

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.01.023

引用格式:刘振兴,黄伟,蒋超,等.盾构穿越内河淤泥质粉质黏土地层预加固处理技术研究[J].公路与汽运,2025,41(1):116-121.

Citation:LIU Zhenxing,HUANG Wei,JIANG Chao,et al.Study on the pre-consolidation treatment technology of silty clay stratum by shield tunneling machine crossing inland river[J].Highways & Automotive Applications,2025,41(1):116-121.

盾构穿越内河淤泥质粉质黏土地层 预加固处理技术研究*

刘振兴¹,黄伟¹,蒋超¹,李大成²,阳军生³

(1.长沙市轨道交通集团有限公司,湖南长沙 410001;2.中铁二十五局集团第五工程有限公司,山东青岛 266101;

3.中南大学土木工程学院,湖南长沙 410075)

摘要:依托长沙市地铁三号线建设项目,针对烈士公园东站—丝茅冲站区间隧道所穿越内河淤泥质粉质黏土地层的特点,分析盾构穿越该地层的工程风险,统计分析盾构穿越该地层时的地表沉降,有针对性地提出盾构穿越时预加固方案和加固范围,并依据加固与未加固时盾构掘进引起的地表沉降和对应盾构掘进参数对预加固处理效果进行检测分析。结果表明,经高压旋喷桩密排注浆加固后,内河淤泥质粉质黏土地层得到显著改良,盾构掘进引起的地表沉降明显小于未加固时;盾构掘进速度有所提高,且土仓压力明显减小,掘进效率大幅度提高。

关键词:隧道;盾构掘进;淤泥质粉质黏土;高压旋喷桩;地层预加固;注浆效果

中图分类号:U455.49

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2025)01-0116-06

随着城市地铁、地下综合管廊和“一带一路”倡议的推进,隧道工程迎来飞速发展,越来越多的隧道穿越城区复杂地质条件,盾构机在隧道建设中得到广泛应用。淤泥质粉质黏土富含有机质,含水量大于液限,孔隙比通常大于1,具有高压缩性和低强度的特点,盾构穿越这类地层时易产生液化,发生较大的地表沉降,不进行加固处理极有可能引发工程事故^[1]。针对淤泥质粉质黏土地层的加固处理,杨世武进行注浆工艺和注浆参数选取,结合实测数据,证明劈裂注浆能明显改善淤泥质地层的性能^[1];周书明等通过对注浆过程及加固原理的分析,提出了淤泥质地层劈裂注浆中注浆材料、注浆压力、注浆量设计依据^[2];杨树才等采用大管棚加小导管全断面或局部注浆加固软流塑淤泥质粉质黏土地层,提出了合适的材料配合比^[3];肖颖对淤泥质土的加固范围和施工工艺进行研究,建议优选考虑地面预加固措施,无条件时采用洞内加固措施^[4]。上述研究大多采用注浆方法对淤泥质地层进行加固处理,提高淤泥质地层的性能。注浆施工时,若不对注浆加固范

围及地层加固后效果加以分析,极易导致注浆过量或注浆不足^[5]。因此,探明注浆加固范围,分析加固后效果,给出具体的加固施工工艺,对于盾构施工安全穿越淤泥质地层十分必要。鉴于此,本文依托长沙地铁三号线隧道工程,通过分析盾构穿越淤泥质粉质黏土地层的风险,统计盾构穿越该地层所引起的地表沉降,确定现场加固方式和加固范围,并通过盾构穿越后地表沉降、隧道净空收敛和拱顶沉降及掘进参数变化验证加固效果。

1 工程背景

1.1 工程概况

长沙地铁三号线烈士公园东站—丝茅冲站区间(以下简称烈丝区间)隧道工程右线里程为YDK25+209.226—YDK26+736.076,短链1.172 m,全长1 525.678 m;左线里程为ZDK25+209.226—ZDK26+736.076,短链0.817 m,全长1 526.033 m。区间线间距12.0~17.0 m,线路平曲线最小半径为3 000 m,最大竖曲线半径为5 000 m,

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878669)

最大坡长为 540 m,区间隧道埋深为 5.400~17.940 m。右线盾构先进行掘进,盾构管片外径 6.0 m,管片内径 5.4 m,管片环宽 1.5 m^[6]。穿越区间的地形地貌特征见图 1。



