

文章编号: 1007-2993(2026)02-0306-11

叠线隧道并行既有运营线注浆隔离 加固试验与实测分析

陈佳¹ 于游² 杨平² 朱俊¹ 王加辉² 樊邵威²

(1. 中铁五局集团第六工程有限责任公司, 重庆 401147; 2. 南京林业大学土木工程学院, 江苏南京 210037)

【摘要】 南京地铁 6 号线与既有 4 号线小净距、长距离并行段拟采用注浆加固隔离墙工法, 以保证既有隧道安全运营, 为验证该工法的可行性, 选择地层分布有代表性的试验区, 对加固工法进行了注浆工艺及浆液配比研究、深层土体现场注浆试验、取芯检查与注水试验、饱和单轴抗压强度试验、土压力与深层土体水平位移监测等综合研究。结果表明: 针对本工程地层宜选用膨润土水泥浆及速凝高强水泥基浆液, 采用隔孔跳打、间隔循环注浆法, 不同深度的地层分阶段注浆; 被注浆区的侧向加固范围 ≥ 2.70 m, 可作为正式注浆施工的控制间距; 注浆期间对既有有线相同水平距离处产生的土压力为 0.508 MPa, 略大于设计要求; 土体水平位移最大值为 4.64 mm, 满足设计要求; 注浆加固后地层由极为破碎转为中等完整—较完整, 由中等透水性地层转为微透水性地层; 检查孔所取芯样饱和单轴抗压强度均在 1 MPa 以上。研究表明采用本注浆工艺与参数用于保护临近既有运营线的注浆隔离加固施工是可行的, 可为类似工况下的注浆隔离加固提供参考。

【关键词】 叠交隧道; 近距离; 并行运营隧道; 注浆加固试验; 土压力; 位移

【中图分类号】 U455

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0068

Grouting isolation and reinforcement test and measurement analysis of the parallel existing operating line of the overlapping tunnel

CHEN Jia¹ YU You² YANG Ping² ZHU Jun¹ WANG Jiahui² FAN Shaowei²

(1. China Railway Fifth Bureau Group Sixth Engineering Co., Ltd., Chongqing 401147, China; 2. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

【Abstract】 To verify the feasibility of ensuring the safe operation of the existing tunnel by applying the grouting reinforcement isolation wall method in the small-clearance, long parallel section between Nanjing Metro Line 6 and the existing Line 4, a representative test area was selected based on similar stratum distribution. Studies and tests were conducted on the reinforcement method, including grouting process and mix ratio optimization, in-situ deep soil grouting, coring inspection and water injection tests, saturated uniaxial compressive strength tests, as well as earth pressure and deep soil horizontal displacement monitoring. The results indicate that for the strata in this project, it is advisable to employ bentonite-cement slurry and rapid-setting high-strength cement-based slurry. The grouting operation should adopt the methods of "skip-hole drilling" and "cyclic grouting in intervals", with staged grouting for formations at different depths. The lateral reinforcement extent of the grouted zone reaches ≥ 2.70 m, which can serve as the control criterion for formal grouting construction. During grouting, the earth pressure induced at the equivalent horizontal distance from the existing line was 0.508 MPa, slightly exceeding the design requirement. However, the maximum horizontal displacement of the soil was 4.64 mm, satisfying the design requirements. After grouting reinforcement, the stratum changed from extremely fragmented to moderately complete to relatively complete, and from medium permeable stratum to slightly permeable stratum, and the saturated uniaxial compressive strength of the core samples taken from the inspection hole is more than 1 MPa. Therefore, it is feasible to use this grouting process and parameters for the grouting isolation and reinforcement construction near the existing operating lines. This can provide a reference for the grouting isolation and reinforcement under similar working conditions.

【Key words】 overlapping tunnels; close range; parallel operation of tunnels; grouting reinforcement tests; earth pressure; displacement

基金项目: 国家自然科学基金项目(42101127)

作者简介: 陈佳, 男, 1984 年生, 大学本科, 高级工程师, 主要从事地下工程施工工作。E-mail: 281900264@qq.com

通信作者: 杨平, 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事环境岩土与地下工程等研究。E-mail: yangping@njfu.edu.cn

0 引言

各大城市地下交通网络日趋完善,地铁隧道双线甚至多线近距离、长距离平行延伸的场景愈发普遍。为防止新建隧道施工影响既有运营线路的安全,施工中常用注浆法对多线平行段间的软弱地层进行加固隔离^[1-3]。为评估注浆施工对既有运营隧道的施工风险,选择四线近距平行段开展预注浆加固试验,对正式施工中的参数调整尤为重要。

采用注浆技术保护既有地铁隧道的研究较为丰富,注浆技术可用于整治已建盾构隧道横椭圆变形^[4],还可以用于恢复盾构隧道的沉降与收敛变形^[5],在更换盾尾刷时,管片变形和地表沉降控制也可采用注浆技术^[6]。邓皇适等^[7]、江 杰等^[8-9]研究了以同步注浆控制盾构机曲线段掘进时既有隧道管线的变形规律;应宏伟等^[10]指出采用 MJS 加固双线顶管与下卧地铁隧道间的粉砂土,可大大减小对既有线路的二次扰动。在对小净距叠交线路施工影响的研究上,邢慧堂等^[11]讨论了叠交隧道在软弱地层盾构掘进时隧道周边土体预先加固的必要性;李兆平等^[12]、Ding 等^[13]提出在上层隧道穿越下层隧道之前,对中间土体采用注浆处理可有效控制叠交隧道施工的相互扰动。针对 4 条以上多线叠交的特殊工况,既有研究^[14-17]表明,对既有线路周围土体进行径向与环向注浆加固可显著减小叠交隧道施工后既有线路地表或地上构筑物变形。在注浆加固破碎岩体的力学性能研究上,

李召峰等^[18]、Sang 等^[19]通过对注浆加固试件的力学测试,从细观和宏观两个方面探讨了注浆加固对破碎岩体结构强度与变形抗力的影响,并将结果应用于指导工程实践。

国家规范^[20]给出了因后期施工导致既有隧道结构的水平位移 $\leq 3 \sim 5 \text{ mm}$;隧道结构沉降 $\leq 3 \sim 10 \text{ mm}$ 的控制标准。

针对在富水破碎岩体中临近既有隧道的预注浆加固,已有成果多局限于新旧隧道线路交叉时,对既有隧道保护的研究,而在四线近距离平行的工况下,尤其是新建隧道为上下叠线的特殊工况下,已有成果对采用注浆隔离墙进行既有线路保护的研究较少。本文依托南京地铁 6 号线盾构掘进工程,验证了上述工况下强风化富水岩层的预注浆加固效果,为今后临近既有运营线路的盾构掘进预注浆加固工程,提供材料配比和实测方法参考。

1 工程概况

1.1 区间概况

南京地铁 6 号线岗子村站—花园路站区间与 4 号线岗子村站—蒋王庙站区间近间距长线并行,6 号线叠线段位于 4 号线斜下方,两区间水平净距为 6.79 ~ 7.45 m,叠线区间竖向净距 2.12 ~ 5.97 m,叠线长度约为 1260 m,4 号线、6 号线近距平行段平面及剖面分布如图 1、图 2 所示。

