{1,2}, ZHANG Dongming^{1,2}, SHAO Hua³, HUANG Hongwei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Rail Transit Maintenance Support Co., Ltd., Shanghai 200070, China)

收稿日期: 2021-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(51978516, 52022070); 上海市科学技术委员会科技计划(18DZ1201200)

第一作者: 赵 帅(1989—), 男, 博士生, 主要研究方向为隧道结构健康监测与检测运营、隧道结构安全等。

E-mail: zhaos@tongji.edu.cn

通信作者: 张东明(1987—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为软土盾构隧道等。

E-mail: 09zhang@tongji.edu.cn

Abstract: The transverse deformation of shield tunnels in soft soils may ultimately threaten the safety of tunnel structure and is often controlled by using the perturbation grouting method. To study the effect of perturbation grouting around a tunnel, cone penetration tests were conducted to analyze the influence of grouting on the soil around two sides of a tunnel and reinforced through grouting. K_0 consolidated undrained extensive shearing triaxial tests were performed on standard samples made from the soil obtained from field, and, as a result, the undrained extensive shear strength and the secant modulus were computed. A linear model was used to fit the data of grouting volume and horizontal convergence of the tunnel, and thus, an equation was built to describe the relationship between the normalized convergence value and the relative grouting volume. The effect of grouting on reducing horizontal convergence was analyzed using the built equation. The results show that perturbation grouting improves the p_s by 110.8% of the soil at the grouting center and 97.6% of the soil at the edge of the grouting region, and the grouting reinforcement effect is non-uniform. In addition, the s_u of the soil after grouting is increased by about 112% and the E_{50} by about 132%. The cumulative horizontal convergence of the tunnel is reduced by about 24% after grouting measures are adopted. Using the obtained results, the recovery extent of the transverse deformation of a tunnel can be estimated according to the amount of grout, which can provide reference for subsequent design of perturbation grouting schemes to treat the transverse deformation of the soft soil shield tunnels.

Key words: perturbation grouting; cone tip resistance;



论文
拓展
介绍

shearing strength; transverse convergence; grouting reinforcement effect

上海第4层淤泥质黏土具有饱和、流塑、土质均匀、夹少量粉砂团块等特点,属高压缩性土^[1],在这样的地层中进行隧道盾构施工本身就会出现土层承载能力不足和变形过大的问题,因此隧道邻近侧基坑开挖或隧道上方堆载必然导致该土层中的隧道横向变形过大^[2-4],例如上海地铁2号线某区间由于隧道上方堆载发生的结构严重变形事故^[5]。软土盾构隧道结构横向大变形的控制主要包括结构补强和地层注浆两类措施。其中内部张贴芳纶布或钢板的结构补强措施尽管能控制变形的持续发生,但限制了隧道结构既有大变形的恢复,且造价较高。因此,上海地区盾构隧道的横向变形主要通过微扰动双液注浆技术^[2,6]进行调整和改善。

微扰动注浆一般采用0.3~0.5 MPa的注浆压力,将水玻璃浆液和水灰比(质量比)为0.6~0.8的水泥浆液注入隧道单侧或两侧黏土层中,借助注浆压力挤压变形隧道,使其收敛得到一定程度的恢复,同时隧道附近注浆后的浆土混合物因抗力增加阻止了隧道的继续变形。浆液在土体中的扩散方式一般为压密为主劈裂为辅或压密、劈裂相伴随。在微扰动注浆研究方面,张冬梅等^[7]采用对土体单元施加膨胀应力的数值模拟方法分析了微扰动注浆对隧道横向变形的影响,为工程实践提供了理论支撑。郑刚等^[8]针对基坑开挖引起邻近隧道水平变形的工程案例,开展了注浆对土体及隧道水平变形主动控制的实验,并结合数值模拟结果建议了现场注浆可使用的策略,为开展注浆治理类似基坑开挖引起的隧道的变形提供了指导。邓指军^[8]调研了具体工程中微扰动注浆的加固效果,为后续工程实践提供了一定的参考。笔者在微扰动注浆控制隧道横向变形的工程实践中,对比实测隧道变形恢复量与注浆量数据,发现单位注浆量条件下隧道水平变形恢复量均值仅为3.8%,超过95%以上的浆液或注浆压力对隧道结构横向变形未能有效作用^[9]。郑刚等^[3]也提出注浆效率是注浆方案设计和施工中应考虑的问题。因此,需要通过现场试验和室内实验对浆液加固体各项力学参数进行确定,以此来对微扰动现场注浆加固效果的检测和分析。

本文结合上海地铁2号线某段区间隧道的微扰动注浆治理案例,①开展现场静力触探试验,对获得

的注浆前后的土体静力触探锥尖阻力值进行对比,分析注浆加固效果;②在注浆和非注浆区域通过标准贯入试验进行现场取土,制样并设计应力路径开展室内 K_0 固结不排水伸长剪切实验,确定注浆前后土体强度和刚度的提高程度;③基于监测的隧道直径横向收敛值对隧道侧向注浆效果进行评价,拟合相对注浆量与注浆前后收敛值比值之间的关系,评估注浆效率;④讨论微扰动注浆加固效果非均匀性的原因,给出提高注浆加固效果均匀性和注浆效率的建议。通过开展上述研究确定注浆加固效果,从而与已有的微扰动注浆研究成果形成一个整体,为以后类似微扰动注浆设计提供借鉴。