图 1 长沙地铁三号线烈丝区间的地形地貌特征

区间线路出烈士公园东后沿车站北路一直往北前行,根据《长沙市轨道交通 3 号线一期工程烈士公园东—丝茅冲站区间补勘报告》^[7],淤泥质粉质黏土在隧道左线主要分布于 ZDK26+350—610 段,在隧道右线主要分布于 YDK26+363—568 段,厚度为 0.60~5.00 m,平均厚度为 2.36 m,层顶标高为 24.39~32.46 m。全新统淤泥质粉质黏土层为浏阳河 I 级阶地主要地层,呈褐色、灰褐色、流塑~软塑状,工程性状较差,对盾构隧道施工影响较大。盾构掘进过程中,易发生较大沉降和变形,且沉降和变形较为滞后,持续时间长,需采取相应措施进行控制。图 2 为穿越淤泥质粉质黏土地层的一部分区间的纵断面图。

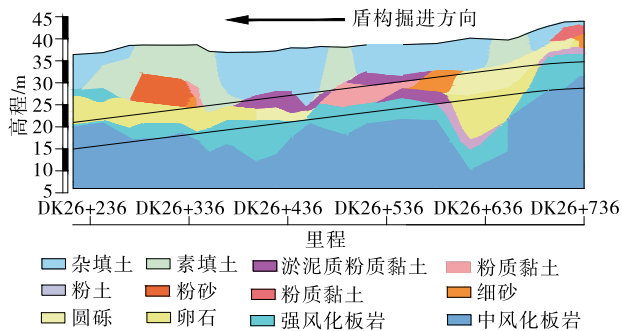


图 2 盾构穿越淤泥质粉质黏土地层的纵断面图

1.2 盾构隧道穿越淤泥质粉质黏土地层的风险

根据文献^[8]及施工实践经验,盾构隧道施工主要风险包括盾构掘进风险、第三方构筑物风险、盾构适应性与可靠性、盾构进出洞风险、盾构设备风险、管片拼装风险和盾构运输与安装风险。结合烈丝区间的水文地质和设计情况,该区间盾构掘进的主要风险源为盾构穿越淤泥质粉质黏土地层。

淤泥质粉质黏土地层的力学性质不稳定,含水量很高,压缩性很大,且不均匀,工程性状差,盾构掘进时易发生掌子面失稳,盾构穿越该土层时施工风险较大。同时该土层具有高压缩性和低强度的特性,盾构掘进容易引起较大地表沉降和土层不均匀沉降,很容易造成上覆建筑物倾覆和开裂。该隧道围岩级别为 VI 级,岩土施工工程分级为 I 级,施工时易产生坍塌变形,盾构掘进过程中须采取加固措施加强土体的黏聚力,减小渗透系数,以保证盾构安全通过且不引起较大地表沉降,避免发生地表塌陷和上覆结构损坏等事故,同时减小对周边环境的影响。

1.3 盾构穿越淤泥质粉质黏土地层时的地表沉降

图 3 为盾构前期已掘进完成区间(YDK26+164—760)的地表沉降最大值。

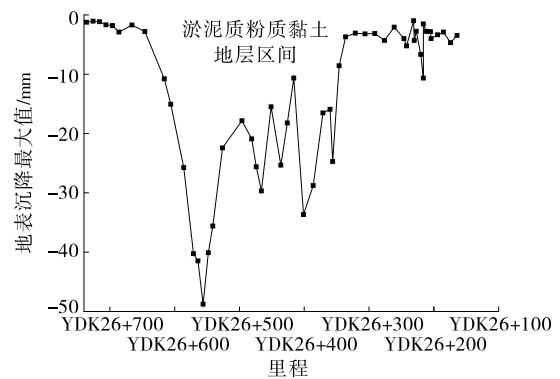


图 3 YDK26+164—760 断面地表沉降最大值

由图 3 可知:盾构在淤泥质粉质黏土地层中掘进时,部分断面的地表沉降值超过监测预警值(30 mm),其中 YDK26+556 断面的地表沉降达到 50 mm,远超过监测预警值。若将地表沉降控制在 5 mm 以内,则盾构掘进对地表沉降的影响、对上覆结构物的损害可忽略^[9]。因此,对淤泥质粉质黏土区间应采取加固措施控制地表沉降。