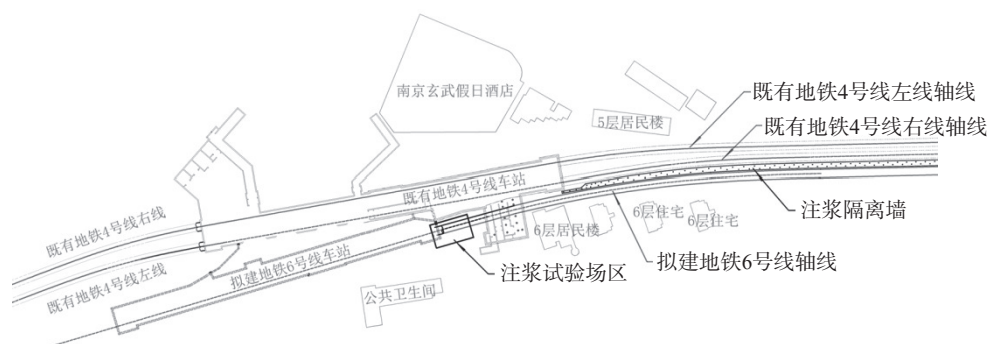


图 1 注浆试验区与位置平面图

Fig. 1 Grouting test area and location plan

6 号线叠线盾构隧道区间沿线地层,自上而下主要为:①-1 层杂填土;①-2 层素填土;②-1b2 粉质黏土;局部分布流塑状②-2b4 粉质黏土、②-2c3 黏质粉土、软塑状②-3b2-3 粉质黏土;③-2b1-2 粉质黏土;③-4e2 含砾粉质黏土层; δ -1 全风化闪长岩;碎石状 δ -2-2 强风化闪长岩; δ -3 中等风化闪长岩,局部分布较破碎 δ -3-1 中等风化闪长岩。6 号线叠线段主要经过 δ -1、 δ -2-2、 δ -3 复合富水破碎岩土层。

该区域含水层有潜水含水层和基岩裂隙含水层。潜水含水层分布于粉质黏土层以上,对钻孔与注浆施工无明显影响;基岩裂隙含水层主要位于风化闪长岩地层,仅在部分区域连通潜水层,但由于粉质黏土层形成隔水顶板,使该区域基岩裂隙水有承压性,场地内承压水头最高达 16.5 m,高于顶板 2.7 m,位于钻孔 ZK-4 处,其余钻孔承压水头均高于隔水顶板 1.5 m 以上。

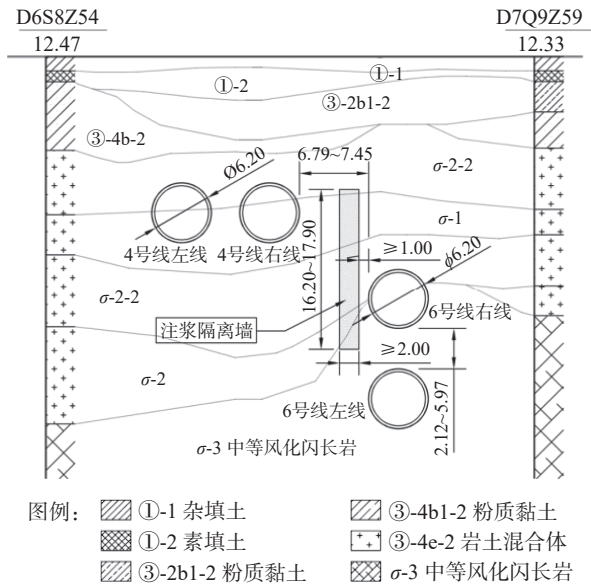


图2 南京地铁6号线与4号线近距离平行段剖面图
(单位:m)

Fig. 2 Section view of the near-distance parallel section of Nanjing Metro Line 6 and Line 4 (Unit: m)

1.2 施工特点

6号线叠线盾构掘进中存在如下施工难度和风险:

(1)基岩裂隙水丰富,地层较为破碎,在刚度不对称地层^[21]中施工,掌子面易出现突水、涌砂和坍塌等问题,增加施工难度,延缓盾构掘进速度。

(2)盾构掘进引起的地层损失和地下水位下降易导致地层塑性流动,影响既有4号线区间结构及列车运行安全。

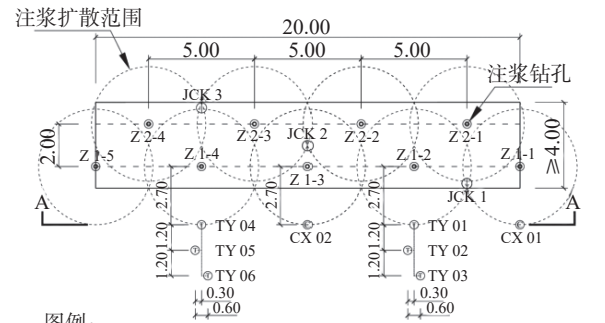
新旧线路交叉工况下,既有线路位移控制的重点在交叉附近的少数管环;而长距离平行于既有线工况下,较破碎风化闪长岩零星分布,对较大范围内注浆施工连续性、结石体强度的均匀性、管节间的相对位移控制提出了更高要求。

2 注浆试验

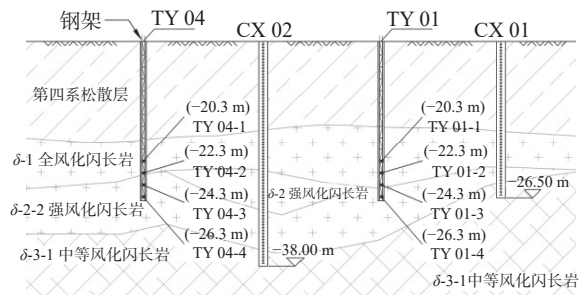
针对上述情况,结合相关数值模拟经验^[22],决定采用预注浆加固处理叠线段与既有中间层的 δ -1全风化、 δ -2-2强风化和 δ -3-1中等风化闪长岩地层,形成一道约2.0 m厚的注浆隔离墙来减小盾构掘进对既有4号线的影响。在正式施工前,在4号线车站附近(见图1)进行地面注浆加固试验,为正式注浆加固参数选取提供依据。

2.1 钻孔设置

各类钻孔布置如图3(a)所示,试验场区内注浆钻孔采用梅花形布置双排孔,为确保隔离墙有效厚度,钻孔排距取2.0 m,同排相邻钻孔沿长度方向间距



图例:
□ 注浆有效区域 ⊙ Z1-1 注浆钻孔 1-1 ⊙ CX01 测斜孔 1
○ 注浆扩散范围 ⊙ JCK1 检查孔 1 ⊙ TY01 土压力监测孔 1
(a) 注浆试验区钻孔及监测孔平面布置图(单位: m)