1 地铁隧道侧向注浆土体加固效果的原位探测

1.1 地铁隧道修复工程概况

2010年5月29日上海地铁2号线某隧道区间顶部地面发生堆土超载事件,堆载范围近似为矩形区域,长约400 m,宽约120 m,堆土高度平均为4 m(图1),最大堆高与原隧道顶部覆土厚度比值达到0.43,相当于在隧道顶部增加了40.0~140.0 kPa的荷载。隧道上行线第280环到第600环共320环管片受到堆土超载的影响,该区间隧道出现了密集的渗漏水现象,在部分管片上还观察到螺栓断裂、混凝土块状脱落等病害。前期花费1年左右的时间,通过移土,聚氨酯、环氧堵漏,张贴芳纶布,钢板加固等措施,隧道直径的横向收敛得到控制,变化趋于稳定^[5]。然而,未采取钢板加固措施的第350环到第450环在3年后发生了较大的横向收敛,隧道直径的横向收敛值(ΔD)与隧道直径(D)的比值达1.6%~2.4%,超出《地铁设计规范》(GB50175—2013)规定的0.5%限值的2.2~3.8倍。因此,2014年5月至7月对隧道两侧的土体进行注浆加固,控制隧道继续发生横向收敛,并进行一定程度的恢复。

1.2 地质条件及注浆试验设计

1.2.1 隧道区域地质条件

受损隧道所处区域的地质剖面如图1所示。隧道主要处于上海淤泥质黏土层中,该层土的有效重度为 $8 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 。对Q6XJ9钻孔获取的土样进行土工实验,获得该层土各参数如表1所示。

1.2.2 注浆试验设计

在隧道两侧沿轴线方向120 m范围内布置400个注浆孔对上行线中变形严重的第350环至第450

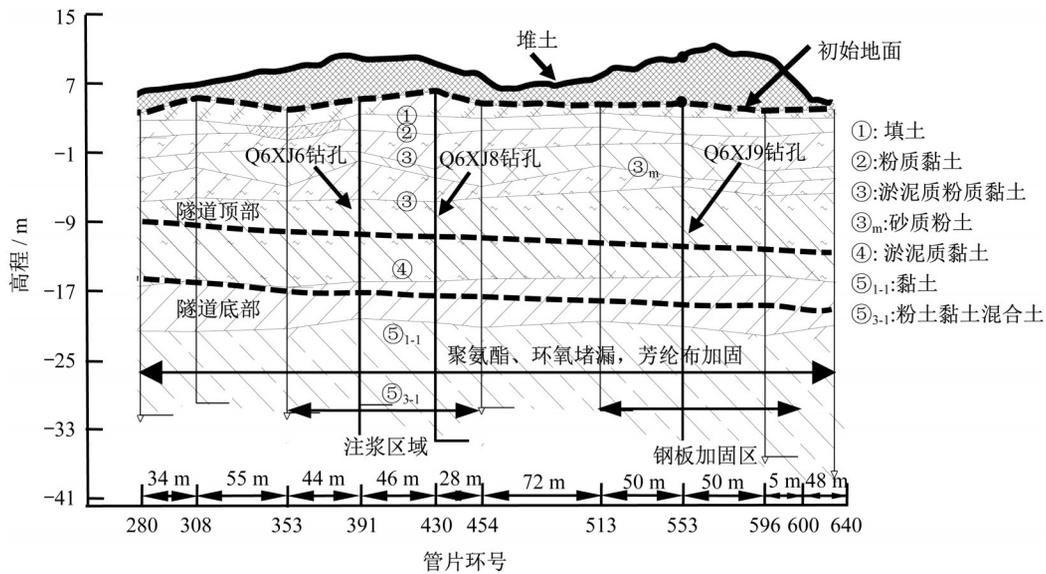


图 1 堆载区域地质剖面图

Fig.1 Geological profile for tunnel disrupted by extreme surcharge

表 1 淤泥质黏土性质参数

Tab. 1 Property parameters of muddy clay

参数	液限/%	塑限/%	孔隙比	压缩模量/MPa	不固结不排水剪切强度/kPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
数值	43.4	21.8	1.43	2.34	27	14	12.5

环管片进行修复。靠近隧道下行线的一侧(左侧)由于受施工空间的限制,布置1排注浆孔B1,右侧布置3排注浆孔A2、A1、A3,如图2所示。沿隧道轴向孔间距为1.2 m,B1孔中心距隧道中心为6.7 m,A2孔中心距隧道中心为6.1 m,A2、A1、A3分别相距0.6 m,如图2所示。

注浆采用逐排施工的方式,先对A1排的注浆孔完成注浆,然后对另一侧B1排的注浆孔进行注浆,

完成B1排注浆孔注浆后,对A2排注浆孔进行注浆,最后完成A3排注浆孔的注浆。

1.2.3 注浆参数

对于隧道两侧的淤泥质黏土采用水泥-水玻璃双液浆对其进行加固,水泥水玻璃的特征参数如表2所示,水泥与水玻璃的体积比约为3:1,混合浆液的化学胶凝时间在21 s左右。

