

## 富水砂层地铁竖井横通道注浆加固施工方案研究

倪汉杰<sup>1</sup>, 张 鹏<sup>1</sup>, 王远六<sup>2</sup>, 易领兵<sup>2</sup>, 邓康康<sup>1</sup>

(1. 中铁隧道局集团(上海)特种高新技术有限公司,上海 201306;2. 郑州城建职业学院,河南 郑州 450001)

**摘要:**为解决饱和粉细砂地层注浆加固施工过程中地表构筑物变形明显、浆液扩散效果差的问题,文章以广州地铁13号线西场站工程为研究背景,针对富水砂层注浆加固施工工艺优化、注浆加固材料的适用性开展现场试验对比研究。结果表明:1)采用水平钻杆后退式注浆工艺,在注浆孔周边打设泄压孔进行真空抽吸,在注浆压力与排水压力的共同作用下能够实现定向诱导渗透注浆;2)在超细水泥添加减水剂能够提升浆液的渗透能力,同等注浆压力条件下,添加0.4%减水剂的单孔注浆量比未添加减水剂的单孔注浆量提升4倍;现场施工监测结果表明,采用“抽注法”注浆,在不提高注浆压力的前提下,可以有效控制周边地层变形,地表和管线的隆起变形值均控制在1 cm以内。本文研究结果可为类似工程提供一定参考。

**关键词:**富水砂层; 地层加固; 后退式注浆; 抽注法

**中图分类号:**U231<sup>+</sup>.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-8993(2025)10-0023-08

**doi:**10.13402/j.gcjs.2025.10.121

## Study on the construction program of grouting reinforcement for subway shaft cross passage in water-rich sand layer

NI Hanjie<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, WANG Yuanliu<sup>2</sup>, YI Lingbing<sup>2</sup>, DENG Kangkang<sup>1</sup>

(1. China Railway Tunnel Bureau Group (Shanghai) Special High-Tech Company Limited, Shanghai, 201306, China;

2. Zhengzhou Urban Construction Vocational College, Zhengzhou 450001, Henan, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of obvious deformation of surface structures and poor spreading effect of slurry during the construction of grouting reinforcement in saturated fine sand strata, taking Guangzhou metro line 13 Xiba station project as the research background, on-site experimental comparative research is carried out on the optimization of the construction process of grouting reinforcement of water-rich sand strata and the applicability of grouting reinforcement materials. The results show that: 1) the use of horizontal drilling rod backward grouting process, in the periphery of grouting holes to set up pressure relief holes for vacuum suction, grouting pressure and drainage pressure under the joint action of the grouting pressure can be realized under the direction of the induced infiltration of grouting; 2) in the ultra-fine cement to add water reducer can enhance the penetration capacity of the slurry, the same conditions of the grouting pressure, the addition of 0.4% of the single-hole grouting volume than the addition of a single-hole grouting volume of the single-hole grouting volume of the water reducer to increase by 4 times; on-site monitoring results show that the use of The field construction monitoring results show that the grouting by “pumping method” can effectively control the deformation of the surrounding strata without increasing the grouting pressure, and the uplift deformation values of the ground surface and

**收稿日期:** 2025-02-26

**基金项目:** 河南省科技厅自然科学基金资助项目(162102210188); 河南省建筑业协会科研开发项目(YJX-2023-K01、YJX-2023-K02)

**作者简介:** 倪汉杰(1991—),男,工程师,从事隧道及地下工程注浆加固方面的施工及管理工作。

**通信作者:** 易领兵(1988—),男,高级工程师,从事地下工程、岩土工程及基础工程方面的研究。

pipeline are controlled within 1 cm. The results of this paper can provide certain reference for similar projects.

**Key words:** water-rich sand layer; stratigraphic reinforcement; backward grouting; pumping injection method

随着城市地下空间开发的不断深入, 工程地质条件日益复杂, 通过传统的注浆方法加固地层在实际施工过程中面临诸多挑战。尤其是富水粉细砂地层, 由于其颗粒致密、渗透性低且富水性强, 浆液在致密地层中难以有效扩散, 导致注浆量小、加固范围有限, 难以形成连续稳定的固结体, 严重影响了注浆效果和工程安全性。