(b) A-A 剖面沿深度布置示意图

图3 注浆钻孔及监测孔布置

Fig. 3 Grouting drilling and monitoring hole layout

5.0 m,有Z1-1—Z1-5、Z2-1—Z2-4,共9个注浆孔。

注浆完成后,在图3(a)所示的试验区相应位置打设3个检查孔(JCK1—JCK3),用以检查在3个注浆孔加固范围交界点,试验区中心和外侧的注浆改善效果是否有差异。

注浆钻孔分为套管段和注浆段两部分,上段为钢制套管段,用于限制浆液侧向扩散,保证注浆压力向深处传递;下段为裸孔注浆段,浆液在此段被压入周围地层,形成注浆隔离墙。

套管段钻孔外径为159 mm,内放 $\phi 127$ mm \times 6.0 m钢制地质套管,穿过第四系松散地层,下端进入全风化闪长岩1.0 m,

由于各钻孔处的富水全风化闪长岩顶面埋深不同,套管段下放深度为21.18~22.94 m;裸孔注浆段孔径为89 mm,进入中等风化完整基岩1.0 m,由于完整基岩顶面起伏,注浆段孔底埋深为36.72~40.50 m。

每个注浆孔的注浆段根据图2所示全风化闪长岩地层不同破碎程度分3小段,岩帽段(注浆第一段)段长2.05~2.68 m;岩帽段以下分为两个注浆小段,第二注浆段段长7.42~9.57 m,第三注浆段段长6.94~7.56 m。分段注浆示意图如图4所示。

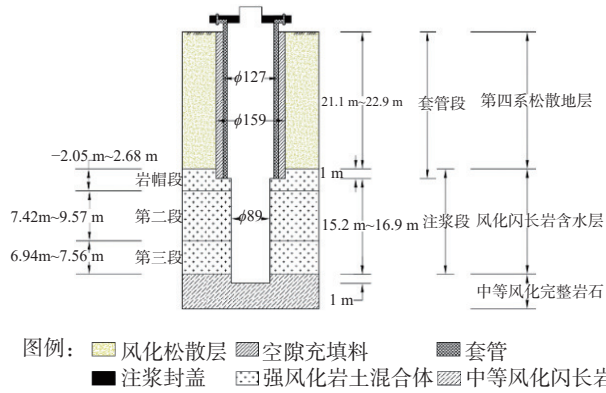


图 4 注浆钻孔结构示意图
Fig. 4 Schematic diagram of grouting hole drilling structure

2.2 钻孔施工及套管下放

采用水泥-水玻璃双液浆封固地质套管与钻孔间的环形空间。套管封固材料以水灰质量比 1 : 1

的水泥浆为基础,掺入早强剂、稳定剂和其他改性剂配制而成,注浆时多个钻孔一次连续充填。套管封固浆液除应满足泵送要求外,其他强度参数与配比如表 1 所示。钢制套管下放至预定位置后,立即使用封固材料填充套管与钻孔间的环形空间,固管硬凝时间不少于 48 h。

2.3 注浆材料选择与配方

注浆试验段施工中主要采用膨润土水泥浆及速凝高强水泥基浆液(塑性早强浆),根据膨润土水泥浆及塑性早强浆不同配比的试验结果,得出注浆施工所用浆液的最佳配比,如表 2、表 3 所示。

根据不同注浆段的施工要求、地层变化和水压情况,施工中采用不同的浆液类型:岩帽段及施工中漏浆严重的区段采用塑性早强浆,其余地层采用膨润土水泥浆与塑性早强浆交替灌注。

表 1 套管段封固材料配比表
Tab. 1 Ratio table of sealing materials for casing sections

水/(L·m ⁻³)	水泥/(kg·m ⁻³)	水玻璃/(L·m ⁻³)	浆液密度/(g·m ⁻³)	浆液黏度/s	7 d固结强度/MPa	固结收缩率/%	析水率	初凝时间/h	终凝时间/h
480	50	25	1.50 ~ 1.52	18 ~ 20	≥ 2.00	≤ 3.5	≤ 5%	0.5 ~ 1.0	6 ~ 10

表 2 塑性早强浆配比表
Tab. 2 Ratio of plastic early strength slurry

水/(L·m ⁻³)	水泥/(kg·m ⁻³)	水玻璃/(L·m ⁻³)	食盐/(kg·m ⁻³)	浆液密度/(g·m ⁻³)	浆液黏度/s	28 d固结强度/MPa	固结收缩率/%	初凝时间/h	终凝时间/h
450 ~ 550	530 ~ 580	25 ~ 30	3.75	1.51 ~ 1.52	16 ~ 23	≥ 1.80	≤ 4.5	0.5 ~ 0.8	6 ~ 10

表 3 膨润土水泥浆配比表
Tab. 3 Bentonite cement slurry ratio table

水/(L·m ⁻³)	水泥/(kg·m ⁻³)	水玻璃/(L·m ⁻³)	膨润土/(kg·m ⁻³)	食盐/(kg·m ⁻³)	浆液密度/(g·m ⁻³)	浆液黏度/s	28 d固结强度/MPa	固结收缩率/%	初凝时间/h	终凝时间/h
860 ~ 890	160 ~ 200	20 ~ 50	250 ~ 340	40	1.26 ~ 1.28	25 ~ 32	≥ 0.30	≤ 4.5	0.5 ~ 1.0	6 ~ 10

注:当注浆压力较低时,采用较高的水玻璃用量、较低的水泥用量;当注浆压力较高时,若浆液难以注入,采用较高的水玻璃用量、较低的水泥用量;当需要调整浆液的黏度时,首先考虑调整水玻璃的用量,然后考虑调整水泥的用量;破碎带注浆时,应当适当提高水泥用量。

2.4 注浆施工工艺与工序

待环形空间内的固管充填材料形成强度以后,再安装止浆机具止浆并检验效果,符合要求即可开始注浆施工,注浆过程中严密观测注浆压力及流量。设置注浆压力警戒值 0.80 MPa、极限值 1.20 MPa,超过极限压力,立即停泵检查。

注浆过程中出现下列情况之一时,认为达到注浆结束标准:

- (1) 单次单孔注浆量达到 3.0 m³;
- (2) 达到注浆分段设计深度;
- (3) 注浆压力连续 10 min 下降不超过 0.01 MPa

且连续 30 min 下降不超过 0.02 MPa;

- (4) 注浆孔或监测孔发生地面返浆;
- (5) 地面发生隆起、附近管线破裂或监测数据异常。

所有注浆孔均采用分段下行、跳孔注浆方式进行施工,单个注浆孔注浆间隔时间不应少于 6 h。注浆施工中,应根据各钻孔的地层实际揭露情况灵活划分注浆段。固管段与注浆段的浆液类型选用情况见表 4。

单次注浆结束后,采用孔口压盖注浆器止浆,通过压盖器上的压力表读数判断浆液压力消散情况,为

表4 注浆段浆液类型及封水作用

Tab. 4 Slurry type and water sealing effect in grouting section

序号	阶段名	空间部位	浆液类型	注浆压力/MPa	作用
1	固管段	从地面至进入全风化岩1 m	复合塑性早强浆	0.52 ~ 0.77	防止浆液向非目标层渗入; 防止注浆过程中浆液沿钻孔发生冒浆
2	岩帽段	固管段下2 m	塑性早强浆	0.58 ~ 0.99	阻止或缓解下阶段浆液 向地面返浆
3	风化带分段注浆	岩帽段底至中等风化顶部 1 ~ 2 m	膨润土-水泥浆及塑性早强浆	0.82 ~ 1.20	充填地层空隙, 提高破碎带完整性、抗渗性和稳定性

进一步选择注浆孔位提供依据。

2.5 注浆过程地层土压力与变形实测

为验证注浆施工 δ -1 全风化闪长岩、 δ -2-2 强风化闪长岩、 δ -3-1 中等风化闪长岩在注浆后的地层改善效果, 试验段注浆期间及注浆后连续监测土压力及土体水平位移。

