

快融注浆在冻结法施工中的应用

史志明¹ 卢为杰² 马忠政² 郝明强¹

(1. 中煤隧道工程有限公司, 221001, 徐州;

2. 上海轨道交通十三号线发展有限公司, 200070, 上海//第一作者, 高级工程师)

摘要 快融注浆就是通过冻土内热盐水循环使冻土温度逐渐上升并快速解冻, 同时进行土体注浆控制融沉。在上海城市轨道交通 13 号线单侧泵站工程中, 采用快融注浆方法, 通过合理设置解冻分区和解冻顺序, 优化解冻工艺、注浆参数及注浆时机, 加快了冻结壁的解冻速度, 减少了融沉固结的时间, 缩短跟踪注浆的周期, 从而更好地控制地层融沉, 保证了地铁隧道的后期建设工期及安全运营。

关键词 隧道; 单侧泵站; 冻结法; 快速解冻; 融沉注浆

中图分类号 U455.49

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.09.039

Application of Quick Melt Grouting in Freezing Construction

SHI Zhiming, LU Weijie, MA Zhongzheng, HAO Mingqiang

Abstract Quick melt grouting is to raise the temperature of the frozen soil gradually and unfreezing the soil rapidly, at the same time control the thawing settlement by grouting the melt soil. The quick melt grouting method is applied in a project of the unilateral pumping station on Shanghai metro Line 13. By reasonable setting of the thawing zone and the thawing sequence, the thawing process, grouting parameters and grouting time are optimized. As a result, the thawing speed of the frozen wall is accelerated, while the thawing and consolidation time of the soil is reduced. This technology shortens the period of tracing compensation grouting, controls the stratum thawing and subsidence effectively, therefore guarantees the later construction period and safety operation of metro tunnel.

Key words tunnel; unilateral pumping station; freezing method; fast thawing; fast thaw grouting

First-author's address China Coal Tunnel Engineering Co., Ltd., 221001, Xuzhou, China

冻结法加固土体、矿山法暗挖已成为地铁隧道单侧泵站的主要施工方法。但土体在冻结过程中体积会发生膨胀, 解冻融化过程中由于冻土体排水

固结、冻土体积减小, 会引起较大的压密沉降和地表融沉, 对隧道、道路管线和附近建筑造成一定的影响^[1-3]。地铁隧道单侧泵站结构完成后, 常规的自然解冻及跟踪注浆的工法, 一般需要 4~6 个月时间^[4-6]。由于冻结壁自然解冻持续时间长, 后期地层的融沉注浆质量难以得到有效保证。现实中地铁隧道旁通道及侧向泵站施工还面临着铺轨施工工期和进度的考验, 冻结法施工沉降未稳定就铺设轨道道床, 后期将面临道床与隧道一起沉降的问题, 影响列车通车上线调试和运行安全。因此, 加快冻土体解冻的速度, 有效控制隧道融沉, 成为当前急需解决的问题。

采取快融注浆的方法就是利用原冻结管及部分原盐水循环系统, 将冻结管中的冷盐水换成热盐水进行循环, 使冻结土体的温度逐渐上升, 冻土中的冰快速融化, 达到快速解冻土体、缩短融沉时间的目的。在快速解冻过程中, 需要及时跟踪注浆控制沉降, 保护好隧道及地面环境。

本文以上海市轨道交通 13 号线三期工程华夏中路站—张江站出场线盾构区间单侧泵站快速解冻施工为例, 讨论快融注浆法的应用。

1 工程概述

单侧泵站位于区间左 K1+219.185 处, 距出场线始发井 1 096.3 m, 距中科路站 1 244.065 m。所处位置隧道中心与泵站中线间距 6.00 m, 开挖尺寸为 5.65 m(长)×3.3 m(宽)×7.4 m(高), 底部埋深 26.958 m。所处土层自上而下依次为④灰色淤泥质黏土、⑤1 灰色黏土、⑤2 灰色砂质粉土夹粉质黏土、⑤2-1 灰色粉质黏土、⑤1j 灰色粉质黏土夹黏质粉土。所处各土层的热物理性能参数如表 1 所示。