近年来, 砂层注浆技术的研究取得了显著进展, 为隧道及地下工程中的砂层加固提供了重要支撑。魏进等<sup>[1]</sup>针对砂层隧道注浆问题, 研制了室内试验系统, 通过分析注浆压力、孔隙率和水灰比对结石体强度、扩散半径及注浆量的影响, 建立了变量关系式, 优化了现场注浆参数, 并结合开挖情况、浆脉分布、取芯强度及地表沉降对注浆效果进行了综合评价。雷亚军等<sup>[2]</sup>以曹家滩煤矿斜井过动水砂层帷幕注浆为背景, 利用有限元软件建立了注浆扩散封堵模型, 揭示了动水砂层帷幕注浆的扩散封堵机理, 优化了注浆参数及工艺, 并通过现场试验验证了其有效性。张小英等<sup>[3]</sup>针对水泥浆液析水效应导致的砂层注浆加固体空间变异性问题, 提出了性能衰减率的概念及其空间分布简化公式, 并通过有限元模拟研究了加固圈厚度和浆液水灰比对隧道稳定性的影响。何秋敏等<sup>[4]</sup>以西安地铁隧道工程为例, 研究了浅埋全断面砂层隧道的超前注浆加固技术, 通过室内试验优化了浆液配比, 并采用 FLAC<sup>3D</sup> 模拟分析了注浆加固后围岩及地表的破坏机理。邓洪亮等<sup>[5]</sup>提出了排水诱导驱替注浆技术, 推导了渗流压力梯度的空间分布方程, 并通过试验验证了其适用性。李志鹏等<sup>[6]</sup>研发了砂层渗透注浆模型试验装置, 通过正交试验分析了砂层粒径级配、黏性土含量、浆液水灰比及注浆压力对注浆效果的影响, 揭示了砂层注浆加固体的变形破坏特征。

上述研究成果为砂层注浆技术的理论发展和工程应用提供了重要参考, 但研究成果多基于室内模型试验及数值模拟分析, 鲜有关于现场砂层注浆加固施工技术的研究。本文依托广州地铁 13 号线西场站工程 3<sup>#</sup>竖井横通道粉细砂地层注浆加

固工程, 在注浆工艺选择、注浆材料选取等开展现场试验与施工应用, 并对注浆效果进行检查验证, 提出富水砂层地层注浆加固施工技术, 以期可为类似工程的施工提供参考。

## 1 工程背景

### 1.1 工程概况

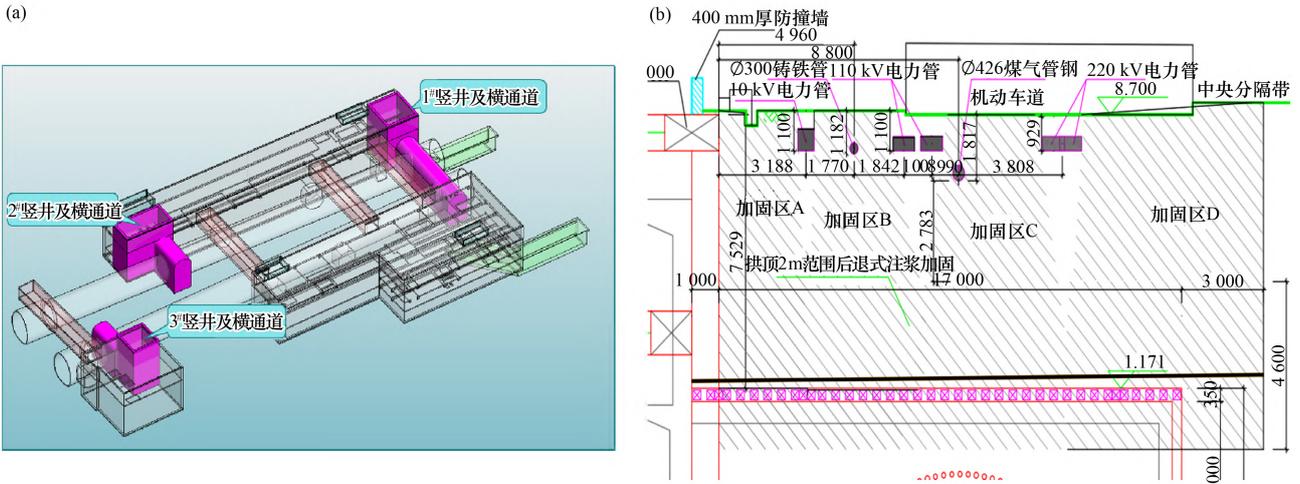
广州地铁 13 号线西场站位于广州市荔湾区东风西路两侧, 运营地铁 5 号线西场站西侧, 车站为地下二层分离侧式站台明暗挖结合车站, 站厅开挖深度为 21.42 m, 顶管通道覆土厚度约为 3~4 m。站台隧道全长为 201 m, 采用交叉中隔壁法 (cross diaphragm method) 施工, 共设置 3 座竖井 + 横通道。

3<sup>#</sup>竖井及横通道施工位于东风西路南侧, 竖井南北向长度为 10.5 m, 东西向宽度为 10.3 m, 深度为 22.37 m。3<sup>#</sup>竖井围护结构采用  $\varnothing 1\ 000\ \text{mm} @ 1\ 150/1\ 200\ \text{mm}$  钻孔灌注桩, 桩长为 24.52 m, 桩间迎土面设  $\varnothing 600\ \text{mm}$  双管旋喷桩止水; 桩间挂  $\varnothing 8\ \text{mm} @ 200 \times 200\ \text{mm}$  钢筋网,  $\varnothing 12\ \text{mm}$  横向拉筋与  $\varnothing 16\ \text{mm}$  锚筋固定网片, 喷射 50 mm 厚 C20 P6 混凝土。3<sup>#</sup>竖井横通道覆土厚度为 7.5 m, 周边环境复杂, 管线众多, 其中 DN426 中压燃气管位于正上方, 距离为 5 m。工程概况如图 1 所示。