(1) 地层土压力监测

为确定浆液压力在富水破碎地层的横向传递范围, 在注浆试验区边缘一定距离外打设钻孔, 并布设土压力计以监测注浆期间注浆压力的发展情况。

由于注浆隔离墙施工完成后, 距既有 4 号线最近距离不足 2.7 m, 因此在前文 2.1 节所述钻孔设置条件下, 形成有效厚度为 2.0 m 的注浆隔离墙所需注浆加固半径最小应为 2.7 m。因此在场区相应待加固地层布设 2 组共 6 个土压力监测孔 TY01—TY06。

第一组土压力监测孔, TY01 距外侧注浆孔 2.7 m, TY02、TY03 依次向外远离试验场区 1.20 m, 为防止近处的土压力监测孔对较远处的监测孔产生遮蔽效应, TY02 向场区长边方向偏左 0.30 m, TY03 向场区偏右 0.30 m。TY04—TY06 位置关系类比 TY01—TY03, 土压力监测孔布设示意图如图 3(a) 所示。

当 TY03 和 TY06 的土压力有较大增长时, 认为注浆施工已经侵入长距离平行段隧道 1 m 保护限界, 影响到既有隧道结构。每个土压力监测孔各埋设 4 个量程为 1.000 MPa, 精度为 0.08% F·S 的振弦式土压力监测盒, 布置深度分别为 -20.30, -22.30, -23.30, -26.30 m, 如图 3(b) 所示。

埋设土压力盒时, 先在土体中进行泥浆护壁钻孔, 并将土压力传感器固定在钢架上, 然后将土压力盒随钢架一道置入指定深度, 过程中通过钢架始终保持土压力盒面向注浆钻孔。下放到指定深度后, 向钻孔中回填级配砂, 钻孔中回填砂密实后可进行土压力测试。

(2) 深层土体水平位移监测

为掌握注浆试验导致既有 4 号线隧道管片发生

的水平位移情况, 在试验场区边缘布设两个深层土体水平位移监测孔 CX01、CX02, 距靠近隧道一排注浆钻孔 2.70 m, 如图 2(a) 所示。土压力监测孔与土体水平位移监测孔间隔设置。测斜管外径 70 mm, 管内每隔 0.5 m 设一个测斜点, 以最顶部测点为基准值。两个测斜管底端均进入中等风化岩层 1.0 m 左右。因地层条件分布变化, CX01 终孔深度为 26.50 m, CX02 终孔深度为 38.00 m, 如图 2(b) 所示。

注浆施工期间, 土压力每 0.5 h 远程记录一次; 水平位移早晚各记录一次。

3 注浆效果检验

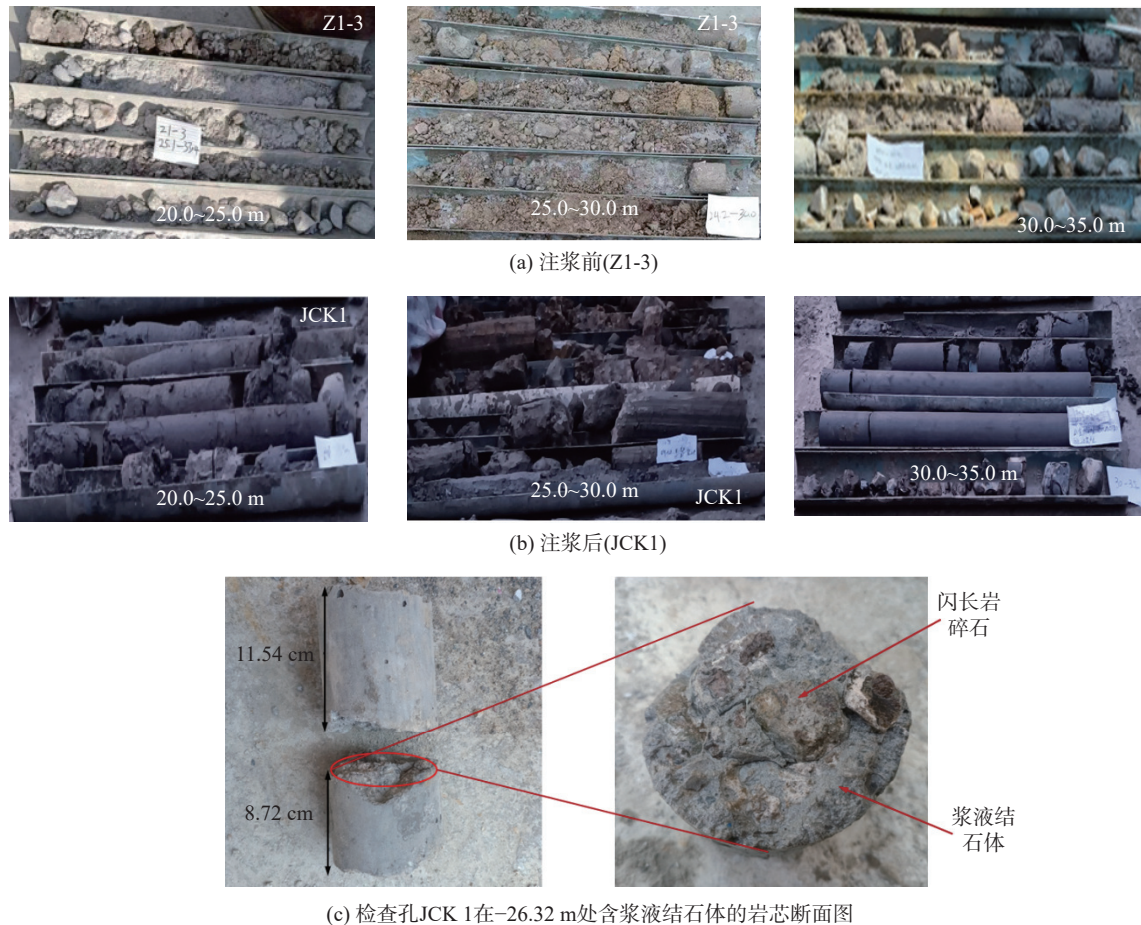
注浆孔施工完成 28 d 后, 按图 2(a) 所示位置打设注浆效果检查孔 JCK1—JCK3。以钻孔取芯结果检验被加固区的加固效果; 以注水试验结果计算被加固区的渗透系数。

3.1 检查孔钻孔取芯

3 个检查孔终孔深度及取芯深度均为 39.93 m。注浆加固前, 钻孔 Z1-3 处全风化和强风化闪长岩段所取岩芯极破碎, 采芯率低, 难以发现相对完整岩芯, 如图 5(a) 所示。注浆加固后, JCK1 所取岩芯多呈短柱状, 相对完整岩芯占比和采芯率明显提高, 如图 5(b) 所示; 破碎岩块得到结石体有效黏结, JCK1 在 26.32 m 处所取岩芯断面如图 5(c) 所示。注浆加固前后 Z1-1、Z1-3、Z2-4 与 JCK1—JCK3 所取岩芯数据对比如表 5 所示。