单侧泵站采用冻结暗挖法施工, 共布置冻结孔 85 个, 冻结加固范围为开挖面外侧喇叭口处≥1.8

表1 泵站所处的各土层热物理性能参数表

层序	土名	含水量/ %	导热系数 $\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$			比热容 $C_p/(kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$			导温系数 $\alpha/(m^2/h)$		
			最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
④	灰色淤泥质黏土	50.0	1.063	1.162	1.109	1.708 8	1.817 7	1.770 0	0.001 3	0.001 4	0.001 3
⑤1	灰色黏土	42.5	1.152	1.286	1.228	1.603 1	1.762 6	1.691 6	0.001 4	0.001 6	0.001 5
⑤2	灰色砂质粉土	28.6	1.476	1.766	1.653	1.333 4	1.680 1	1.473 9	0.001 7	0.002 3	0.002 1
⑤2-1	灰色粉质黏土	35.2	1.352	1.523	1.443	1.535 7	1.646 6	1.608 1	0.001 7	0.001 9	0.001 7
⑤1j	灰色粉质黏土夹砂质粉土	33.9	1.164	1.533	1.300	1.400 0	1.680 3	1.575 5	0.001 4	0.002 0	0.001 7

m,通道正常段及泵站≥2.1 m,通道端头≥2.4 m,平均温度均为-10℃。快速解冻注浆孔48个,每个注浆孔对应相应的冻结孔,以保证快速解冻后注浆的及时性。

2 快融注浆方案

2.1 快速解冻系统

土体冻结完成冻站撤场时保留盐水泵、盐水箱、部分盐水管和全部冻结管等部分施工平台及供电系统用于快速解冻工程,制作加热水箱2个,高温及低温各一个,单个盐水箱长、宽、高参考尺寸为2.5 m×1.5 m×1.5 m,根据分区冻结管长度及干管长度确定盐水箱体积15 m³,盐水比重1.26 kg/L。其中,高温加热箱安装12 kW加热管8个,低温加热箱安装12 kW加热管6个,如图1所示。为防止冻结管在温度急剧变化下断管,先用低温盐水循环并逐步加热到30℃的热盐水循环0.5 h后,再转换至加热到70℃的高温盐水箱进行循环解冻,盐水温度控制在(70±5)℃左右,盐水循环压力为0.3 MPa,解冻冻结孔每组流量为5~8 m³/h。

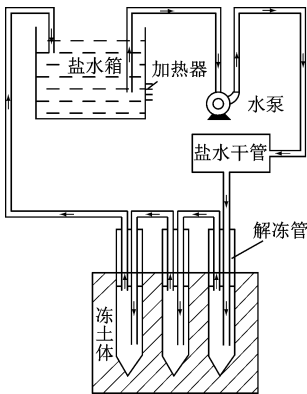


图1 盐水箱加热及盐水循环系统

利用在冻结期间的自动温度监测系统监测解冻土体的温度变化情况,在每个快速解冻分区内布置测温孔以监测快速解冻速率。

相对于自然解冻,快速解冻是一种土体冻结的逆向过程,冻土快速解冻所需的功率为:

$$Q_x = k\pi dnHq \tag{1}$$

式中:

- Q_x ——冻土解冻所需功率,kW;
- k ——热量损失系数,取值1.5;
- d ——冻结管的直径,m;
- n ——需解冻冻结孔数量;
- H ——单根冻结管平均深度,m;
- q ——冻结管的放热率,取0.35 kW/h。

2.2 快速解冻分区

单侧泵站由与隧道管片相连的喇叭口、水平通道和集水井构成,冻土体快速解冻共分6个区,如图2所示,按照先泵站底部,再两侧,最后顶部的解冻顺序实施解冻。

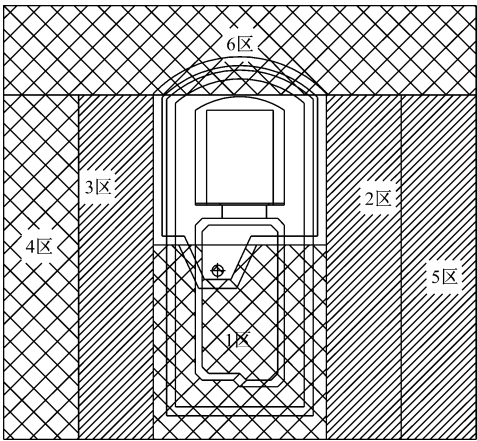


图2 解冻分区图

对快速解冻热盐水管路连接进行分组如图3所示。其中1区分组为1组、12组,2区分组为2组、3组、4组、5组,3区分组为13组、14组、15组、16组,4区分组为6组、7组、9组、10组,5区分组为17组、18组、19组、20组,6区分组为11组、21组、22组。