### 1.2 工程地质条件

(1) 地质条件: 3<sup>#</sup>竖井为红层地段, 自上而下地层主要为 <1-2> 素填土、<2-1> 淤泥质土、<3-1> 粉细砂、<4N-1> 粉质黏土、<5N-2> 硬塑残积土。其中横通道拱顶部位主要为 <3-1> 粉细砂, 饱和、松散、颗粒均匀, 级配较好, 含泥量较少; <4N-1> 粉质黏土, 土质较均匀, 含较多粉细砂, 强度一般, 黏性一般。地质条件如图 2 所示。

(2) 水文条件: 本工程内无大型地表水体、无承压水; 地表水主要补给来源为大气降水, 主要的排泄方式为蒸发、径流等。勘察时初见水位埋深为 0.80~3.30 m, 标高为 5.01~7.96 m; 混合稳定水位埋深为 1.00~3.70, 标高为 4.61~



(a) 工程示意图; (b) 3#竖井周边管线剖面

图 1 工程概况

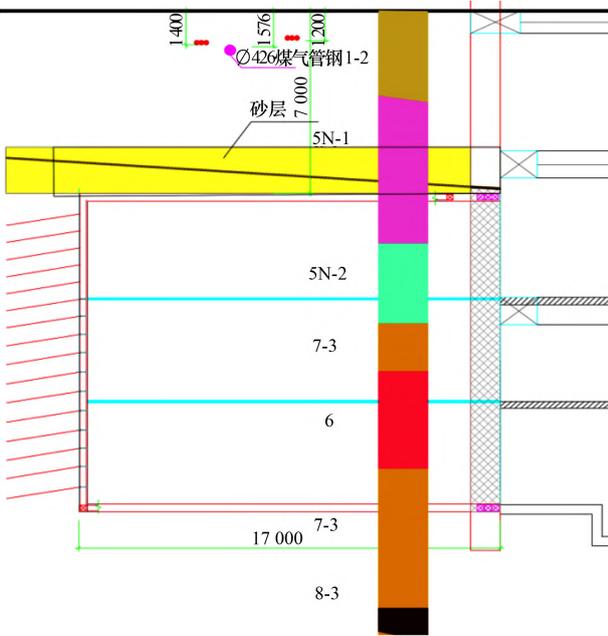


图 2 工程地质

7.66 m。现场实地补勘显示, 水位埋深为 1.94 ~ 2.83 m, 标高为 6.48 ~ 7.72 m。

### 1.3 3#竖井横通道注浆加固设计概况

3#竖井横通道拱顶注浆加固方式采用地面注浆与拱顶水平注浆组合的方式进行加固。

地面注浆加固采用后退式注浆施工工艺进行注浆加固, 加固范围为 3#横通道对应地面位置 12.9 m × 36.4 m (横通道投影轮廓外扩 3 m), 加固范围为地面以下 4.6 ~ 9.2 m, 注浆孔位 800 mm × 800 mm 梅花形布设, 注浆钻孔直径为 51 mm, 扩散半径 650 mm。注浆孔从南至北分 12 排。受地下管