JCK1 钻孔取芯的对比图片与注浆后的岩芯断面图表明注浆加固效果良好, 破碎岩体得到包裹和黏结, 裂隙得到有效填充。JCK2、JCK3 同样在注浆加固段取得短柱状、表面光滑的胶结岩芯样本, 采芯率和 RQD 值较注浆前显著提高。结合地勘报告和 Z1-1 采芯信息, 可知在 JCK1 处中等风化闪长岩埋深较浅, 注浆加固前 25.0 ~ 35.0 m 按 RQD 值属较破碎等级, 注浆加固施工结束深度较浅, 因而 RQD 值提升幅度较小。

三个检查孔钻探取芯后, 取结石体岩芯进行饱和单轴抗压强度试验, 数据如表 5 所示。三组抗压



(c) 检查孔JCK 1在-26.32 m处含浆液结石体的岩芯断面图

图 5 注浆前后钻孔岩芯对比照片

Fig. 5 Comparison photo of drilled core before and after grouting

表 5 注浆前后岩芯数据对比

Tab. 5 Comparison of core data before and after grouting

工况	钻孔	采芯率/%	20.0~25.0 m RQD值/%	25.0~30.0 m RQD值/%	30.0~35.0 m RQD值/%	岩石完整程度定性划分	抗压强度/MPa
注浆前	Z1-1	65.41	< 10	11.6	23.2	较破碎	0.28
	Z1-3	78.39	< 10	< 10	14.6	极破碎	
	Z2-4	73.05	< 10	< 10	17.5	破碎	
注浆后	JCK1	87.56	62.4	67.1	78.4	中等完整	1.12
	JCK2	89.62	58.8	75.7	84.2	较完整	1.67
	JCK3	92.25	66.2	79.6	80.7	较完整	1.34

强度数据均不高,原因是所取浆液结石体试样以膨润土水泥浆胶结体为主,该浆液的主要作用在于封堵地层裂隙,水泥用量较低;而且现场钻孔取样采用泥浆循环、回转钻进,对结石体有一定损伤;泥浆循环也导致所取岩芯非原状,因此水泥浆结石体的强度小于传统^[22-23]水泥浆结石体。

3.2 检查孔注水试验

场区内风化闪长岩含水层初始渗透系数为 $k=0.0562 \sim 0.7835 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ ($6.450 \times 10^{-5} \sim 9.063 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$),属中等透水性地层。

为测定被注浆加固地层渗透系数的变化,在钻孔干式取芯完成后进行降水头注水试验。注水试验操作依照《水利水电工程注水试验规程》(SL 345—2007)^[24]的要求进行,渗透系数计算公式如下:

$$k = \frac{0.0523r^2}{2\pi l} \cdot \frac{1}{t_2 - t_1} \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right) \cdot \ln\left(\frac{l}{r}\right) \quad (1)$$

式中: k 为试验段地层渗透系数, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; t_1, t_2 为注水试验某一时间段的试验时间, min; H_1, H_2 为注水试验

中, t_1, t_2 时刻对应的水头, cm; r 为注水孔半径, cm; l 为注水段长, cm。

结合钻孔前的抽水试验和注浆加固后注水试验记录, 被注浆场区渗透系数数据变化如表 6 所示。分析注水试验数据可得, 注浆加固后, 场区大部分地层由中等透水性变为微透水性地层, 浆液结石体对地层中的导水通道封堵情况良好, 渗透系数较注浆施工前下降两个数量级。

表 6 注浆加固前后场区内部分钻孔渗透系数
Tab. 6 Permeability coefficient of some boreholes in the field area before and after grouting reinforcement

工况	试验孔	注水段长/m	渗透系数 / (cm·s ⁻¹)	地层透水性评价
注浆前	Z1-1	21.06	8.202×10 ⁻⁵	弱透水
	Z1-3	19.87	5.472×10 ⁻⁴	中等透水
	Z2-2	21.14	9.680×10 ⁻⁴	中等透水
注浆后	JCK1	22.90	4.403×10 ⁻⁶	微透水
	JCK2	22.26	6.481×10 ⁻⁶	微透水
	JCK3	23.04	3.915×10 ⁻⁶	微透水

综合分析 JCK1—JCK3 的钻孔取芯、注水试验和饱和单轴抗压强度数据, 可知注浆隔离墙的加固宽度可满足 2.0 m 的设计要求, 在试验场区边缘也具有较好的加固效果, 但加固区中心的注浆改善效果优于

加固区边缘。

4 注浆效果分析

4.1 注浆压力分析

图 6(a)为注浆孔 Z1-1 岩帽段注浆压力随时间的变化情况, 该段孔深 22.06 ~ 24.18 m。由图可知, 三次注浆的止浆压力连续升高。注浆初期, 浆液压力迅速增加, 但整个注浆过程中浆液压力波动较大, 原因或为 Z1-1 属于早期注浆孔, 浆液沿地层中的大开度裂隙扩散至较远处, 导致浆液压力消散较快。Z1-1 岩帽段前两次注浆均因单孔注浆量达到 3 m³ 而结束。

图 6(b)为注浆孔 Z2-1 第三段注浆压力随时间的变化情况, 该段孔深 33.07 ~ 40.12 m。该段注浆属施工后期, 随浆液注入, 所需压力仍有较大增加, 单次注浆完成所需时间也有一定延长, 三次注浆中均出现压力下降情况。如第三次注浆时, 注浆压力快速升至 0.812 MPa, 小幅下降后再次上升, 直至压力维持 30 min 后达到终压结束标准, 最大压力为 0.945 MPa。因该地层含水率较高、裂隙连通性好, 浆液硬凝所需时间延长, 注浆试验中多次出现孔间的串浆现象, 处理孔间串浆导致注浆压力多次下降。Z2-1 第三段的 3 次注浆均为浆液压力维持稳定 10 min 后达到终压结束标准。

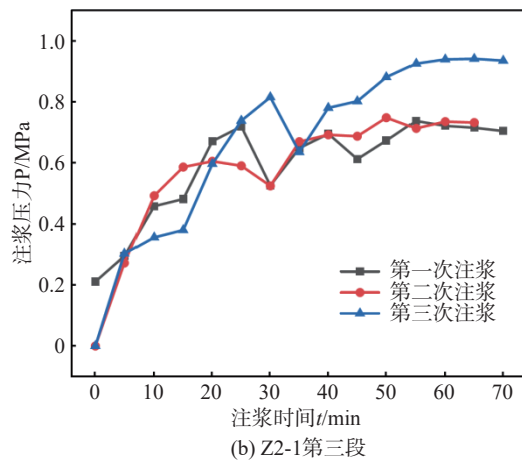
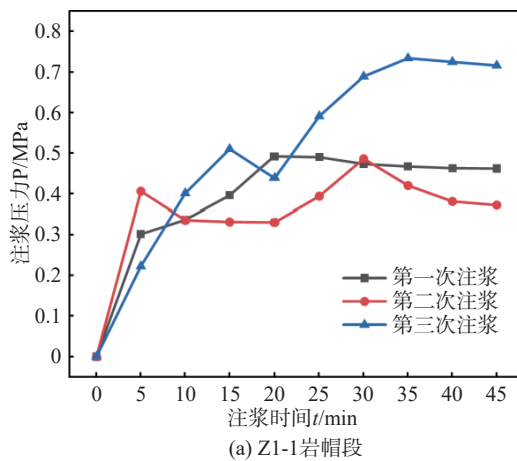


