

富水粉细砂层盾构接收端头补充注浆加固技术 研究及实践

孙思施¹, 李乔斌^{2*}, 钟久安², 臧鹏²

(1. 湖北水总水利水电建设股份有限公司, 湖北 武汉 430056; 2. 四川共拓岩土科技股份有限公司, 四川 成都 610073)

摘要:华北平原某地铁区间风井盾构接收端头所处地层从上到下主要为粉质粘土、粘质粉土、粉细砂,且地下水位高,流动性强。接收端头经高压旋喷注浆加固后水平探孔发现仍然存在涌水涌砂风险,盾构机刀盘在破除洞门时极易发生洞门间隙处涌水涌砂。为保证盾构机顺利贯通出洞,采取地表袖阀管注浆的方式,采用GX改性硅灌浆料固结粉细砂,对区间风井接收端头富水粉细砂地层进行针对性的补强注浆加固。经过处理后盾构顺利出洞,未发生涌水涌砂。

关键词:地铁盾构;接收端头;袖阀管注浆;GX改性硅灌浆料;补强加固;富水粉细砂层

中图分类号:U455 文献标识码:A 文章编号:2096-9686(2024)05-0163-06

Research and practice of grouting reinforcement technology for the receiving end of shield tunneling in water-rich fine sand layers

SUN Sishi¹, LI Qiaobin^{2*}, ZHONG Jiu'an², ZANG Peng²

(1. Hubei Shuizong Water Resources and Hydropower Construction Co., Ltd., Wuhan Hubei 430056, China;

2. Sichuan Gotone Geotechnical Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610091, China)

Abstract: The strata where the receiving end of air shaft shield is located in a subway section of the North China Plain is mainly silty clay, clayey silt and silty fine sand from top to bottom, with high underground water level and strong liquidity. After being reinforced by high-pressure rotary jet grouting at the receiving end, it was found that there is still a risk of water and sand inrush using horizontal exploration holes. The water and sand surging is easy to happen in the gap between the tunnel doors when the cutterhead of the shield tunneling machine break through the tunnel door. To ensure the shield machine smoothly passing out of the tunnel, the method of surface sleeve valve pipe grouting is adopted, and the GX modified silicon grouting material is used to consolidate the fine sand. Targeted reinforcement grouting is carried out in the receiving end of the interval air shaft within the water-rich fine sand formation. After treatment by such technology, the shield machine successfully excavated without any water or sand inrush.

Key words: subway shield tunneling; receiving end; sleeve valve pipe grouting; GX modified silicon grouting material; reinforcement; water-rich silty fine sand layer

0 引言

盾构机作为隧道掘进的专用工程机械已在城

市轨道交通工程建设中大量使用,适应于松软含水
地层、砂层或城市地下管线密集施工条件困难的

收稿日期:2023-12-05; 修回日期:2024-02-25 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.05.020

基金项目:四川省科技计划产业示范项目“地下工程水害综合治理技术服务示范项目”(编号:2021GFW074)

第一作者:孙思施,女,汉族,1984年生,高级工程师,水利水电工程专业,主要从事水利水电工程项目管理工作,湖北省武汉市汉阳区蔷薇路华中智谷B3,11680507@qq.com。

通信作者:李乔斌,男,汉族,1975年生,高级工程师,岩土工程专业,主要从事地下不良地质处理、大坝防渗堵漏的技术研究及施工实践工作,四川省成都市青羊区青羊工业总部基地T区28栋602,654955401@qq.com。

引用格式:孙思施,李乔斌,钟久安,等.富水粉细砂层盾构接收端头补充注浆加固技术研究及实践[J].钻探工程,2024,51(5):163-168.

SUN Sishi, LI Qiaobin, ZHONG Jiu'an, et al. Research and practice of grouting reinforcement technology for the receiving end of shield tunneling in water-rich fine sand layers[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5):163-168.