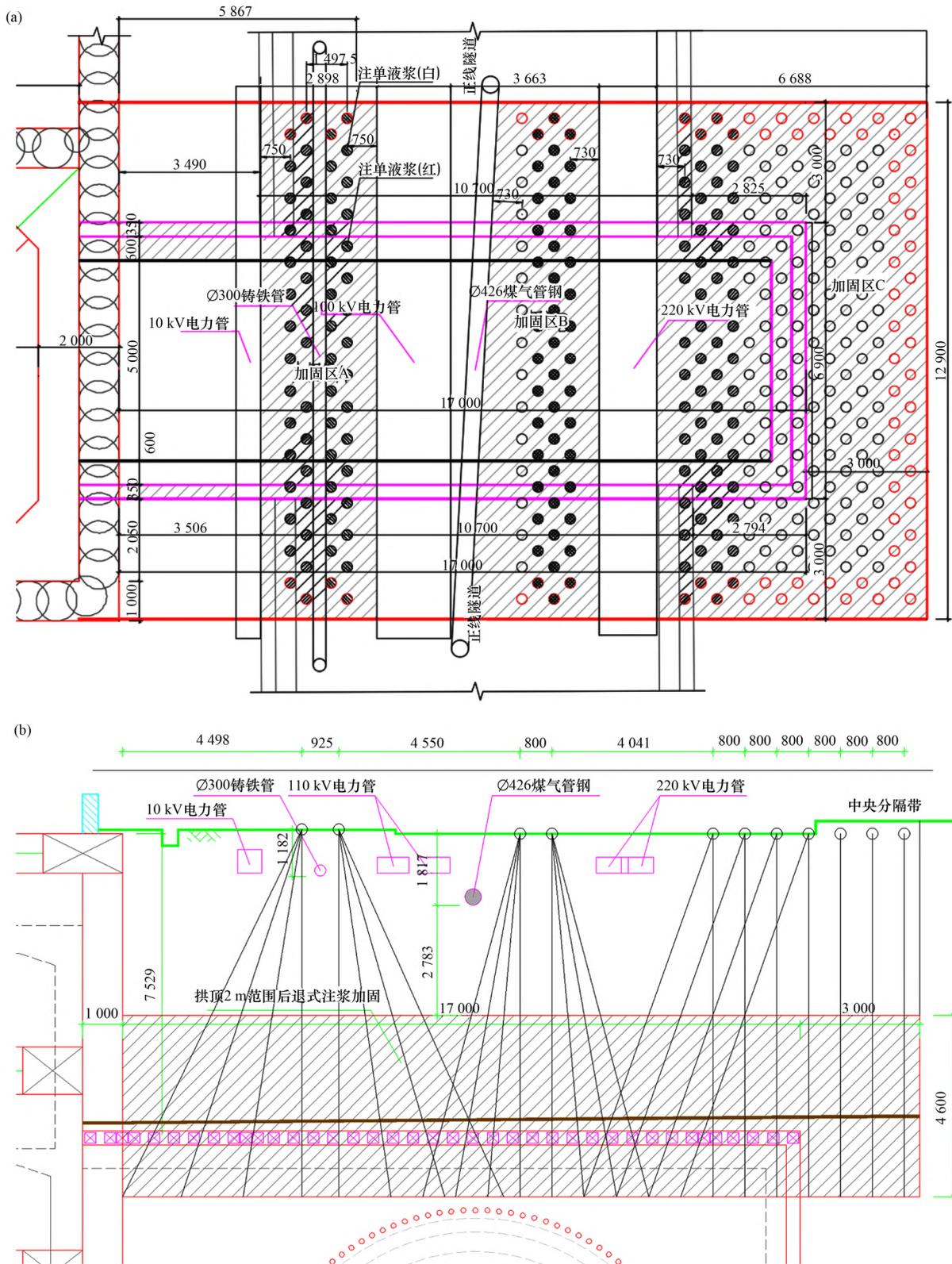
线影响的部分孔位需倾斜钻孔注浆 [如图 3(a)], 所有孔位首先进行垂直钻孔注浆, 再进行钻杆倾角注浆。倾角由小到大依次注浆, 单孔每次注浆间隔 24 h。地面钻孔注浆加固布置如图 3 所示。

拱顶水平注浆是在原设计后退式注浆的基础上进行补充注浆, 浆液采用超细水泥浆液分两段进行后退式注浆加固。第一段注浆加固区域为 3#横通道拱顶初期支护范围外 3.83 m, 在原设计第 1 ~ 3 排孔位中间进行补充钻孔注浆 [如图 4(a) 标红孔位], 共 27 个注浆孔, 钻孔深度为 10 m, 孔间距为 900 mm, 单孔浆液扩散半径为 650 mm。第二段注浆加固在横通道第一层导洞开挖至 7 m 处进行 [如图 4(b)]。钻孔呈放射状, 后退式注浆孔位 1 m × 1 m 环形布设, 采用间隔跳孔的注浆方式, 由外到内, 先下后上。下图 4 为拱顶水平注浆加固布置图。

### 1.4 施工重难点分析

(1) 隧道浅埋且周边环境复杂: 西场站 3#竖井暗挖横通道位于广州市东风大道下方, 第一层横通道覆土厚度仅为 7.5 m, 周边管线密集, 其中 DN426 中压燃气管距离通道仅为 6 m。前期采用常规钻杆后退式注浆加固时, 地层隆起显著, 燃气管线最大隆起达 80 mm, 接近控制极限值, 但地层固结效果未达到设计要求。后续注浆加固需严格控制地表及管线隆起。