图 6 典型注浆段注浆压力变化曲线

Fig. 6 Grouting pressure change curve of typical grouting section

注浆初始压力和注浆流量呈正相关。初始泵量越大, 注浆压力上升越快; 注浆压力越大, 相对压差越大, 浆液扩散距离越远。在较浅地层注浆时, 水土压力较小, 地层裂隙连通性好, 注浆浆液相对容易扩散, 因而单次注浆结束后压力降低较快; 而随着注浆深度与注浆次数增加, 水土压力增大, 加之地层条件逐渐被改善, 注浆压力有一定提升。

4.2 土压力实测分析

由于各注浆孔三段深度划分不同, 选取岩帽段与第二段的部分注浆孔的监测数据进行分析, 忽略距土压力监测孔较远处其他 4 个注浆孔注浆时的影响。

TY01—TY06 土压力监测孔在注浆前后的土压力变化如图 7 所示。由图可知 TY04 土压力变化最为明显, 单个测点中 TY04-1、TY04-3、TY04-4、

TY06-1 压力变化最大,注浆前后分别为(0.157, 0.235 MPa)、(0.219, 0.326 MPa)、(0.232, 0.295 MPa)、

(0.146, 0.212 MPa),注浆后土压力最大增长 0.107 MPa;其余测点土压力变化较小。

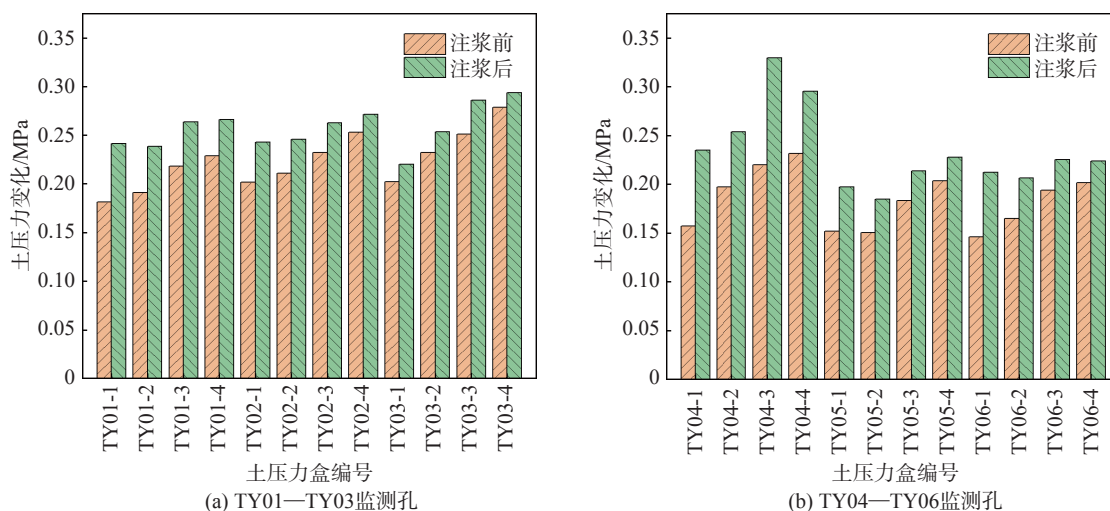


图 7 TY01—TY06 监测孔在注浆前后土压力的变化情况

Fig. 7 TY01—TY06 monitoring the changes of earth pressure in the borehole before and after grouting

TY04 的 4 个测点压力变化均较大,推测为注浆过程导致固定土压力盒的钢架发生变形扭转。

综合分析图 7 所示两组土压力变化曲线,除 TY04-3 外,靠近注浆孔的 TY01、TY04 在注浆后相较于注浆前的土压力监测数值增幅在 0.08 MPa 以内;而 TY02、TY03、TY05、TY06 中,除 TY06-1 外的监测数值在注浆前后变化幅度均在 0.05 MPa 以内。可知位于场区以外、注浆加固半径以内地层受到一定挤密影响;但注浆加固半径以外地层受影响较小。

图 8 为部分土压力监测点在注浆开始至结束后 14 d 的土压力和注浆压力随时间变化曲线。由图可知,上部测点压力达到峰值较早,波动 20 d 后逐渐稳定;下部测点在注浆后期压力达到最大值。注浆结束后各测点压力迅速下降。内侧土压力监测点数值在注浆初期波动较大,后逐渐稳定。外侧测点数值在注浆期间较为稳定。

考虑注浆孔与土压力盒距离、各钻孔注浆顺序、浆液硬化凝结时间以及注浆段划分,认为注浆期间,注浆压力相对较大、地层较为破碎、浆液尚未硬凝,浆液对土压力盒具有一定挤压作用,因而在注浆施工中土压力升高较多;而浆液硬凝后产生一定收缩,挤压作用减小,因此注浆前后压力差值较小。随时间延长,浆液逐渐硬凝完成,有效阻挡了注浆压力的传递,因而第三段注浆施工期间,上部土压力测点如 TY01-1 和 TY04-1,其数值变化幅度越来越小。

施工期间的实测最大土压力出现于 TY04-2 测点,数值为 0.508 MPa,略大于 0.5 MPa,但停止注浆

后次日降至安全值以下,可认为注浆施工对既有隧道结构基本不造成影响。

4.3 深层土体水平位移实测分析

由于采用分段下行、跳孔注浆,各孔注浆顺序及同一施工段各注浆孔的空间分布不同,因此每天的测斜数据为多种因素综合作用的结果。

图 9 为 CX01、CX02 位移随注浆变化曲线(图中位移正值表示靠近注浆孔,负值表示远离注浆孔变化),由图可知,CX01、CX02 水平位移整体上呈先增后减趋势,在 23 m 深度左右水平位移达到峰值。由于钢套管约束,较浅深度处的水平位移增加较为缓慢;深度超过 20 m,水平位移迅速增加至最大值,该处为注浆压力释放的“窗口”,且地层更为破碎,浆液更易沿裂隙劈裂、挤入,因此该深度水平位移最大;随深度加深,地层水土压力增加,岩层完整性提高,水平位移逐渐减小。CX01 底端水平位移未下降到 0,推测为进入完整中等风化岩层的底端未实现有效嵌固。

整个注浆期间,第一天的注浆工作对地层产生的位移影响最大,其他在相同时间段内的注浆工作对地层产生的影响越来越小。CX01、CX02 的最大位移值分别为 3.61 mm 和 4.64 mm,均在 22~27 m 深度范围,此区域为注浆钻孔的岩帽段和第二段上部。

岩帽段深度为 21.15~25.60 m,该段无钢套管保护,受注浆压力及重力影响,浆液在岩帽段及地层较为破碎的第二段上部产生的侧向压力最大,因而水平位移最大。土压力最大段与位移最大段基本处于同一深度范围。