段。盾构机工作效率高,但是也存在施工安全风险,因此需要重点关注并消除安全风险以保证施工效率。施工中最大、最为突出的风险就是盾构机始发和接收过程中易出现涌水涌砂的情况,尤其是工作井周边存在不良地质或富水地层时。因此,进行针对性的处理,消除工程安全隐患,是工程安全的重要保障。

盾构接收前对接收端头进行针对性的加固以消除涌水涌砂的风险,众多学者和施工人员研究并实践了很多方法,例如冻结法+旋喷桩+搅拌桩、冻结法+钢套筒、钢套筒法、冻结法等^[1-2],大部分以冻结法为主。福州市地铁2号线桔园洲站—洪湾站区间在桔园洲站始发、洪湾站接收。接收端头采取U型连续墙止水帷幕,连续墙内搅拌桩加固地层,车站主体结构地连墙与素砼墙围闭内侧设置一排旋喷桩^[3]。天津地铁软土富水层则通过旋喷桩加搅拌桩加固端头^[4]。四川武都水库灌浆平洞内采取高压旋喷的方式加固了粉细砂地层^[5]。另外南京地铁元通站盾构始发端头、南京地铁油坊桥站一中和村站盾构始发端头、天津海河共同沟隧道始发端头、广州地铁高增站—新机场南站盾构到达端头都采取了旋喷桩加固,但是却发生了涌水涌砂的事故,事故原因多为加固范围和加固质量不满足^[6]。由此可见,端头加固范围及加固质量至关重要。本文主要针对富水粉细砂地层接收端头经过高压旋喷加固后,出现搭接不良、桩径不足等导致加固范围及加固质量不满足盾构接收条件的工况进行地表注浆加固,使其满足接收条件。

1 项目概况

华北平原某地铁工程线路设计了明挖工区和盾构工区。该线路所属地区主要为冲积平原,地形平坦开阔,地面高程6.0~27.0 m,地势由西北向东南缓倾。从北向南穿越微地貌依次为冲积平原、冲积洼地与古河床微高地相间、冲积扇平原、冲积湖积三角洲平原、平坦的冲积低台地、冲积洪积洼地。场地现状以村庄、农田、林地为主,沿线多深坑塘。线路盾构区间穿越地质情况从上到下主要为粉质粘土、粘质粉土、粉细砂。地下水位标高-9.0~-15.0 m,含水层主要为粉土及粉细砂层。盾构左线管顶至地面距离14.103 m,右线管顶至地面距离13.892 m。

接收端头接收盾构机前通过水平孔检查发现

其存在涌水涌砂的风险,影响施工安全。从区间风井接收端头所处地层发现盾构机穿越的主要为富水粉细砂层,粉细砂层作为一种典型的软弱地层,在干燥条件下自稳能力较差,易在施工中出现流变等问题,而在地下水位高、地下水丰富的环境下施工所引起的地层和结构变形较干燥条件下差异巨大,使得隧道施工风险和难度骤增。粉细砂干密度在 $1.36\sim 1.93\text{ g/cm}^3$ 时,其渗透系数主要分布在 $8.0\times 10^{-3}\sim 3.0\times 10^{-4}\text{ cm/s}$ 区间^[7]。有粉细砂层的基坑、地铁工程,在地下水的作用下,易产生流砂、涌砂,而粉细砂加固也是项目的难点之一。

2 盾构接收施工风险分析及加固方案设计

盾构接收是盾构施工过程中最主要的风险点之一,尤其是软弱富水砂层中盾构施工、安全接收、对周边建筑物的保护、地面沉降的控制都是施工中的难点。

参照国内同类地层盾构接收成功案例,结合项目现场工况进行风险剖析,在华北平原富水粉细砂层盾构接收施工中,盾构接收端头加固成效至关重要,关系着盾构接收施工安全。该项目盾构接收施工风险主要有以下几个方面^[3]:

(1)在富水粉细砂层地层中,盾构接收时姿态控制不好易发生轴线偏离,造成洞圈密封橡胶带损伤,导致洞门密封止水装置失效,发生涌水、涌砂事故。

(2)该工程盾构所处地层为粉细砂层,地下水位高,若端头加固范围及加固质量不满足设计要求,盾构接收施工极易发生涌水、涌砂事故。

(3)华北平原富水粉细砂层流动性大,一旦发生涌水、涌砂将难以快速封堵,可能造成地面塌陷、接收井淹没等风险。

(4)接收端头接收盾构时,提前拆除预留洞口的围护结构,使刀盘切削洞口土体顺利进入洞圈密封装置,但是该过程洞口土体暴露时间较长,且受前期施工等影响,容易出现洞门土体或洞圈密封装置缺陷导致的洞口事故。

为保证盾构接收端土体有良好的自稳性和密实性,使接收洞口土体在洞门破除时不坍塌,以免造成地下水及砂土涌入工作井,需提前对接收端头土层进行加固。项目设计接收端头采取二重管高压旋喷桩加固处理,高压旋喷桩按照 $\text{O}800\text{ mm}@$