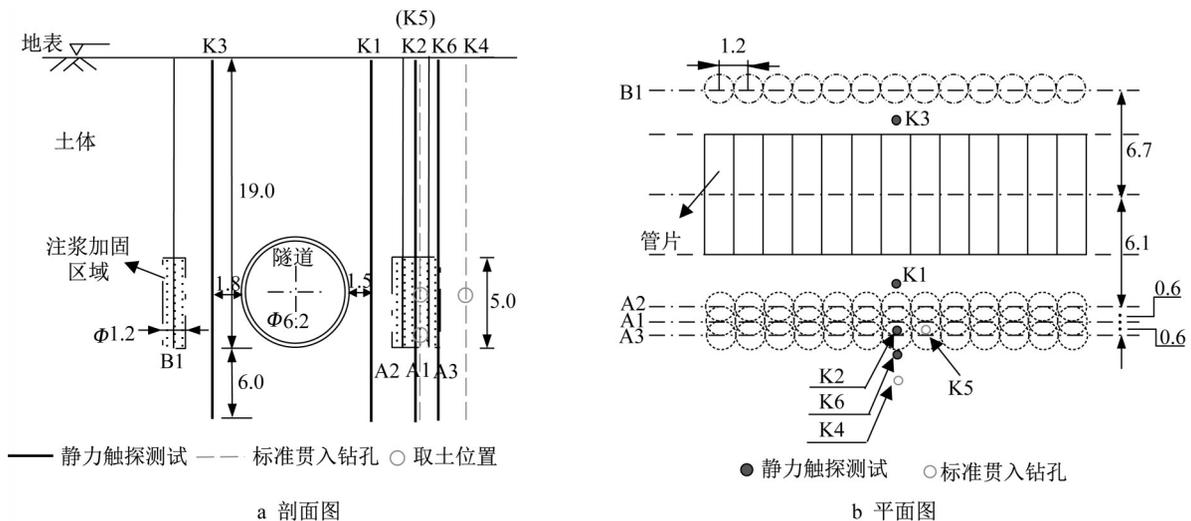


图 2 注浆方案和试验位置设计示意图(单位:m)

Fig. 2 Schematic of grouting plan and field test position (unit: m)

表2 水泥和水玻璃性质参数

Tab. 2 Property parameters of cement and sodium silicate

浆液类型	水灰比	强度等级	玻美度	模数
水泥	0.8	32.5		
水玻璃			39°Bé	3.02

注浆管采用外径32 mm、内径20 mm的钢管,钢管的末端有8个直径4 mm的注浆孔,呈双排梅花形均匀布置,钢管的末端有一个保护套保护注浆孔在未注浆时不被泥土堵塞(图3)。注浆从隧道底部开始,采用拔管注浆的方式对5 m高度范围内的土体进行加固,拔管速度为 $10 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。根据多次工程实践的结果,注浆压力采用0.5 MPa,水泥浆流量平均为 $15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,水玻璃浆流量平均为 $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。采用上述施工参数进行注浆,理论上可形成一直径约为1.2 m的圆柱体加固区域^[8]。

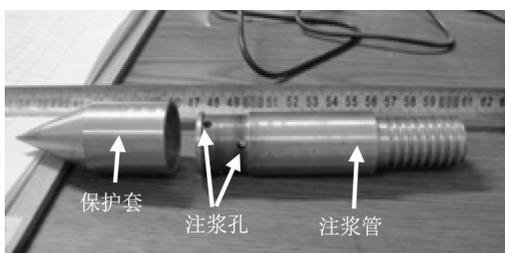


图3 注浆管示意图

Fig. 3 Schematic of grouting pipe

1.3 静力触探试验设计及探测结果

为了检测隧道侧向土体的注浆加固效果,实施注浆后一个月左右,在对应隧道第411环管片(注浆区域沿隧道轴向方向的中心)附近区域选择4处位置进行静力触探试验(CPT),并选择2处位置进行标准贯入试验(SPT)取土,如图2所示。静力触探试验K1孔距离隧道1.5 m,K3孔距离隧道1.8 m,两孔均位于未注浆区域,如图2所示。静力触探试验K2孔位于注浆孔A1区域,K6孔位于注浆孔A3区域。在隧道第391和430环管片附近区域,隧道建造前也选择了2处位置进行了静力触探试验,即图1中的Q6XJ6和Q6XJ8钻孔位置。图4展示了各钻孔锥尖阻力平均值随深度的变化规律,其中每隔1 m对锥尖阻力求平均值。图中灰色实线和虚线分别表示Q6XJ6和Q6XJ8钻孔位置处锥尖阻力 p_s 随深度 d 的变化,以不同深度处两钻孔的平均值作为该深度处注浆前的锥尖阻力 $p_{s, \text{注浆前}}$ 。图5为各钻孔注浆后锥尖阻力值 $p_{s, \text{注浆后}}$ 与 $p_{s, \text{注浆前}}$ 的比值随深度变化的曲线。

由图4和图5可知:

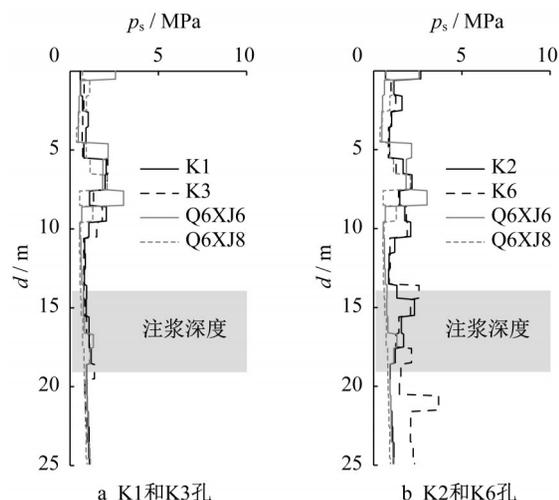


图4 不同钻孔锥尖阻力值随深度的变化

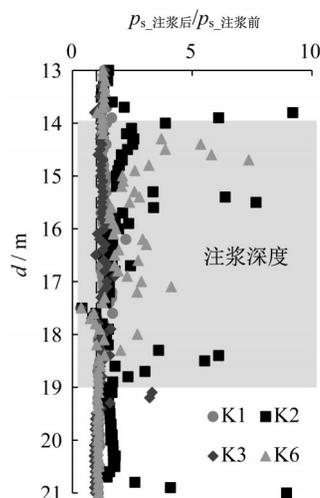
Fig. 4 Cone tip resistance p_s from CPT data along with depth of different boreholes

图5 注浆前后锥尖阻力值的比值随深度的分布

Fig. 5 Distribution of ratio of cone tip resistance value before and after grouting against depth

(1)未注浆区域K1和K3孔的锥尖阻力平均值略微高于原始孔中锥尖阻力的平均值(图4),这主要是由于注浆区域的注浆压力传递到该区域对土体产生挤压造成的,增加了土体的抗力。

(2)K2和K6处锥尖阻力平均值(由图4中数据计算)相比于原始锥尖阻力平均值分别增加了约110.8%和97.6%。K6孔处于设计注浆区域A3的边缘,距A3注浆区域中心0.6 m,其锥尖阻力值的提高说明采用1.2节中的注浆参数,注浆影响半径至少为0.6 m。

(3)在14~19 m注浆深度范围内,K2和K6孔中, $p_{s, \text{注浆后}}/p_{s, \text{注浆前}}$ 的最大比值分别约为7.7和7.4(图

5),即注浆后锥尖阻力值最大提高约6.7倍和6.4倍,且K2孔中 $p_{s,注浆后}/p_{s,注浆前}$ 大于1的数量明显多于K6孔,表明注浆中心区域A1的土体加固效果好于注浆边缘区域A3。

(4)K2孔和K6孔中 $p_{s,注浆后}/p_{s,注浆前}$ 的离散性高于K1孔和K3孔,表明浆液在土体中是呈不均匀分布的,注浆后土体呈非均质性。

2 K_0 固结不排水拉伸剪切实验

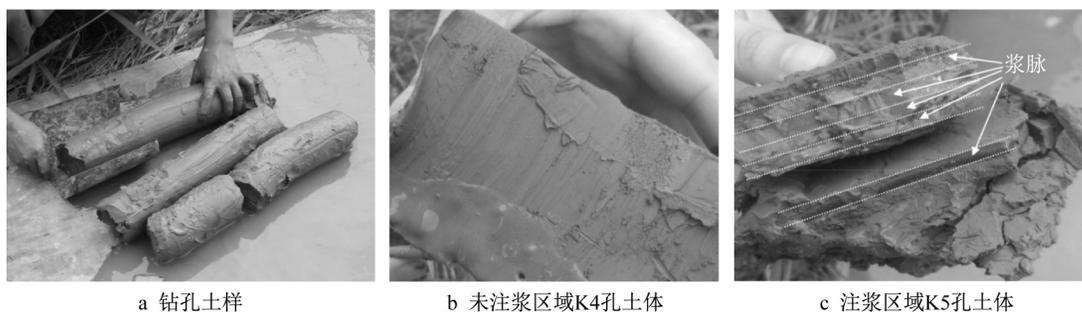
2.1 试样的制备和实验过程

为研究1.2节注浆参数条件下的浆土混合体宏观力学特性,揭示微扰动地层注浆对软土刚度和强度的影响,对现场试验区域的土体进行了室内 K_0 固结不排水伸长剪切三轴实验。实验所用土样通过标准贯入试验在现场钻取K4和K5两个钻孔进行获取。K4钻孔靠近CPT孔K6,位于未注浆区域;K5钻孔在CPT孔K2附近,位于注浆区域,如图2所示。现场获取的土样如图6所示。注浆区域K5孔中土体的浆液呈现明显的层状(图6),这是由劈裂注浆造成的。

三轴实验所用的3个标准试样的高度均为80 mm、直径均为39 mm,由取自K4孔深度17 m处、K5孔深度17 m和19 m处的土体所制备。三轴实验在同济大学的GDS应力路径三轴测试系统(图7)上进行。3个标准试件均在相当于17 m深度的应力水平下进行固结。上海淤泥质黏土的有效重度为 $8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,土体固结过程中的侧向水平压力系数取0.6。因此,土体 K_0 固结过程完成时的竖向有效应力为136.0 kPa,侧向有效应力为81.6 kPa。由于上海淤泥质黏土具有低渗透性的特点,整个固结过程持续了3 d才消除固结中产生的超静孔压,固结过程结束时的孔压测量值为170.0 kPa。由于注浆过程中浆液的压力增加了土体的横向土压力,所以采用增加三轴测试系统压力室围压、固定轴向压力的伸长剪切模式,剪切过程中采用压力控制,每小时增加5 kPa围压。剪切后的试样如图7所示。