(2) 工程水文地质复杂: 西场站 3#竖井横通道洞身及周边地层为含水量大的粉细砂层, 颗粒



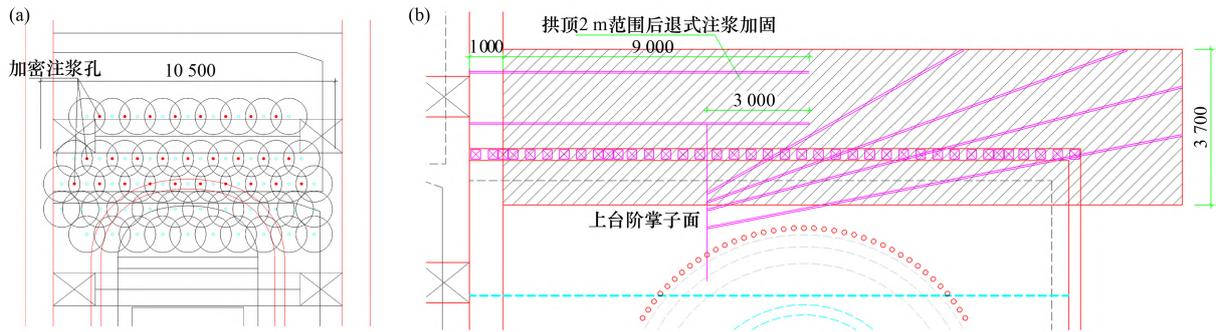
(a) 平面; (b) 剖面

图 3 地面钻孔注浆加固布置

mm

均匀且级配良好, 加固不当易引发事故。受地表建筑物和管线限制, 只能采用洞内注浆加固, 但

常规钻杆后退式注浆工艺在该地层中可注性差, 浆液扩散不均匀, 且地表和管线对隆起极为敏感。



(a) 水平注浆加固平面布置; (b) 第二段水平注浆加固平面示意

图 4 拱顶水平注浆加固布置

mm

## 2 注浆加固施工

### 2.1 整体注浆方案

3#竖井横通道地面注浆采用常规钻杆后退式工艺, 洞内水平注浆由于横通道埋深浅、周边环境复杂, 地层以致密富水砂层为主, 需兼顾开挖面稳定性和地层及管线形变控制。常规高压挤密或劈裂注浆不适用, 故采用低压渗透置换注浆, 通过可注性好的超细水泥浆液进行“诱导”式置换渗透。水泥颗粒渗透填充地层, 降低孔隙率和渗透系数, 并通过浆液固结增强地层黏聚力及内摩擦角, 确保地层稳定性。洞内水平注浆加固总体方案如下。

(1) 注浆材料比选: 选用粒径为  $10\ \mu\text{m}$  的超细水泥, 提升浆液扩散渗透能力及结石率。

(2) 注浆工艺: 采用水平钻杆后退式注浆工艺, 遵循“低压慢注、多孔少注、量压双控”原则, 确保浆液精准均匀注入地层。

(3) 泄压孔设置: 在注浆孔周边打设泄压孔, 通过持续排砂泄水, 扰动致密地层使其松散, 诱导浆液扩散。

### 2.2 注浆施工技术

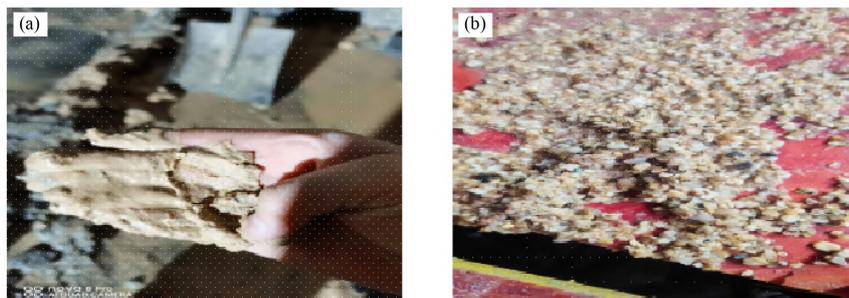
#### 2.2.1 浆液配置

在进行地面注浆加固时, 首先对注浆范围轮廓边缘两排孔位采用双液浆进行注浆封边, 中间剩余孔位注浆采用水泥(PO42.5)单液浆注浆填充。单液浆水灰比为 1:1; 水泥~水玻璃双液浆中水泥浆的水灰比为 1:0.5, 水玻璃浓度为 35~38 波美度。

洞内水平钻孔注浆时, 根据现场砂层反渣粒径变化情况, 实时调整浆液浓度配比(水灰比: 1:1~2:1), 孔内反渣为细粒时, 水灰比调整为 2:1; 孔内反渣为粗粒时, 水灰比调整为 1:1, 确保浆液有效扩散。现场钻孔反渣颗粒情况如图 5 所示。

#### 2.2.2 钻杆后退式注浆

地面注浆加固及水平注浆加固施工均采用后退式注浆施工工艺, 施工机械采用 ZLJ-1200 钻注一体机进行钻孔注浆, 钻机钻头直径为 45 mm, 钻杆直径为 42 mm, 单节长度为 2.0 m。钻机就位后, 调整钻杆水平角, 移动钻机, 将钻头对准所标孔位。注浆采用长套管护壁后退式注浆工艺, 根据设计钻孔深度, 一次钻进到位后, 采用注浆一段、后退一段的方式进行注浆, 后退分段长度