600 mm 进行布置(详见图1)。加固完成后盾构机抵达区间风井接收端头前方 10 m 停机确定接收风险,通过盾构机刀盘前方检查孔进行检查,显示正前方有水且岩心取样有不成型的粉细砂存在。经专家评估确定仍然存在涌水涌砂风险,为了保证盾构接收安全,需进行补强加固^[8]。

3 补强加固方案设计

3.1 方案选择

通过查阅大量的成功案例,发现补强加固可选的方法主要有注浆法和冻结法。冻结法相比注浆法安全系数高,但后期冻融影响未知;同时冻结法对施工队伍专业化程度要求高;另外冻结法施工中可能需要采用二次开孔、跟管低速慢进、变径锥体接头、速凝水泥二次封堵的透孔施工方式去降低富水粉细砂层中冻结孔施工涌水涌砂风险^[4,6,9-10]。注

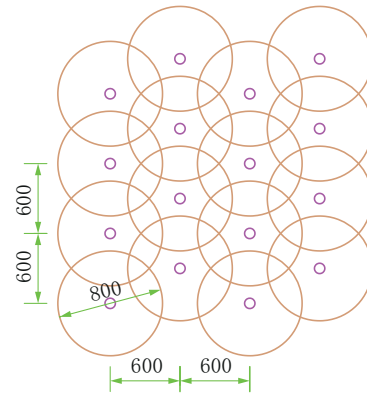


图1 高压旋喷桩搭接情况示意

Fig.1 Overlapping situation of the high-pressure rotary jet grouting piles

浆法与冻结法相比也具有自身的优势,对比分析见表1。

表1 补强加固方法对比

Table 1 Comparison of reinforcement methods

方案	工期	处理费用	方案特点	优点	缺点
注浆法	短	较低	加固地层	(1)帷幕止水效果好;(2)有持久加固效果	(1)工艺复杂、加固体均匀性比较差;(2)真溶液注浆材料使用量大
冻结法	长	较高	冻结地层	(1)冻结止水效果好;(2)冻结期加固地层	(1)造价偏高、工期长;(2)冻胀融沉的影响未知,且难快速消除;(3)持续供电、连续作业,供电不能出现异常

综合考虑工期、造价、安全等因素后,确定采取注浆法完成风井接收端头补强加固。

注浆可采取的方式有水平注浆和地表注浆。水平注浆有以下缺点:

(1)钻探设备、灌浆设备不具备吊入接收端头区间风井的条件;

(2)接收端头上水平钻孔涌水涌砂风险大,可能造成对工作井不可估量的损失;

(3)水平注浆施工中可能采取跟管钻进干钻成孔、孔口设置止浆袋等处理措施,施工工艺复杂。

因此选择地表注浆的方式进行补强加固,再结合该项目最大的施工风险是涌水涌砂,故综合项目工期、造价、安全等考虑,采取地表袖阀管注浆,系统补强加固接收端头,消除涌水涌砂风险。同时盾构接收端头加固区域持续降水施工,降低盾构接收端头止水帷幕加固区域注浆难度,消除盾构机顺利抵达接受端头并安全破除洞门期间涌水风险,整体

方案布局见图2。

3.2 方案设计

盾构机开挖边线(俯视图)中间平行线为中心线在左右两侧分别布置3排孔,布孔距离为距中心线 4.303、5.276、6.300 m,距离 TRD 内边线 1.350~8.350 m 为盾构机开挖边线两侧加固范围,而盾构机开挖半径为 4.550 m,确保将盾构机行进路线全部加固。洞门位置处设计距离 TRD 外边线 0.5、1.5 m 分别布置 2 排孔与左右两侧的 3 排孔形成合围的 U 形加固范围。注浆孔布置呈梅花状,孔间距 1 m。同时在加固范围两侧布置降水井保证施工安全。

3.3 注浆材料研究

粉细砂地层作为一种典型的软弱地层,富水条件下易发生涌水涌砂,其渗透系数主要分布在 $8.0 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-4}$ cm/s。注浆材料对富水粉细砂层止水帷幕注浆至关重要。盾构接收端头补强加固只要能满足盾构机通过不发生涌水涌砂即可,所以材