2.2 实验结果分析

3个标准试样 K_0 固结不排水伸长剪切实验的应力路径如图8所示。分析图8可知,在相同的偏应力($q=\sigma_1-\sigma_3$, σ_1 为竖向应力, σ_3 为侧向应力)下,取自注浆区域K5孔的2个标准试样在剪切过程中产生的



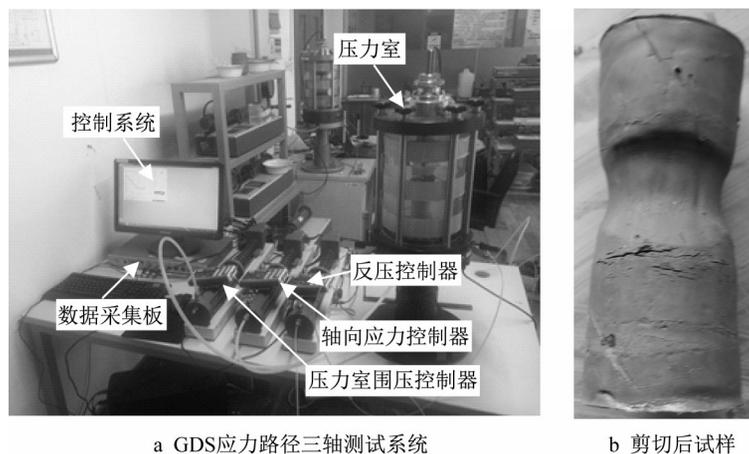
a 钻孔土样

b 未注浆区域K4孔土体

c 注浆区域K5孔土体

图6 现场钻孔土样照片

Fig. 6 On-site photo of soil sample from borehole



a GDS应力路径三轴测试系统

b 剪切后试样

图7 GDS应力路径三轴测试系统和剪切后试样

Fig. 7 GDS stress path triaxial testing system and sample after extensive shearing

孔压相差很小,取自未注浆区域K4孔的标准试样在剪切过程中则产生了高于K5孔试样的孔压,剪切过程中K4(17 m)试样与K5(17 m)试样平均有效应力($p'=(\sigma'_1+\sigma'_3)/2$)最大相差14.1 kPa。3个标准试样在剪切过程中偏应力 q 与轴向应变 ϵ_1 的关系如图9所示。分析图9可知:

(1) K_0 固结后的试样伸长剪切过程中轴向应变随着偏应力的增加而增长,且增长过程呈现显著的非线性特征,在较低偏应力增量范围内应变随应力增长缓慢,但是在较高偏应力增量范围内应变随应力增长迅速,伸长剪切的困难程度随着伸长过程的进行而不断降低,偏应力由0增加至180.0 kPa即可完成总变形量的15%~16%。

(2) K5钻孔的2个标准试样需要更高的偏应力增量才达到与K4钻孔标准试样相同的轴向应变,表明注浆加固区的土体具有更高的刚度。

(3) 不同深度处注浆加固区域的土体(K5(17 m)试样和K5(19 m)试样)的偏应力-应变曲线在形状和量级上基本一致,表明拔管注浆的均匀性,然而这并不能说明注浆土体具有均质性。该结果与前述现场CPT试验数据说明拔管注浆对提高土体的强度、刚度等性质非常有效。

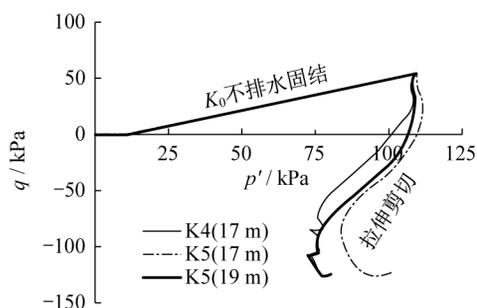


图8 K_0 固结不排水伸长剪切实验应力路径

Fig. 8 Stress path of K_0 consolidated undrained extensive shear triaxial test for soil samples from boreholes K4 and K5

土体的割线模量 E_{50} 可由图9中各曲线50%最大偏应力 q_{max} 以及该位置对应的应变 $\epsilon_{1,50\%}$ 进行确定,即

$$E_{50} = \frac{q_{max}}{2\epsilon_{1,50\%}} \quad (1)$$

3个标准试样 E_{50} 的计算值以及标准试样取样区域隧道建造前的土体割线模量如表3所示。由表3可知,K5(19 m)钻孔的 E_{50} 值为12 353.0 kPa,K4(17 m)钻孔的 E_{50} 值为7 800.0 kPa,与取样区域隧道建造前的土体 E_{50} 值5 300.0 kPa相比,注浆区域