(a) 孔渣细粒情况; (b) 孔渣粗粒情况

图 5 拱顶水平注浆加固布置

为 1 m。为防止注浆施工时,相邻两孔施工距离太近或间隔时间太短,造成相邻孔施工时串浆,采取注一隔一的方法施作。作业流程如图 6 所示。

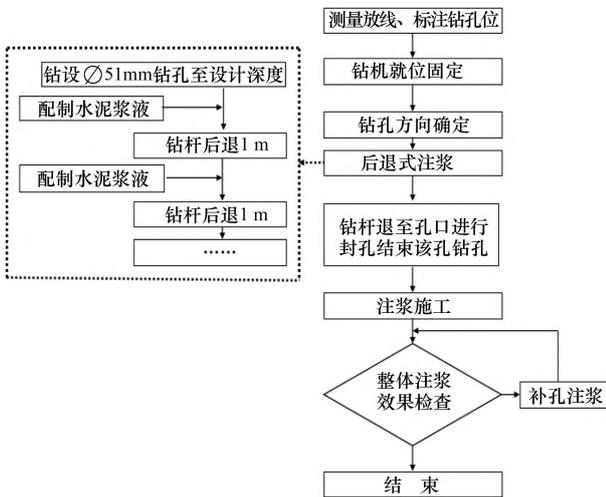
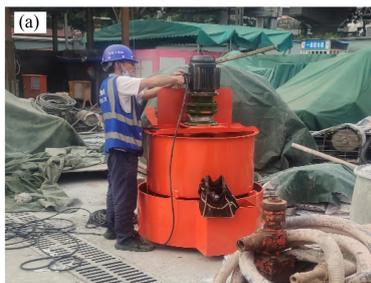


图 6 钻杆后退注浆作业流程

### 2.2.3 注浆结束标准及封孔措施

为确保地表管线及顶部路面安全,将注浆压力控制在 0.3~0.5 MPa 之间,单孔设计注浆量为 1.8 m<sup>3</sup>。注浆过程中单孔结束条件采用双向控制,即达到设计注浆量后停注,注浆结束时的进浆量,一般在 20 L/min 以下;或未达到设计注浆量但达到设计注浆压力,出现异常情况时停注。当钻杆距离孔口 1 m 时停止抽拔,持续注浆至注浆压力逐步升高,孔口冒浆后,到达设计终压并继续注浆 10 min 左右。当所有注浆孔均已符合单孔结束条件,无漏注情况时,结束全段注浆。

地面注浆所有注浆孔位施工完成后,孔口以下 0.15 m 用沥青冷料填实,隔天对孔口下沉的钻孔进行二次沥青冷料填实,恢复原状地貌。洞内水平钻孔前在围护桩上垂直取芯长 1 m(取出芯样留存),孔径为  $\varnothing 60$  mm,注浆完成后及时对注浆孔进行封堵,



封堵采用原芯样进行封堵,孔口采用快干水泥抹缝。

## 2.3 注浆过程控制

### 2.3.1 钻孔角度控制

测量组根据施工设计图纸对注浆孔开孔位置进行放样,现场施工人员采用红色油漆对放样点位进行标记。钻孔施工时,现场施工人员采用自动化罗盘及时调整钻孔角度,确保钻孔角度满足设计要求。现场钻孔角度控制示意图如图 7 所示。



图 7 现场钻孔角度控制

### 2.3.2 浆液拌制及注浆过程控制

浆液拌制过程中,采用双层高速搅拌机,确保超细水泥拌制均匀。在搅拌桶的侧壁标注出水水位线(提前确定搅拌桶方量,计算出水及水泥用量),用以控制水泥浆的比例,搅拌桶中按每次搅拌体加入所需的水量,开动搅拌机,再加入水泥搅拌 3 min,存浆时间不超过水泥初凝时间。注浆过程中,采用灌浆记录仪同步对注浆压力、注浆流量、注浆总量进行监测并记录。现场过程控制示意图如图 8 所示。

### 2.3.3 泄压控制

泄压孔设计孔深为 10 m,与注浆孔水平间距 0.8~1.2 m(大于浆液扩散半径 0.65 m,根据现场情况可调整),保证注浆过程中水和泥砂能够顺利排出。泄压孔孔口安装球阀防止发生突涌,注浆过程中,若有大量浆液从泄压孔中流出,则关闭球阀。现场注浆孔与泄压孔设置情况如图 9 所示。



(a) 现场浆液拌制; (b) 灌浆记录仪

图 8 现场过程控制



图9 注浆孔与泄压孔位置示意

## 2.4 工艺适用条件

(1) 地层渗透系数范围: 本工艺适用于渗透系数介于  $10^{-5} \sim 10^{-3}$  cm/s 的粉细砂地层。根据达西定律, 渗透系数过低 ( $< 10^{-5}$  cm/s) 时, 浆液难以通过自然渗透有效扩散, 需辅以劈裂注浆或化学注浆; 渗透系数过高 ( $> 10^{-3}$  cm/s) 时, 浆液易流失, 需采用速凝双液浆或添加增稠剂以控制扩散范围。