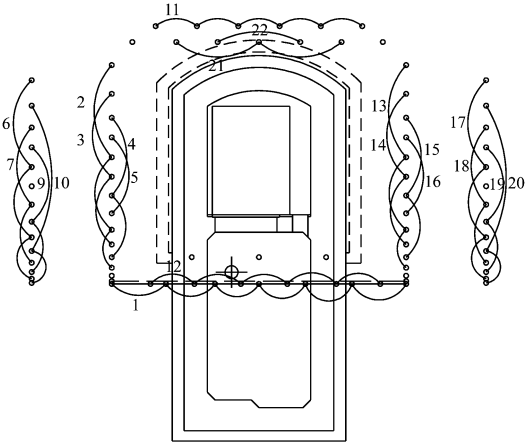


图3 解冻孔分组图

2.3 注浆孔布置

注浆孔在单侧泵站结构施工时预埋,按每 3~4 m² 布置 1 个,本工程共布置注浆孔 48 个,其中通道布置注浆孔 24 个,集水井布置注浆孔 24 个。单侧泵站各剖面注浆孔的布置如图 4 所示。

3 快速解冻发展规律

3.1 自然解冻的速度

受周围地温、结构混凝土的水化热、融沉注浆水化热及隧道通风等自然及外部环境影响引起的自然净解冻速度参照《建井工程手册》,对应不同冻结地层类型,解冻速度试验值如表 2 所示。

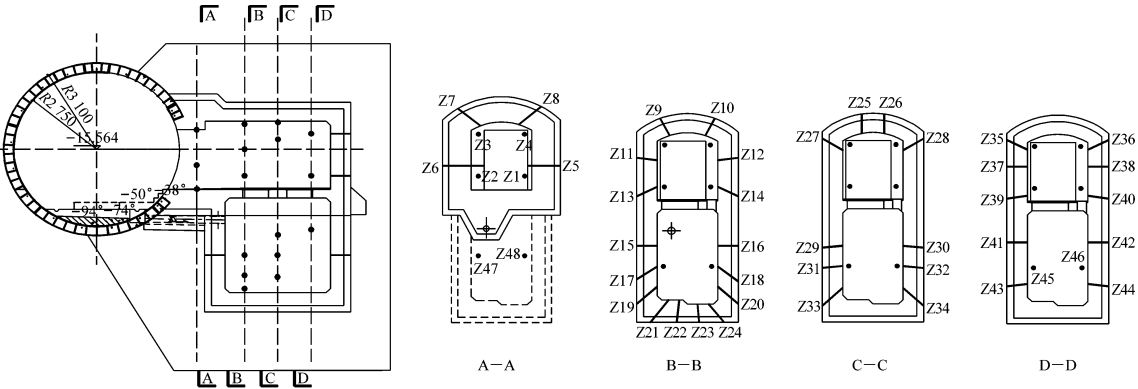


图4 注浆孔布置剖面图

表 2 不同地层自然净解冻速度^[7]

序号	冻结地层	净解冻速度/(mm/d)
1	钙质黏土	11.00
2	砂质黏土	11.57
3	细沙	13.76
4	粗中砂	14.22
5	中粗砂	16.88
6	砂砾层	17.41

3.2 快速解冻的速度

根据试验得到人工快速解冻的平均速率 V_q 约为 70 mm/d,由于同时存在自然解冻的现象,自然解冻平均速率 V_z 一般为 11~15 mm/d,两者叠加得到快速解冻平均速率 V_r ,根据冻结壁厚度 E ,即可确定各冻结区解冻完成的时间,快速解冻时间为:

$$T = E/2V_r = E/2(V_q + V_z) \tag{2}$$

式中:

- T ——快速解冻时间,d;
- E ——冻结壁厚度,一般为 2 000 mm;
- V_r ——快速解冻平均速率,mm;

- V_q ——冻结壁人工解冻速度,mm/d;
- V_z ——冻结壁自然解冻速度,mm/d。

3.3 快速解冻发展规律

强制解冻时间从 2018 年 4 月 1 日开始,至 2018 年 5 月 1 日结束,共用时 30 d,其中单侧泵站一区最终解冻时间为 12 d,二区到六区解冻时间逐渐递减,平均每个分区 5 d,后期融沉注浆共用时 20 d,整个快速解冻融沉注浆工期为 50 d。通过温度监测系统得到的各测温孔温度变化情况如图 5 所示。图中可见:在第一阶段,土体温度快速上升,冻结壁平均温度上升至 -3℃左右时开始解冻;第二阶段,土体相变期,冻结壁平均温度上升至 -1℃后,土体相变持续时间较长,温度变化缓慢;第三阶段,持续升温阶段,该阶段冻结壁解冻速度加快,土体温度随时间明显上升。根据图 5 温度变化的趋势可得,冻土体在负温时温度变化较慢,而在正温后温度变化速度较快,冻结壁外侧比内侧解冻较快。