土体(K5(19 m)钻孔)的割线模量提高了约132%,未注浆区域土体(K4(17 m)钻孔)的割线模量提高了约47%。

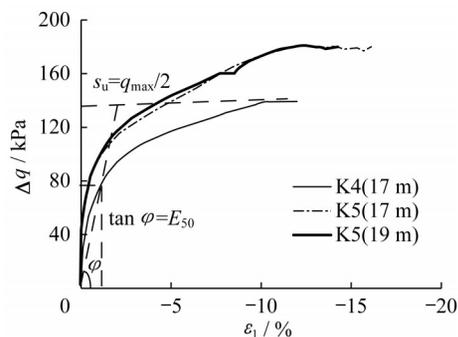


图9 剪切过程中偏应力与轴向应变关系

Fig. 9 Stress-strain curves of extensive shearing for three soil samples from boreholes K4 and K5

土体的不排水拉伸剪切强度 s_u 同样可由图9中各曲线最大偏应力 q_{max} 进行确定,即

$$s_u = 0.5 q_{max} \quad (2)$$

3个标准试样 s_u 的计算值以及标准试样取样区域隧道建造前的土体固结不排水抗剪强度如表3所示。由表3可知,K5(19 m)钻孔的 s_u 值为90.0 kPa,K4(17 m)钻孔的 s_u 值为71.0 kPa,与取样区域隧道建造前的土体固结不排水抗剪强度值42.5 kPa相比,分别提高了112%和67%。

表3 土体注浆前后的强度和刚度统计

Tab. 3 Strength and stiffness of soil before and after grouting

点位	K4(17 m)	K5(17 m)	K5(19 m)	隧道建造前
E_{50} /kPa	7 800.0	11 789.0	12 353.0	5 300.0
s_u /kPa	71.0	90.0	90.0	42.5

由以上分析可以看出,淤泥质黏土的强度和刚度因注浆得到了极大程度的提高,注浆区域土体强度提高了约112%,刚度提高了约132%,受注浆压力的传递作用,注浆区域附近的土体强度和刚度也得到一定程度的提高。

3 侧向注浆加固对隧道横向变形的影响

微扰动注浆根据实时监测的收敛变化值进行单孔少量多次注浆,单次注浆使直径的横向收敛缩小不超过隧道直径的0.5%,通过分区分阶段的注浆方式提高土体侧向抗力,达到阻止隧道继续变形的目的。隧道的直径横向收敛是现场用于判断注浆孔先后注浆顺序和评价注浆效果的重要指标之一。

每隔 10 环左右对隧道的直径横向收敛进行长期监测,如图 10 所示。堆载事故发生后,2010 年 6 月至 2011 年 4 月期间首先对变形较大的第 500 环到第 600 环管片采取了内张钢板的结构加固方式。由图 10 中的横向收敛监测值可以看出,钢板加固后的管片的变形随着时间的增长维持在一个比较稳定的状态,但收敛比值较高,这表明内张钢板的结构补强措施可以阻止隧道继续变形,但无法恢复隧道结构既有大变形。2014 年 5 月 29 日开始对第 350 环到第

450 环管片附近的土体实施注浆。2014 年 7 月 8 日注浆结束后隧道直径的横向收敛比值($\Delta D/D$)如图 10 中标注“注浆后”的曲线所示,相比于图中内张芳纶布补强结构后的收敛监测值(图 10 中标注“管片张贴芳纶布加固后”的曲线),注浆能显著降低隧道的直径横向收敛,收敛累计值平均降低约 24%,即对隧道的横向收敛有一定程度的恢复。综上,通过注浆加固隧道侧向土体对隧道横向收敛控制的方式优于内张芳纶布、钢板的结构补强措施。

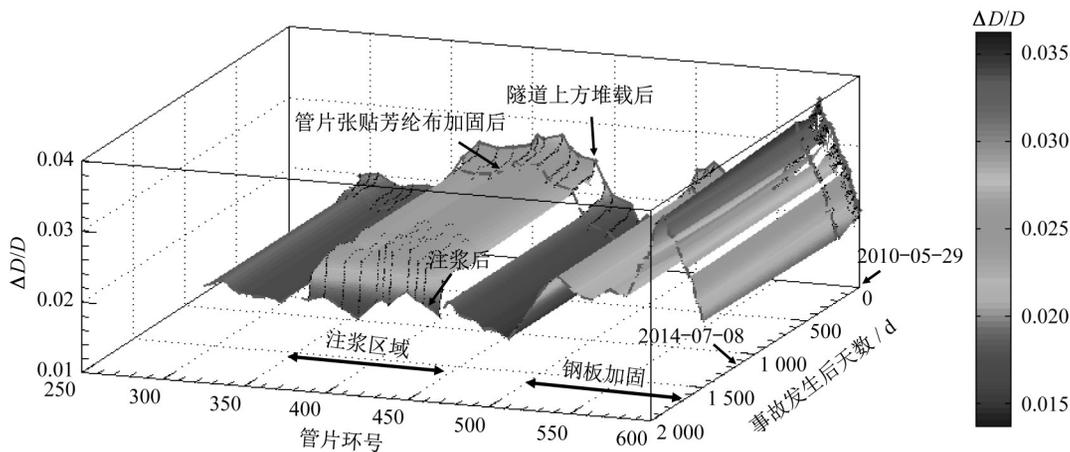


图 10 隧道在整个加固期间的横向变形

Fig. 10 Tunnel horizontal convergence evolution over in full repair period

虽然注浆能显著降低隧道直径的横向收敛,对隧道横向收敛有一定程度的恢复,但注浆效率是必须要考虑的问题,在确定的注浆参数下,相对较少的注浆量能对隧道横向收敛的恢复起到较好的效果才是经济的、合理的。本文依据统计得到的注浆量与监测得到的隧道直径横向变形数据分析注浆效率。图 11 为归一化收敛比值和相对注浆量的关系曲线。分析图 11 可知:

(1)不同管片的归一化收敛比值随对应该管片的注浆量的增加而减小。

(2)归一化收敛比值与相对注浆量可拟合成线性关系,即

$$\frac{\Delta D}{\Delta D_{\text{注浆前}}} = 1 - 0.0206(V_{\text{浆}}/\pi r^2) \quad (3)$$

式中: ΔD 为注浆后监测到的隧道管片的横向收敛; $V_{\text{浆}}$ 为浆液的累计体积; r 为隧道的半径,拟合公式的相关系数为 0.86,相关性较强。

(3)当相对注浆量为 6.8,即隧道周围的土体注入约 205 500 L 浆液时,由拟合公式计算的监测管片的 $\Delta D/\Delta D_{\text{注浆前}}$ 平均值约为 85.98%,即注浆使得直径的横向收敛降低了约 14.02%。

在注浆恢复隧道横向收敛之前,计划注浆区域的管片已经经过内张芳纶布的补强措施,提高了管片的刚度,因此可能是造成注浆效率低的原因。因此改变张贴芳纶布和注浆施工的顺序,在张贴芳纶布之前先注浆,可能对注浆效率的提升具有一定的帮助。

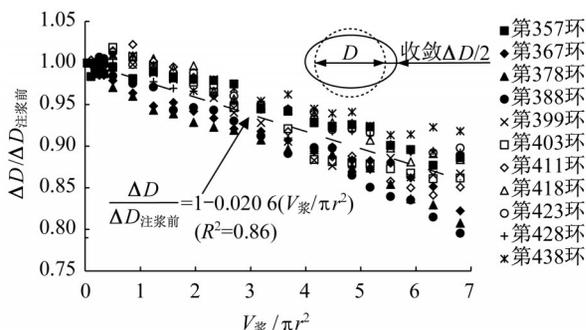


图 11 归一化收敛值与相对注浆量的关系

Fig. 11 Relationship between normalized convergence value and relative grouting volume

4 讨论

上海第4层淤泥质黏土具有饱和、流塑、土质均匀、含有机质、夹少量粉砂团块等特点,属高压缩性土。在隧道建造以前,静力触探试验的结果(图4)也表明土质呈现比较好的均匀性,但在注浆后静力触探试验结果(图5)反应了注浆后的土体呈现显著的非均匀性,在位于注浆区域K5钻孔中的土体中观察到的浆体分层特点(图6)也证实了注浆后的土体呈现出非均匀性的特点。下面就微扰动注浆导致的加固效果的非均匀性展开讨论。

根据张忠苗等^[10]的研究,在注浆压力为0.5 MPa,水泥浆液水灰比为0.8时,浆液在萧山黏土中的扩散方式是压密为主劈裂为辅。微扰动注浆采用0.5 MPa的注浆压力,水玻璃浆液和水灰比为0.8的水泥浆液,根据淤泥质黏土的特点,浆液的扩散方式应该兼具压密和劈裂。由于注浆压力在注浆刚开始时较小,浆液首先在出浆口附近积聚,对出浆口附近土体进行挤密,随着注浆压力的不断增大,注浆压力达到土体的启劈压力,浆液开始沿着平行于小主应力的方向在土体中扩散,固化形成近似平行于小主应力方向的浆脉。微扰动注浆从隧道底部开始,以 $10\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的向上拔管速度对5 m高度范围内的土体进行加固,因此相邻浆脉之间会呈现明显的分层特征,注浆完成后形成一个近似的浆脉圆柱体,如图12所示。这种分层特征刚好解释了现场注浆区域K5孔观察到的浆体分层特征(图6)。浆脉周围的土体会在注浆压力的作用下压密地层,浆脉末端附近的土体会受到注浆压力的挤压作用,1.3节中K1和K3孔的锥尖阻力平均值正是由于这种挤压作用而得到提高。在浆脉扩展方向上,浆脉厚度由出浆口处向浆脉尖端处逐渐衰减,其周围地层的压密程度也会沿着浆脉扩展方向逐渐衰减^[11-12],所以注浆加固效果是非均匀的,导致了静力触探试验的锥尖阻力值的离散型分布(图5)。

研究表明当单孔注浆量增加到一定程度后,浆脉厚度在浆脉的扩展方向上的衰减会变得不明显^[12]。因此,在保证单次注浆对管片直径横向收敛的改变不超过隧道直径0.5%的前提下,适当增加单孔注浆量,可以增加注浆效果的均匀性,有利于控制隧道的横向收敛。适当增加相应管片附近的注浆孔的单孔注浆量,可能会对提高注浆效率有一定的帮助,但需要进一步研究单孔注浆量与注浆效率之间的关系。