2 加固方案及施工工艺

2.1 加固方式

烈丝区间隧道穿越的淤泥质粉质黏土地层的工程地质条件差,盾构直接穿越易引起较大地表沉降和土层不均匀沉降,施工风险较高。为保证淤泥质粉质黏土区间盾构隧道施工和运营期间的安全,在施工前对地层进行预加固处理。盾构隧道穿越软土地层的预加固方法主要有高压旋喷桩^[10]、三轴搅拌桩^[11]、超前注浆孔注浆^[12]等。依据该区间隧道所穿越淤泥质粉质黏土的含水率、强度、地层厚度等参

数,通过工程类比^[13],考虑加固方法的地层适应性等因素,采用高压旋喷桩对地层进行预加固处理。高压旋喷桩能有效提高土体强度,其施工简便,工艺简洁,可靠性高,施工效率较高,在软弱地层加固中应用广泛。

2.2 加固范围

淤泥质粉质黏土大致分布在隧道顶部往上、往下各 3 m 范围,根据盾构掘进对地表沉降的影响范围选取合适的加固范围。采用 FLAC^{3D} 建立典型断面三维数值分析模型,模型尺寸为 50 m(x 方向)×30 m(y 方向)×50 m(z 方向),盾构掘进每循环进尺为 1.5 m。模型上表面为自由面,侧面施加法向约束,下表面施加固定约束,土层加固范围为淤泥质粉质黏土所在区域。图 4 为隧道数值分析模型正视图及土层分布。

土层和管片均采用实体单元,土层采用莫尔-库伦模型,管片采用弹性本构,土层和管片参数见表 1。

表 1。根据文献[14],注浆后围岩黏聚力增大为原来的 1.95 倍,内摩擦角增大为原来的 1.05 倍,同时土体弹性模量增大。因此,将加固后土体黏聚力和弹性模量增大为原来的 2 倍,计算盾构掘进引起的地表沉降。

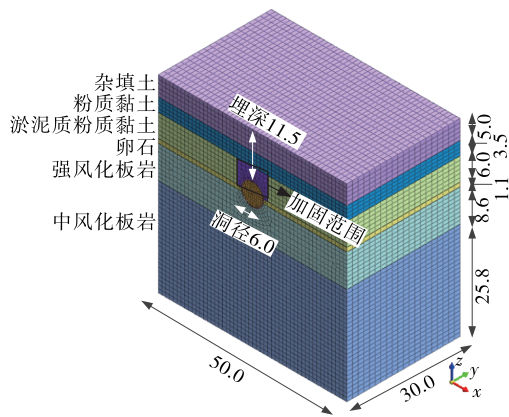


图 4 隧道三维数值分析模型及土层分布(单位:m)

表 1 土层和管片参数选取

| 土层和管片 | 重度/ (kN·m ⁻³) | 变形模量/MPa | | 泊松比 | 黏聚力/kPa | | 内摩擦角/(°) |
|---------|------------------------------|----------|---------|------|---------|-------|----------|
| | | 加固前 | 加固后 | | 加固前 | 加固后 | |
| 杂填土 | 19 | 8 | 16 | 0.35 | 9.0 | 18.0 | 17.9 |
| 粉质黏土 | 19 | 6 | 12 | 0.40 | 24.1 | 48.2 | 20.2 |
| 淤泥质粉质黏土 | 19 | 7 | 14 | 0.45 | 6.0 | 12.0 | 16.8 |
| 卵石 | 23 | 35 | 70 | 0.25 | 2.0 | 4.0 | 40.0 |
| 强风化板岩 | 23 | 120 | 240 | 0.25 | 25.0 | 50.0 | 35.0 |
| 中风化板岩 | 27 | 24 000* | 48 000* | 0.25 | 100.0 | 200.0 | 40.0 |
| 管片 | 25 | 34 500* | 69 000* | 0.20 | — | — | — |

注:*表示弹性模量数据。

图 5 为加固前后地表沉降对比。由图 5 可知:隧道中心线处地表沉降最大,加固前地表沉降最大值为 34.60 mm,超过监测预警值(30 mm);预加固后地表沉降最大值仅为 4.87 mm,采用旋喷桩加固