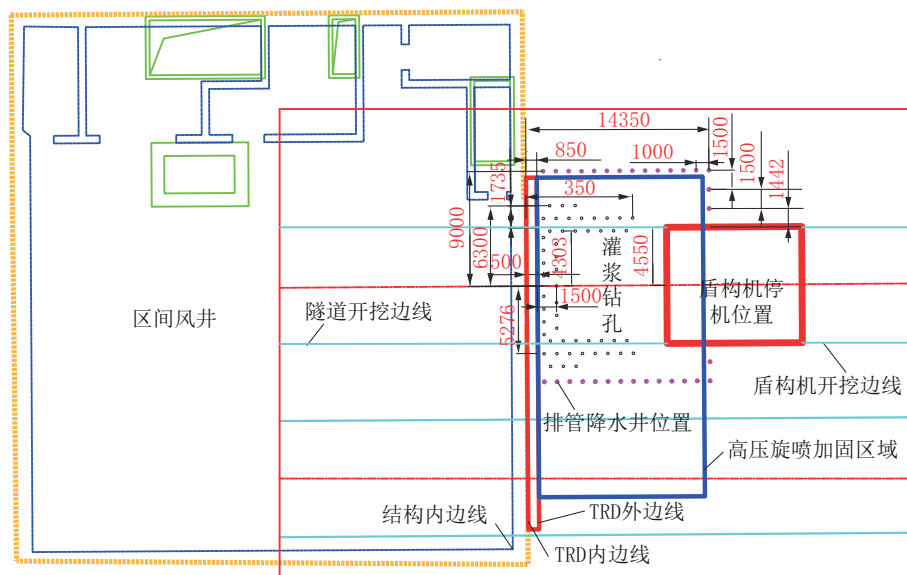


图2 补强加固方案布局

Fig.2 Layout of the reinforcement plan

料仅需要满足临时加固的需求,渗透性好且具备一定的固结强度。

目前针对富水粉细砂层大部分采用的溶液型浆液是酸性水玻璃注浆材料,其自身强度较低、固结体强度更低,同时该材料反应迅速不易控制。在保持现有注浆材料优异渗透性能的前提下,针对以上缺点,我们进行针对性研究,研制了溶液型浆液GX改性硅灌浆料。通过对GX改性硅灌浆料进行一系列的性能测试,其凝胶反应具有粘度突变性能,可很好地适应粉细砂地层,前期具有足够的时间让浆液渗透粉细砂,后期快速凝固,粘度变化见图3。

为了验证材料的可灌性,进行了一维灌浆模拟

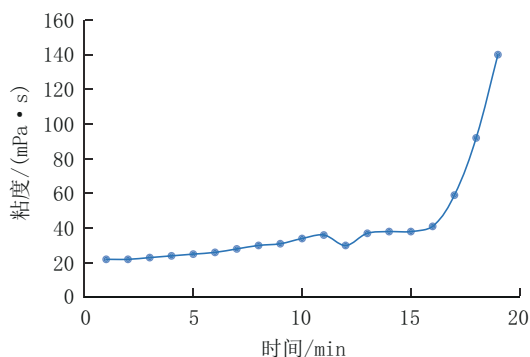


图3 GX改性硅浆液粘度变化

Fig.3 Changes in viscosity of the GX modified silicon slurry

实验和二维模拟实验。一维灌浆试验采用厚度3 mm、 $\text{O}110$ mm的硬质塑料管,中间填充最大粒径0.5 mm的砂土,底部顶部有阀门控制开口,然后在压力下进行饱和砂土灌浆。其中一组较好的实验数据为有效加固长度95 cm左右,试样渗透系数0.0007 cm/s,灌浆时间30 min,浆液用量约4 kg。前3 kg灌浆用时20 min压力基本在约0.7 MPa,最后1 kg灌浆压力在1 MPa,灌浆现场见图4。



图4 一维模拟灌浆实验

Fig.4 1D simulation grouting experiment

二维灌浆模拟实验采用高度60 cm、 $\text{O}60$ cm的镀锌铁桶,中间填充厚度45 cm中细砂,捶打密实。上部浇筑砂浆形成盖重,底部有阀门控制开口。砂子为饱和水状态,下部阀门可自然渗水,然后在压力下进行灌浆。灌浆时间50 min,浆液用量20 kg左右,灌浆压力0.5~1 MPa。取心样4个,中间心样长