(2) 注浆深度限制: 受设备能力及地层压力影响, 水平后退式注浆工艺的适用深度宜为 5~30 m。浅层注浆 ( $< 5$  m) 易受地表荷载干扰, 需采用低压注浆以避免地层抬升; 深层注浆 ( $> 30$  m) 时, 钻杆摩阻增大, 注浆压力需提升至 1.0 MPa 以上, 可能引发浆液绕流或管涌。

## 3 存在的问题及优化措施

### 3.1 浆液扩散困难

针对粉细砂地层因粒径小、结构致密导致的超细水泥浆液扩散效果差问题, 注浆过程中通过掺入适量减水剂可减少浆液絮凝结构, 提升流动性和渗透性。现场通过对比不同减水剂掺量 (0、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%) 的水泥浆注浆效果, 确定最佳配比。试验表明: 掺入 0.4% 减水剂可显著减少絮凝结构, 浆液流动性和渗透力明显改善。单孔注浆量对比显示, 未添加减水剂时注浆量为  $0.2 \text{ m}^3$ , 添加 0.4% 减水剂后增至  $0.8 \text{ m}^3$ , 增幅达 400%; 而掺量提升至 0.5% 时注浆量仅微增至  $0.81 \text{ m}^3$ 。综合对比后选定 0.4% 减水剂配比, 现场注浆孔试验分布如图 10 所示, 不同配比注浆量对比如图 11 所示。

### 3.2 泄压孔堵塞

在注浆施工过程中, 泄压孔易因塌孔堵塞, 导致水和砂无法顺畅排出, 且每个注浆孔均需单

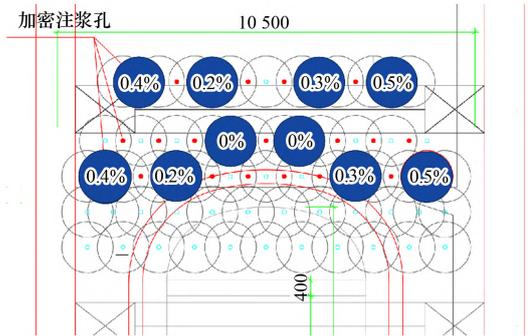


图10 注浆孔试验分布

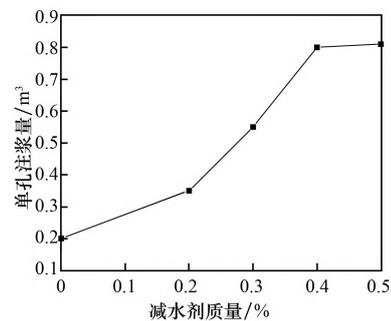


图11 不同配比注浆量曲线

独打设泄压孔, 工效较低。为解决这一问题, 采用“动态泄压孔”施工理念: 利用另一台钻注一体机, 在相邻注浆孔同步钻孔作为泄压孔。钻孔完成后, 通过持续旋转钻杆并泵入高压水, 确保水、砂顺畅排出, 避免塌孔。若发生串浆现象, 采用酸性水玻璃 (磷酸-水玻璃混合液) 进行封堵。动态泄压孔的施工方法及工效提升情况如图 12 所示。改进后, 每日钻孔量由 75 m 提高到 115 m。



图12 动态泄压孔施作示意

### 3.3 地表隆起

为最大限度降低注浆施工对地表及管线的影响, 采用“抽注法”注浆工艺。“抽注法”通过真空泵在注浆区域两侧形成局部负压区, 诱导浆液定向扩散并抑制地层隆起, 其核心机理可分解为物理过程如下。

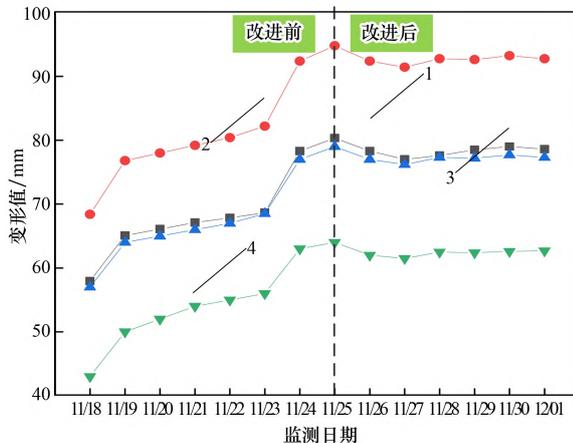
(1) 负压诱导渗流场重构。在传统注浆中，浆液扩散主要依赖注浆压力梯度驱动，但在致密富水砂层中，孔隙水压与注浆压力的叠加易导致地层剪切破坏或隆起。抽注法通过主动抽排地层孔隙水气，降低局部孔隙水压力，形成负压梯度。根据有效应力原理，负压区有效应力显著增加，地层骨架压缩性降低，从而抑制注浆引发的体积膨胀。