淤泥质粉质黏土,能满足沉降控制要求。水平方向加固范围为隧道结构外轮廓以外 1.0 m,垂直方向加固范围为隧道拱顶上下各 3.0 m。

2.3 加固实施方案

该工程地层加固区域纵向加固长度为 113.1 m,里程为隧道左线 ZDK26+343.330—456.43,水平加固至盾构隧道轮廓以外 1.0 m,垂直加固深度为隧道拱顶上下各 3.0 m,局部淤泥质粉质黏土厚度近 4.0 m,将其加固区域扩大至隧道拱顶以下 4.0 m。图 6、图 7 分别为淤泥质粉质黏土地层加固方案的纵断面图和横断面图。

对淤泥质粉质黏土地层采用 φ800 mm 三重旋喷桩密排进行加固,加固后土体 28 d 无侧限抗压强度不小于 1.2 MPa,渗透系数不大于 10⁻⁵ cm/s。采

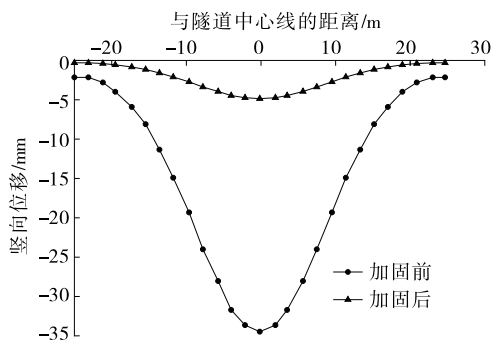


图 5 加固前后地表沉降对比

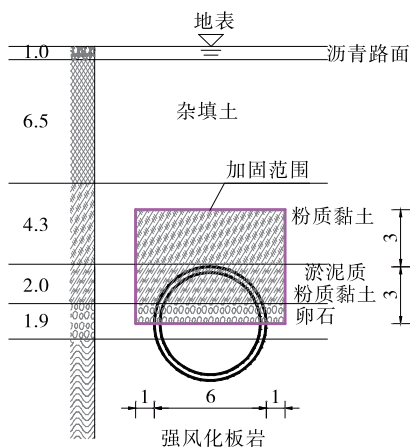


图 6 淤泥质粉质黏土地层加固方案横断面(单位:m)

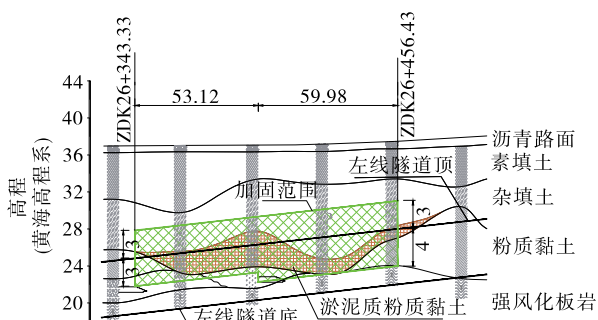


图 7 淤泥质粉质黏土地层加固方案纵断面(单位:m)

用旋喷桩加固地层能增加隧道上覆地层的密度及重度,提高其整体承载力和稳定性,改善土层的物理力学性质,提高土层的黏聚力和内摩擦角,提高土体抵抗变形的能力,从而控制地表沉降。

2.4 地层加固现场施工

高压旋喷桩通过高压泵使混凝土泥浆通过刀具喷嘴高速冲刷并切削混凝土土体,同时刀具以一定的速率旋转上升,使混凝土泥浆和土体充分融合,凝结后形成具有一定强度的旋喷桩体系,起到强化土层的作用。施工工艺流程(见图 8):

(1) 桩位放样。使用全站仪测定旋喷桩位置,确认测设位置准确后,实地进行桩定位。

(2) 钻机定位与钻进。钻机安装完成后,进行调平、对中处理,保证垂直度。使用前调试设备,确保设备运行正常。调试完成后,引孔钻进,钻设至设计深度后,抽出岩芯管,换上注浆管并插入至预定深度。