24 cm,其他3个岩心样品长15、16、18 cm,见图5。



图5 二维模拟灌浆实验取心效果

Fig.5 Core sampling effect by 2D simulation experiment

通过一维、二维模拟实验可以看出,材料具有良好的可灌性,能够很好的固结砂子。另外通过实验发现,GX改性硅灌浆料性能更为优越,两种灌浆材料的性能对比见表2。

通过分析可以看出,GX改性硅灌浆料在强度和凝结时间可控方面具有优势,同时具备可灌性,适用于该类地层的临时加固^[11-15]。

4 实施效果

采用地表袖阀管注浆工艺进行注浆,钻孔方式为泥浆护壁钻孔。共计布孔116个、孔径68 mm、孔深26 m,灌浆钻孔总长度3150 m。注浆时首先采用水泥浆封堵较大的渗漏通道保障加固范围,然后续选用GX改性硅灌浆料对粉细砂地层进行更为有效和针对性的加固。项目工程量为:灌浆进尺698 m,GX改性硅灌浆料133.78 t。GX改性硅灌浆料注浆起始压力0.1~0.6 MPa,注浆终止压力1.5 MPa。

同时在加固圈两侧外围设置19口降水井,在盾构贯通出洞时与加固体形成双保险。降水作业时随时检查含砂量是否达到标准,若达不到标准应采取相应措施^[16]。

经过注浆加固后,在盾构机接收端头进行检查孔施工,发现盾构机正前方已无涌水涌砂的风险,

证实注浆效果满足盾构机穿越的条件。为了确保安全,项目也准备了应急预案,根据实际情况选择采取“二次接收”或“多次接收”方式,避免出现洞门漏水漏砂等现象发生。

盾构机顺利抵达接收端头,未发生涌水涌砂现象,盾构机破除洞门情况见图6。

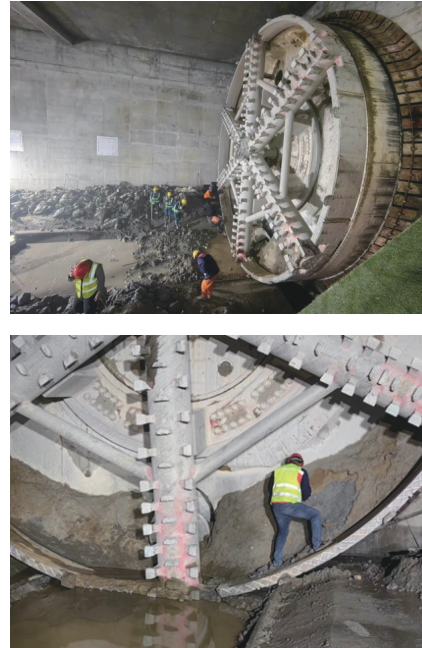


图6 盾构机破除洞门

Fig.6 The shield machine breaks through the tunnel door

5 结论

高压旋喷注浆加固后大部分粉细砂得以有效加固,但是仍然存在搭接不到位的情况导致存在涌水涌砂的安全风险。富水粉细砂地层经过袖阀管补强注浆加固处理后使其具备一定的强度和防渗性能,满足盾构机破除洞门的条件,消除了涌水涌砂的风险,提高了工程的安全性。

GX改性硅灌浆料性能对于此类地层具有一定

表2 灌浆材料性能对比

Table 2 Comparison of grouting materials property

材 料	形 态	粘度/mPa·s	纯浆体强度/MPa	固砂体强度/MPa	凝结时间/min	材料类型
水玻璃灌浆料	液体	30~100	<0.5	<0.8	1~10	无机材料
GX改性硅灌浆料	液体	30~100	≥1	≥1.5	5~60	无机材料
备注		优异的渗透性	强度满足常规的围岩强度需求		便于施工	价格明显低于化学灌浆材料

的优势,注浆压力达1.5 MPa,保证浆液具有足够的扩散半径,保证加固效果。

对于富水粉细砂层采用“高压旋喷+溶液型浆液(GX改性硅灌浆料、硅溶胶等)注浆补强+外围降水井”的方式能够使地层具有一定强度和整体防渗性能。可对类似工程提供一定的借鉴。

参考文献(References):