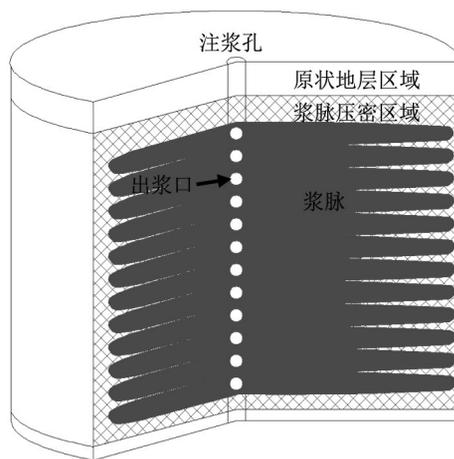


图12 劈裂-压密注浆效果示意图

Fig. 12 Schematic of split-compaction grouting effect

5 结论

盾构隧道侧向微扰动注浆是一个极其复杂的问题,且现场影响因素众多,仅依靠理论、数值分析,难以掌握土体的注浆加固效果和机理。本文通过现场静力触探试验,并对现场注浆加固后的土体取样进行室内 K_0 固结不排水伸长剪切实验,以及基于注浆前后过程中监测的隧道横向收敛对注浆加固效果进行了分析,得出以下主要结论:

(1)注浆前后的静力触探试验表明,注浆加固区的锥尖阻力值提高明显,且具有较高的离散性,注浆加固效果随着深度的变化呈现局部效应、非均匀性;采用1.2节中的注浆参数,在淤泥质黏土中注浆影响半径在0.6 m左右,且距注浆孔越近注浆加固效果越明显。

(2)在相同的偏应力下对进行固结不排水实验后的标准试样进行伸长剪切时,注浆加固区域的土样需要更高的偏应力增量才能达到与注浆压密区域土样相同的轴向应变,表明注浆加固区的土体具有更高的刚度。

(3)建立了可描述注浆量与注浆前后收敛值比值关系的方程,可根据注浆量粗略估算注浆对隧道横向收敛的恢复。本案例中累计体积为205 500 L的浆液可使隧道横向收敛平均降低约14.02%,注浆效率相对较低。在保证单次注浆对管片直径横向收敛的改变不超过隧道直径0.5%的前提下,适当增加单孔注浆量,可以提高注浆效果的均匀性,可能会利于注浆效率的提升。

必须指出的是,本文进行的上述实验是在完成隧道侧向地层注浆后1个月开展的,所获得数据是

基于龄期为1个月的浆土混合体试样,但随着时间的增长,浆体会老化,隧道直径的收敛受浆土混合体抗力不足的影响,会出现一定程度的反弹。因此,注浆对隧道变形的长期效果是工程中必须关注的问题,开展浆液龄期对加固效果的长期效应影响研究是后续的研究方向之一。

作者贡献声明:

赵 帅:完成实验数据分析及论文撰写。

张东明:提出论文框架,指导数据分析,论文修改。

邵 华:论文修改,提供现场监测数据。

黄宏伟:论文修改。

参考文献:

- [1] 陈兴年, 刘国彬, 侯学渊. 挤压注浆在上海地区的发展探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 487.
CHEN Xingnian, LIU Guobin, HOU Xueyuan. Discussion on compaction grouting in shanghai area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(3): 487.
- [2] 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.
WANG Rulu, ZHANG Dongmei. 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.
- [3] 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.
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.
- [4] ZHENG G, PAN J, CHENG X, *et al.* Use of grouting to control horizontal tunnel deformation induced by adjacent excavation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(7): 1.
- [5] 邵华, 黄宏伟, 张东明, 等. 突发堆载引起软土地铁盾构隧道大变形整治研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 1036.
SHAO Hua, HUANG Hongwei, ZHANG Dongming, *et al.* Case study on repair work for excessively deformed shield tunnel under accidental surface surcharge in soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6): 1036.
- [6] 王如路, 陈颖, 任洁, 等. 微扰动注浆技术在运营隧道病害治理及控制中的应用[J]. 地下工程与隧道, 2013 (S1): 52.
WANG Rulu, CHEN Ying, REN Jie, *et al.* Application of micro-disturbance grouting technology in disease treatment and control of operating tunnel [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2013 (S1): 52.
- [7] 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.
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.
- [8] 邓指军. 双液微扰动加固注浆试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(S1): 1344.
DENG Zhijun. Experimental study of two-shot micro-disturbance reinforced grouting [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(S1): 1344.
- [9] ZHANG D, ZHANG D, SOGA K, *et al.* Rehabilitation of overdeformed metro tunnel in shanghai by multiple repair measures [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(11): 1.
- [10] 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]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1818.
ZHANG Zhongmiao, ZOU Jian, HE Jingyi, *et al.* Laboratory tests on compaction grouting and fracture grouting of clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(12): 1818.
- [11] 张庆松, 张连震, 刘人太, 等. 基于“浆-土”界面应力耦合效应的劈裂注浆理论研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2): 323.
ZHANG Qingsong, ZHANG Lianzhen, LIU Rentai, *et al.* Split grouting theory based on slurry-soil coupling effects [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2): 323.
- [12] 张连震, 李志鹏, 张庆松, 等. 基于土体非线性压密效应的劈裂注浆机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1483.
ZHANG Lianzhen, LI Zhipeng, ZHANG Qingsong, *et al.* Split grouting mechanism based on nonlinear characteristics of compression process of soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1483.