(3) 浆液配制。选择 42.5 级以上硅酸盐早强水泥,并添加外加剂和掺合料,通过试验确定各类组分的用量。

(4) 旋喷提升。注浆管插入就位后,接入泥浆泵,从下往上旋喷,同时进行废水处理和排放,旋喷

的同时将泥浆及时清理排出。旋喷抬升过程中,根据土层性质变化,及时调整旋喷参数。

(5) 钻机移位。旋喷抬升至测定桩顶高程时停机,将钻头和管线等取出,将钻机移动至下一测设桩位。重复以上操作,施工下一根旋喷桩。

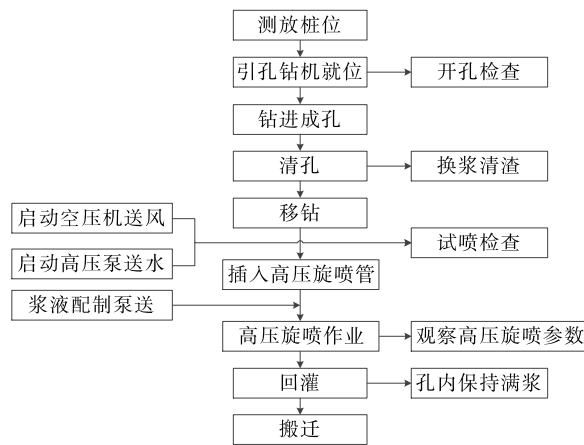


图 8 旋喷桩施工工艺流程

3 加固效果分析

地层预加固是隐蔽工程,常采用钻孔取芯的方法检验加固效果。考虑到该工程盾构还未掘进通过,取芯处理会影响盾构掘进的安全性,通过对比地层加固区与未加固区的地表沉降、隧道典型断面的净空收敛和拱顶沉降及盾构掘进参数,动态评价地层预加固效果^[10]。

3.1 基于地表沉降和隧道收敛沉降的加固效果分析

左右线盾构掘进引起的地表沉降随时间的变化见图 9,隧道典型断面的净空收敛和沉降变化分别见图 10、图 11。

由图 9~11 可知:在同一断面处,左线盾构穿越引起的地表沉降为右线盾构穿越(先行掘进)时的 11%左右,沉降值在 5 mm 以内。右线掌子面的沉

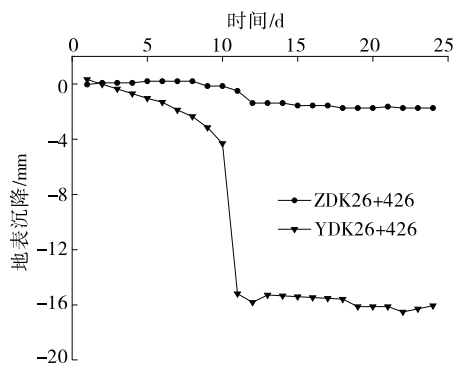


图 9 左右线盾构掘进引起的地表沉降随时间的变化

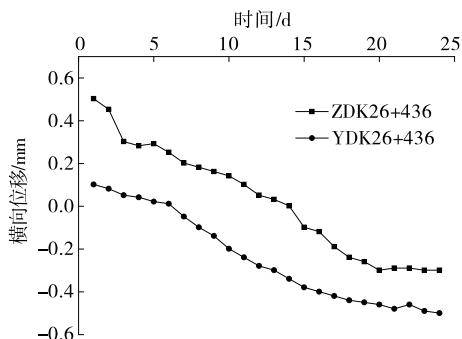


图 10 左右线典型断面净空收敛随时间的变化

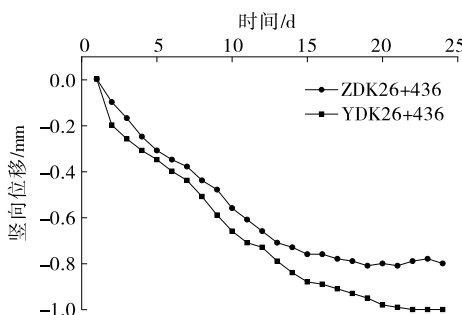


图 11 左右线拱顶沉降随时间的变化

降较小,盾构机尾部穿越该断面后地表沉降突然增大;经过预加固和掘进参数优化的左线,盾构掘进过程中地表沉降变化较均匀。左线盾构掘进引起的净空收敛和拱顶沉降均远小于右线的对应值。表明高压旋喷桩预加固可有效增加土体的内摩擦角和黏聚力,减少淤泥质粉质黏土的孔隙比和渗透系数,从而增大土体密度,显著提高土体的稳定性,加固效果显著。