- [1] 安宏斌,怀平生,白晓岭,等.无端头加固条件下土压平衡盾构水下接收施工技术[J].隧道建设,2019,39(10):1697-1703.
AN Hongbin, HUAI Pingsheng, BAI Xiaoling, et al. Construction technology of underwater receiving of EPB shield under condition of no-end reinforcement[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(10):1697-1703.
- [2] 周诚,余群舟,杨俊.地铁越江泥水盾构到达接收渗漏风险控制技术[J].铁道工程学报,2016,33(3):99-104.
ZHOU Cheng, YU Qunzhou, YANG Jun. Risk control technology of leakage accident for the subway arriving[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(3):99-104.
- [3] 温良涛.软弱富水砂层地质条件下土压平衡盾构接收施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(6):88-93.
WEN Liangtao. Receiving process for earth pressure balanced shield in soft water rich sand formation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(6):88-93.
- [4] 唐京生.浅谈盾构始发与接受端加固方法的研究[J].中国设备工程,2018(8):122-123.
TANG Jingsheng. Research on reinforcement methods for the starting and receiving ends of shield tunnels[J]. China Plant Engineering, 2018, (8):122-123.
- [5] 丁跃军.粉细砂地层防渗帷幕综合施工方法[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(4):76-78.
DING Yuejun. Comprehensive construction method of anti-seepage curtain in silt and fine sand layer[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(4):76-78.
- [6] 殷黎明.砂卵石地层盾构始发端头土体加固研究[D].长沙:中南大学,2013.
YIN Liming. Study on the reinforcement of soil for shield launching in sandy pebble stratum[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [7] 齐俊修,赵晓菊,张广禹,等.粉细砂渗、透渗透变形参数统计分析研究[J].地下空间与工程学报,2015,11(S2):419-424.
QI Junxiu, ZHAO Xiaojie, ZHANG Guangyu, et al. Statistical analysis and study on silty-fine sand permeability and permeability deformation parameter[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S2):419-424.
- [8] 高成梁,梁小强.旋喷桩在盾构法隧道端头井洞口土体加固工程中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(12):69-72.
GAO Chengliang, LIANG Xiaoqiang. Application of high-pressure spiral jet grouting piles in shield tunnel portal soil reinforcement engineering[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(12):69-72.
- [9] 王博.复杂地层中地铁盾构接收端头加固技术研究[J].四川水泥,2021(6):231-233.
WANG Bo. Research on reinforcement technology for receiving end of metro shield tunnels in complex strata[J]. Sichuan Cement, 2021(6):231-233.
- [10] 冯慧君.天津地铁红星路站盾构端头井水平注浆加固技术[J].施工技术,2009,38(9):11-12.
FENG Huijun. Horizontal grouting reinforcement technology of shield end well in Hongxing Road Station of Tianjin Metro[J]. Construction Technology, 2009, 38(9):11-12.
- [11] 潘希军.粉细砂层中锚索施工涌水涌砂的处理技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(10):72-76.
PAN Xijun. Treatment of water and sand kicks in silty fine sand in anchor cable construction[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(10):72-76.
- [12] 周小杰.富水粉细砂地层大断面隧道围岩稳定性及注浆加固效果研究[D].成都:西南交通大学,2022.
ZHOU Xiaojie. Study on stability of surrounding rock and effect of grouting reinforcement for large section tunnels in water rich silty-fine sand strata[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [13] 茆俊飞.暗挖隧道粉细砂层注浆加固施工技术[J].工程与建设,2019,33(3):437-438,449.
MAO Junfei. Construction technology for grouting reinforcement of fine sand layer in underground tunnels[J]. Engineering and Construction, 2019, 33(3):437-438,449.
- [14] 王晓亮,侯伟清,叶子剑,等.北京地铁10号线二期某区间粉细砂地层帷幕注浆效果评价研究[J].施工技术,2014,43(1):114-117.
WANG Xiaoliang, HOU Weiqing, YE Zijian, et al. A slity sand stratum curtain grouting effects evaluation research on the second stage of Beijing Subway Line 10[J]. Construction Technology, 2014, 43(1):114-117.
- [15] 何鑫,王胜,何焯,等.富水砂卵石层堵漏凝胶的研制及其机理[J].钻探工程,2023,50(1):142-149.
HE Xin, WANG Sheng, HE Ye, et al. Development and mechanism of plugging gel for water-rich sand and gravel formations[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1):142-149.
- [16] 李洪财.南京长江江心洲超大直径盾构接收井明挖段超深基坑降水技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(5):87-92.
LI Hongcai. Study on dewatering technology of ultra-deep foundation pit in opening cut section of super-large diameter shield receiving well in River Island of Nanjing Yangtze River[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(5):87-92.

(编辑 王文)