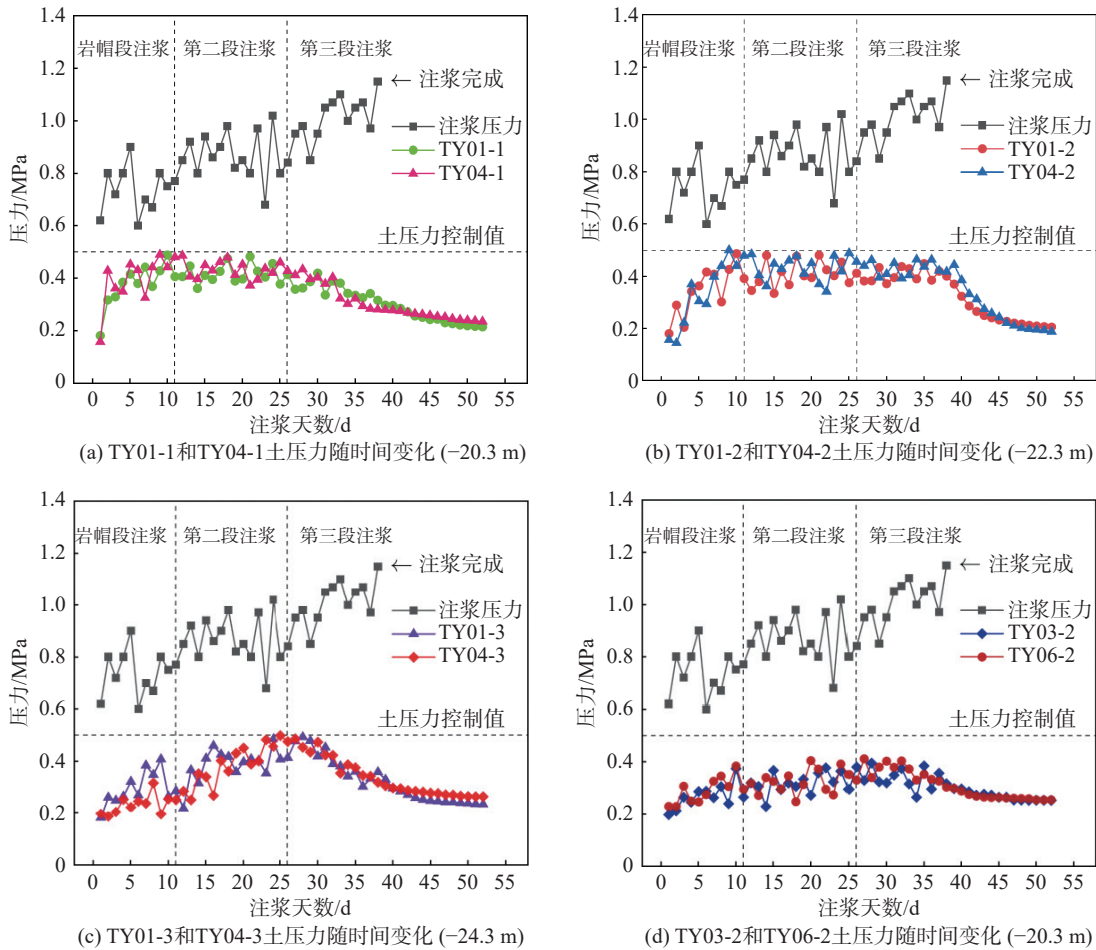


图8 部分测点实测土压力和注浆压力随时间变化

Fig. 8 Measured earth pressure and grouting pressure at some measurement points change with time

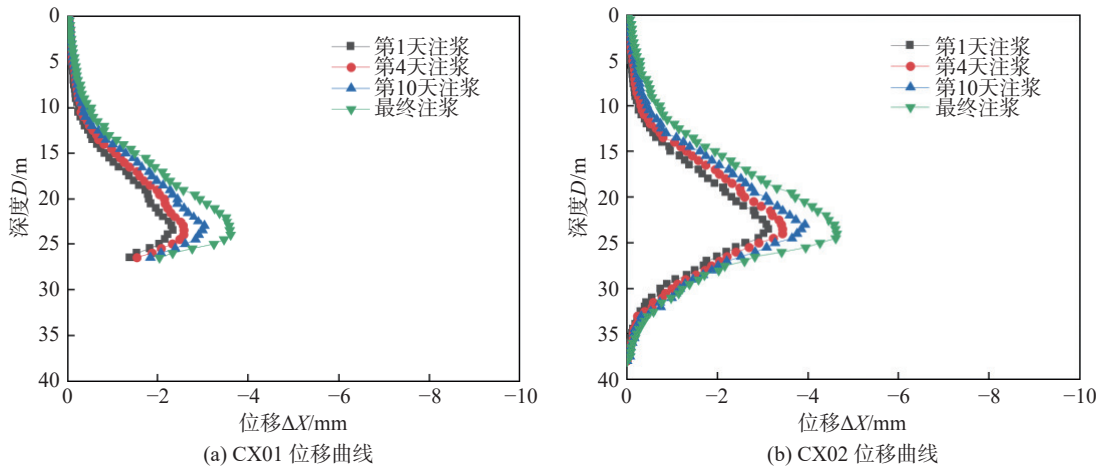


图9 CX01、CX02 位移随注浆变化曲线

Fig. 9 Curves of CX01 and CX02 displacements with grouting

注浆试验期间,距离外排钻孔 2.7 m(隔离墙与既有隧道最近水平距离)处产生的最大水平位移为 4.64 mm,满足《城市轨道交通工程监测技术规范》^[20]水平位移 ≤ 5.0 mm 的要求。

综合考虑地层改善效果、结石体取芯数据、土压力及测斜管位移结果,可见预注浆加固中间岩土体,

能形成一道连续可靠的注浆隔离墙,施工过程中对既有 4 号线的影响较小。

5 结论与建议

以南京地铁 6 号线岗子村—花园路区间叠线段与既有 4 号线并行工况为背景,通过注浆加固试验分析了注浆过程中土压力与位移变化情况,得出以下

结论:

(1)注浆地层上部全风化闪长岩 $\delta-1$ 和中等风化闪长岩 $\delta-2-2$ 裂隙发育,地层空隙率偏低且有较多连通裂隙,宜采用隔孔跳打、间隔循环注浆法,不同深度的地层分阶段注浆。

(2)综合考虑地层改善效果、土压力及测斜位移的影响,注浆加固的有效范围 ≥ 2.70 m。注浆期间,隔离墙距既有隧道最近处产生的最大土压力为 0.508 MPa,产生的最大位移为 4.64 mm,正常施工并保持监测可保证既有隧道结构安全。

(3)注浆后地层由极为破碎转变为中等完整至较完整,由中等透水性地层转变为微透水性地层;完整岩芯占比、RQD 值和采芯率明显提高;胶结岩芯饱和单轴抗压强度均在 1.0 MPa 以上,隔离墙中部加固效果好于边缘。