(2) 浆液扩散的协同驱动机制。抽注法将注浆压力与负压抽吸结合，形成复合压力梯度。根据达西定律，浆液渗透流量与压力梯度成正比。负压抽吸扩大了有效驱动压力差，增强浆液在低渗透地层中的扩散能力，同时通过定向排水利于浆液沿预设路径填充孔隙。

实践表明，该方法在不增加注浆压力的前提下，通过提升水力梯度显著增强浆液扩散与渗透能力，最终将地表及管线隆起值严格控制在 1 cm 以内。注浆真空抽吸与地表变形控制效果如图 13、14 所示。其中，DN102 曲线为横通道纵向中心线地表投影与 DN426 中压燃气管线交点。DN101 和



图 13 真空抽吸作业



1—ND101；2—DN102；3—ND103；4—地表中心监测点。

图 14 真空抽注对地表变形控制效果对比

DN103 分别为沿 DN426 管线纵向方向各间隔 5 m 变形监测曲线。

### 4 注浆效果

通过优化注浆方案设计，强化注浆过程的精细化控制和动态调整。注浆完成后，经检测各检查孔的单位涌水量均小于 0.1 L/(min·m)，完全满足设计要求的注浆效果验收标准。在检查孔施工过程中，钻孔作业顺畅，未出现卡钻现象，成孔后孔壁稳定无塌孔。注浆前后的钻孔涌水量对比详见图 15、16。孔内成像检测结果显示，孔壁结构完整、表面光滑，局部可见均匀分布的环状浆脉，未发现塌孔、缩孔等不良地质现象。孔内成像结果如图 17 所示。



图 15 注浆初期钻孔涌水情况



图 16 注浆检测探孔涌水情况



图 17 孔内成像情况

### 5 结论

本文以广州地铁13号线西场站工程3#竖井横  
(下转第 61 页)

- procedure for estimating seismic demands for buildings [J]. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 2002, 31(3): 561 – 582.
- [18] CHOPRA A K, GOEL R K. A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings [J]. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 2004, 33(8): 903 – 927.
- [19] GUPTA B, KUNNATH S K. Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures [J]. *Earthquake spectra*, 2000, 16(2): 367 – 391.
- [20] 李娜. 轻型木结构剪力墙受力性能有限元分析[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
- [21] KRAWINKLER H, SENEVIRATNA G. Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation [J]. *Engineering structures*, 1998, 20(4 – 6): 452 – 464.
- [22] 程海江. 轻型木结构房屋抗震性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.

(上接第 30 页)

通道注浆加固为研究背景, 在注浆工艺选择、注浆材料等开展现场试验与施工优化, 得到结论如下。

(1) 采用水平钻杆后退式注浆工艺, 在注浆孔周边打设泄压孔进行真空抽吸, 在注浆压力与排水压力的共同作用下能够实现定向诱导渗透注浆。

(2) 在超细水泥添加减水剂能够提升浆液的渗透能力、同等注浆压力条件下, 添加 0.4% 减水剂的单孔注浆量比未添加减水剂的单孔注浆量提升 4 倍。

(3) 现场施工监测结果表明, 采用“抽注法”注浆, 在不提高注浆压力的前提下, 可以有效控制周边地层变形, 地表和管线的隆起变形值均控制在 1 cm 以内。

#### 参考文献:

- [1] 魏进, 王锦涛, 卞海丁, 等. 城市砂层隧道注浆参数优

化室内试验研究[J/OL]. *北京交通大学学报*, 1 – 13 [2025 – 05 – 15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5258.U.20250106.1806.013.html>.

- [2] 雷亚军, 范钢伟, 杨建辉, 等. 煤矿斜井过动水砂层帷幕注浆扩散封堵机理及应用[J]. *中国矿业*, 2024, 33(5): 187 – 195.
- [3] 张小英, 翁贤杰, 杨旆, 等. 考虑空间变异性的隧道砂层注浆加固体稳定性分析[J]. *隧道建设(中英文)*, 2023, 43(6): 968 – 979.
- [4] 何秋敏, 周冬辉, 魏琪. 浅埋暗挖全断面砂层隧道超前注浆加固技术研究[J]. *城市轨道交通研究*, 2022, 25(9): 166 – 171.
- [5] 邓洪亮, 王守凡, 李小鹏. 饱和承压水砂层排水诱导驱替注浆技术研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2022, 42(2): 215 – 223.
- [6] 李志鹏, 张连震, 张庆松, 等. 砂层渗透注浆加固效果模型试验研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(12): 3488 – 3497.