3.2 基于掘进参数的加固效果分析

盾构施工中须依据地质条件对掘进参数进行调整,而掘进参数的变化在一定程度上可反映地质状况,可利用掘进参数的变化规律和趋势判断地层情况^[9]。对比左线和右线盾构穿越淤泥质粉质黏土区段的盾构掘进参数,根据掘进参数值大小及变化规律分析淤泥质粉质黏土层的加固效果。

3.2.1 掘进速度

左右线盾构掘进速度对比见图 12、表 2。由图 12 可知:相比右线,左线地层加固区的盾构掘进速度更快、更均匀且平稳,说明加固后地层条件得到显著改善。

由表 2 可知:地层预加固处理后,左线盾构掘进速度明显高于右线,标准差和变异系数小于右线,说明左线盾构掘进速度更平稳;左线掘进速度平均值

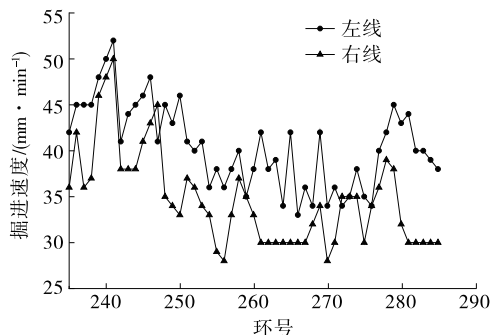


图 12 左右线盾构掘进速度对比

表 2 盾构掘进速度统计结果

| 统计量 | 统计结果 | |
|-------------------------------|-------|-------|
| | 右线 | 左线 |
| 平均值/(mm · min ⁻¹) | 34.76 | 40.50 |
| 中位数/(mm · min ⁻¹) | 34.00 | 40.00 |
| 众数/(mm · min ⁻¹) | 30.00 | 38.00 |
| 标准差 | 5.19 | 4.57 |
| 变异系数 | 0.14 | 0.11 |
| 最大值/(mm · min ⁻¹) | 50.00 | 52.00 |
| 最小值/(mm · min ⁻¹) | 28.00 | 33.00 |

比右线增长约 16.51%,掘进速度提高。说明高压旋喷桩预加固使加固区域土体更均匀,掘进速度更易于控制。结合图 9,左线的掘进速度快,地表沉降变化却很小,说明地层预加固效果较好,有效控制了地表沉降。

3.2.2 土仓压力

盾构穿越淤泥质粉质黏土地层时,地层自稳能力越差,维持掌子面稳定所需土仓压力越大,而土仓压力又会间接影响地表沉降大小。左右线隧道盾构掘进时的土仓压力对比见图 13、表 3。

由图 13 可知:预加固后,地层稳定性得到显著

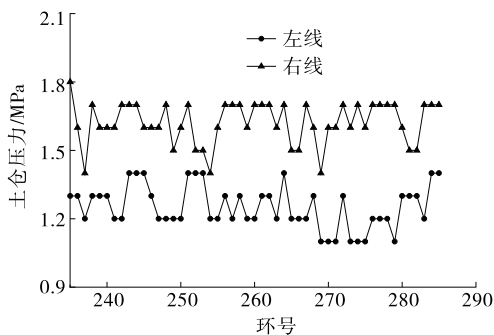


图 13 左右线土仓压力对比

表 3 土仓压力统计结果

| 统计量 | 统计结果 | |
|---------|------|------|
| | 右线 | 左线 |
| 平均值/MPa | 1.62 | 1.25 |
| 中位数/MPa | 1.60 | 1.20 |
| 众数/MPa | 1.70 | 1.20 |
| 标准差 | 0.09 | 0.09 |
| 变异系数 | 0.05 | 0.07 |
| 最大值/MPa | 1.80 | 1.40 |
| 最小值/MPa | 1.40 | 1.10 |