综上所述,采用本工艺与参数对叠线隧道与既有隧道中间的土体进行注浆加固,在减小对既有线扰动的同时,形成一道满足施工要求的隔离墙是可行的,可用于注浆正式施工。

参 考 文 献

- [1] 李 雪, 龚子邦, 张玉申, 等. 砂卵石地层重叠盾构隧道掘进加固方案比选研究 [J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S1): 918-927. (LI X, GONG Z B, ZHANG Y S, et al. Comparison and study of reinforcement measures for overlapping shield tunnelling in sandy cobble stratum[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(S1): 918-927. (in Chinese))
- [2] 安建永, 雷海波, 尹鸿威, 等. 富水砂层超小净距叠线盾构隧道施工安全控制技术 [J]. 隧道建设 (中英文), 2021, 41(S2): 503-511. (AN J Y, LEI H B, YIN H W, et al. Safety control technology for ultra-small clear distance overlapping shield tunnel construction in water-rich sandy stratum[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S2): 503-511. (in Chinese))
- [3] 黄海龙, 马金骥, 唐 亮, 等. 富水砂层叠落区间盾构扰动控制方案优选 [J]. 施工技术 (中英文), 2024, 53(13): 6-12,42. (HUANG H L, MA J J, TANG L, et al. Optimization of shield disturbance control scheme in water-rich sand layer overlapping interval[J]. Construction Technology, 2024, 53(13): 6-12,42. (in Chinese))
- [4] 黄大维, 赵桂铤, 徐长节, 等. 侧部注浆对已建盾构隧道受荷变形影响试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46(3): 510-518. (HUANG D W, ZHAO Z Q, XU C J, et al. Experimental study on influences of side grouting on deformation of shield tunnels under loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(3): 510-518. (in Chinese))
- [5] LU C R, ZHANG X H, SHI B B, et al. Deformation in settlement and grouting remediation of thickened larger-diameter metro shield tunnel in soft soil: a case study[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e02736.
- [6] 丁 程, 程姿洋, 王文恺, 等. 软弱局部透水地层注浆止水盾尾刷更换技术 [J]. 林业工程学报, 2024, 9(2): 160-166. (DING C, CHENG Z Y, WANG W K, et al. Study on the replacement technology of shield tail brush by grouting for water plugging in weak and locally permeable stratum[J]. Journal of Forestry Engineering, 2024, 9(2): 160-166. (in Chinese))
- [7] 邓皇适, 傅鹤林, 史 越, 等. 盾构隧道曲线段掘进引发邻近地下管线变形分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2022, 53(8): 3008-3020. (DENG H S, FU H L, SHI Y, et al. Research on deformation of adjacent underground pipelines caused by shield machine tunneling along curve section[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(8): 3008-3020. (in Chinese))
- [8] 江 杰, 龙逸航, 欧孝夺, 等. 新建曲线地铁盾构隧道下穿施工引起的既有隧道沉降分析 [J]. 工程科学与技术, 2023, 55(1): 313-324. (JIANG J, LONG Y H, OU X D, et al. Analysis of existing tunnel settlement caused by undercrossing construction of curved metro shield tunnel[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(1): 313-324. (in Chinese))
- [9] 江 杰, 龙逸航, 邢轩伟, 等. 富水圆砾地层盾构下穿既有地铁隧道掘进参数研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(7): 1828-1836. (JIANG J, LONG Y H, XING X W, et al. Study of boring parameters of shield tunnel under traversing existing metro tunnels in water-soaked round gravel strata[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(7): 1828-1836. (in Chinese))
- [10] 应宏伟, 姚 言, 王奎华, 等. 双线平行顶管上跨地铁盾构隧道施工环境影响实测分析 [J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(12): 1639-1647. (YING H W, YAO Y, WANG K H, et al. Observed environment response caused by construction of double-line parallel pipe jacking crossing over metro shield tunnels[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(12): 1639-1647. (in Chinese))
- [11] 邢慧堂, 徐前卫, 刘 浩, 等. 盾构近距离上跨既有隧道施工影响及控制研究 [J]. 铁道工程学报, 2021, 38(9): 61-67. (XING H T, XU Q W, LIU H, et al. Research on the construction impact and control of shield crossing

- over existing tunnel at close distance[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2021, 38(9): 61-67. (in Chinese))
- [12] 李兆平, 王凯, 姜厚停, 等. 长距离叠落盾构隧道施工对已成型隧道影响及控制措施研究[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(S1): 174-179. (LI Z P, WANG K, JIANG H T, et al. The influence of long distance overlapping shield tunnel construction on the formed tunnel and appropriate countermeasures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(S1): 174-179. (in Chinese))
- [13] DING Z, ZHANG M B, ZHANG X, et al. Theoretical analysis on the deformation of existing tunnel caused by under-crossing of large-diameter slurry shield considering construction factors[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 133: 104913.
- [14] 赵宇鹏, 陈道政. 盾构隧道上跨施工对既有隧道变形的影响研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2021, 44(11): 1525-1530. (ZHAO Y P, CHEN Z D. Research on the influence of overcrossing shield tunnel construction on the deformation of existing tunnels[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2021, 44(11): 1525-1530. (in Chinese))
- [15] 雷明锋, 石渊博, 唐钱龙, 等. 四洞交叠盾构隧道近距离下穿既有桥梁桩基施工控制技术研究(英文)[J]. *Journal of Central South University*, 2023, 30(7): 2360-2373. (LEI M F, SHI Y B, TANG Q L, et al. Construction control technology of a four-hole shield tunnel passing through pile foundations of an existing bridge: a case study[J]. *Journal of Central South University*, 2023, 30(7): 2360-2373. (in Chinese))
- [16] 李磊, 张孟喜, 吴惠明, 等. 近距离多线叠交盾构施工对既有隧道变形的影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(6): 1036-1043. (LI L, ZHANG M X, WU H M, et al. Influence of short-distance multi-line overlapped shield tunnelling on deformation of existing tunnels[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(6): 1036-1043. (in Chinese))
- [17] 李海洋. 四线叠交小间距盾构隧道下穿桥梁沉降控制案例分析[J]. *隧道建设(中英文)*, 2020, 40(S1): 343-349. (LI H Y. Analysis of settlement control of bridge induced by undercrossing of four-line overlapping small-spacing shield tunnels[J]. *Tunnel Construction*, 2020, 40(S1): 343-349. (in Chinese))
- [18] 李召峰, 李术才, 刘人太, 等. 富水破碎岩体注浆加固试验与机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(1): 198-207. (LI Z F, LI S C, LIU R T, et al. Grouting reinforcement experiment for water-rich broken rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(1): 198-207. (in Chinese))
- [19] SANG H M, LIU B, LIU Q S, et al. Study of grouting reinforcement mechanism in fractured rock mass and its engineering application[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2024, 24(5): 04024057.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通工程监测技术规范: GB 50911—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for monitoring measurement of urban rail transit engineering: GB 50911—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese))
- [21] 肖明清, 封坤, 周子扬, 等. 盾构隧道施工期管片错台影响因素研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(7): 1347-1356. (XIAO M Q, FENG K, ZHOU Z Y, et al. Study on the influencing factors for segment dislocation during shield tunnelling[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(7): 1347-1356. (in Chinese))
- [22] 夏曾银, 潘军, 盛鲁腾, 等. 注浆和隔离墙对基坑引发隧道变形的联合控制作用研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(9): 175-185. (XIA Z Y, PAN J, SHENG L T, et al. Study on joint control effect of grouting and separating wall on tunnel deformation induced by foundation pit[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(9): 175-185. (in Chinese))
- [23] 张伟杰. 隧道工程富水断层破碎带注浆加固机理及应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2014. (ZHANG W J. Mechanism of grouting reinforcement of water-rich fault fractured zone and its application in tunnel engineering[D]. Ji'nan: Shandong University, 2014. (in Chinese))
- [24] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程注水试验规程: SL 345—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code of water injection test for water resources and hydropower engineering: SL 345—2007[S]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2008. (in Chinese))

收稿日期: 2025-02-18