提高,用于维持掌子面稳定的土仓压力有所减小。

由表 3 可知:左右线的土仓压力标准差和变异系数均较小,土仓压力变化较小,且波动性小;左线土仓压力平均值约为右线的 0.77,说明经过预加固后,用于维持掌子面稳定的土仓压力有所减小。结合图 13,左线盾构土仓压力稳定在 1.2 MPa 左右,对应于半仓土压平衡掘进状态,掘进速度较快,掘进效率有所提升。施工监测发现,左线掌子面稳定性较好,且地表沉降(见图 9)得到有效控制,确保了掌子面的稳定和施工的安全,说明地层预加固处理效果良好。

综合分析预加固区域盾构区间的掘进速度和土仓压力,采用高压旋喷桩预加固后,淤泥质粉质黏土地层特性得到显著改善,盾构机推进能耗大幅度降低,掘进效率明显提升,同时地表沉降得到有效控制,地层预加固方案的效果较好。

4 结论

(1) 综合考虑隧道所穿越淤泥质粉质黏土地层的特点和加固方法的地层适应性等因素,提出高压旋喷桩密排预加固处理方案,垂直加固范围为隧道拱顶往上、往下各 3 m,水平加固范围为隧道轮廓线外侧各 1 m。

(2) 盾构穿越加固地层段时,地表沉降为未加固时的 11%左右,沉降值在 5 mm 以内,隧道典型断面的净空收敛和拱顶沉降均在 1 mm 以内,同时预加固后地表沉降变化较稳定,预加固措施明显提高了淤泥质粉质黏土地层的稳定性。

(3) 在加固后淤泥质粉质黏土地层中掘进时,盾构掘进速度为未加固时的 1.17 倍,左线土仓压力平均值约为右线的 0.77,经过预加固处理后,用于维

持掌子面稳定的土仓压力有所减小,盾构机为半仓土压平衡掘进状态,掘进速度较快,且掘进效率较高,能确保掌子面的稳定和施工的安全,地层预加固处理效果较好。

参考文献:

- [1] 杨世武.淤泥质地层浅埋暗挖施工技术措施[J].铁道工程学报,2003,20(2):64-69+78.
- [2] 周书明,陈建军.软流塑淤泥质地层地铁区间隧道劈裂注浆加固[J].岩土工程学报,2002,24(2):222-224.
- [3] 杨树才,杨旭,程曦,等.软流塑淤泥质粉质黏土地层注浆加固试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2011,41(6):1283-1288.
- [4] 肖颖.不良地层盾构隧道注浆加固技术[J].交通世界,2019(13):112-113+117.
- [5] 严伟飞,尚佩,陈永生,等.后压浆法对桥梁单桩承载力增强效应研究[J].公路与汽运,2020(3):110-112+117.
- [6] 广东省重工建筑设计院有限公司.长沙市轨道交通 3 号线一期工程烈士公园东站—丝茅冲站区间施工图设计[R].广州:广东省重工建筑设计院有限公司,2015.
- [7] 长沙市规划勘测设计研究院.长沙市轨道交通 3 号线一期工程烈士公园东站—丝茅冲站区间岩土工程施工勘察报告[R].长沙:长沙市规划勘测设计研究院,2016.
- [8] 何理,仇陪云,石杰红,等.城市轨道交通施工风险统计及事故特征分析[J].中国安全生产科学技术,2020,16(增刊 1):130-134.
- [9] 罗建华.客运专线线下工程工后零沉降建设理念探索[J].路基工程,2008(3):73-74.
- [10] 姜海波,狄宏规,周顺华.旋喷加固淤泥层近距离交叠隧道施工扰动分析[J].公路,2023,68(1):407-416.
- [11] 杨平,陈杰,张志宇,等.深厚软流塑地层预加固对盾构隧道掘进变形的影响[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2022,38(6):1046-1054.
- [12] 刘启明,柳卓,刘学武,等.富水砂卵石地层隧道盾构下穿地铁线注浆方案优化[J].公路与汽运,2021(2):143-146.
- [13] 曾学艺,李垚,彭斌.大直径盾构隧道穿越粉细砂地层注浆加固预处理研究[J].中外公路,2017,37(2):181-184.
- [14] 许宏发,耿汉生,刘伟东,等.基于 BQ 的破碎岩体注浆加固强度增长理论[J].岩土工程学报,2014,36(6):1147-1151.