通过监测得到,解冻发展速度 V_r 在 46.4~106.2 mm/d 之间, V_r 平均值为 76.4 mm/d,以此值预测各断面快速解冻温度场发展及解冻交圈情况,

得到各断面最终解冻完成状态,如图 6 所示。

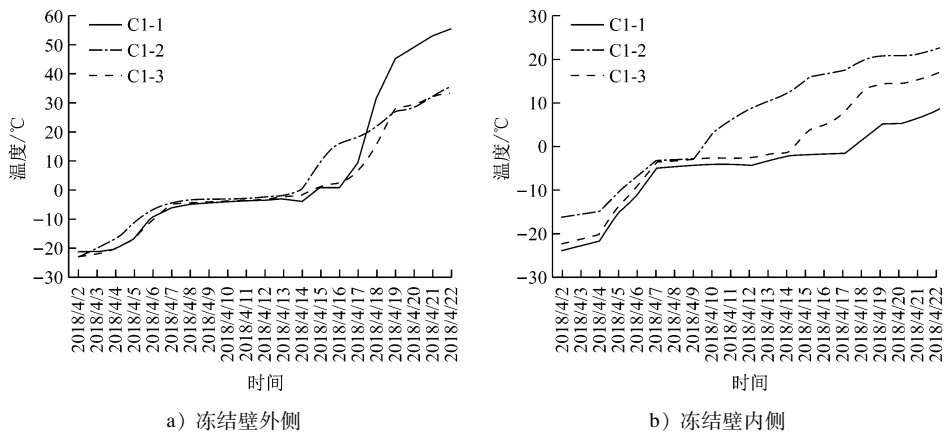


图 5 测温孔测温记录

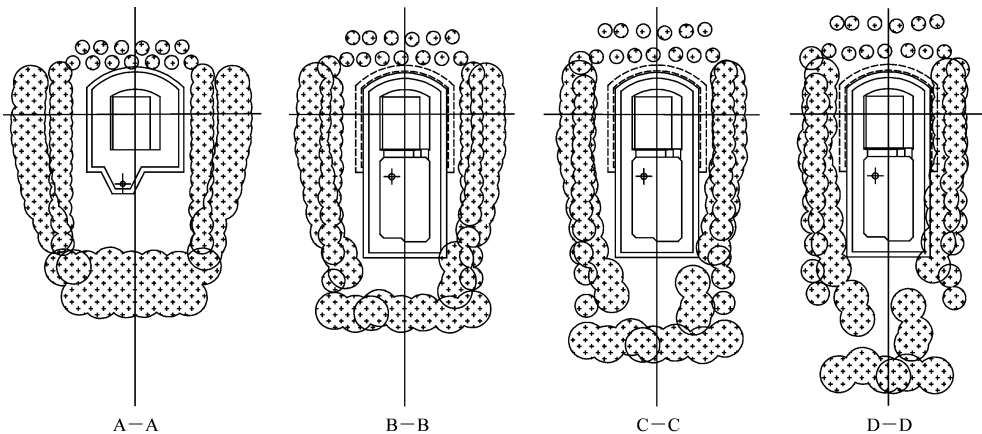


图 6 解冻完成状态

4 快融注浆方案设计

4.1 快融注浆材料选择

快融注浆材料采用单液水泥浆为主,C-S 双液浆为辅。水泥等级强度为 P. O 42.5,单液浆水灰比一般为 0.8:1,双液浆水泥浆的配合比为 1:1,水玻璃为 35~40°Be。将配好的水泥浆液和水玻璃浆液按照体积比 1:1 混合注入。

4.2 注浆参数设置

注浆过程中应遵照“少量、多次、均匀、多点、及时”的原则,并根据隧道、地面、管线以及建筑物的沉降和解冻温度场的监测,适时调整注浆量和注浆时间间隔,确保沉降稳定^[8-10]。通过测温孔的监测掌握注浆时机,当冻结壁融化至厚度的 50%~70% 时,立即采用预埋注浆孔进行跟踪补偿注浆,直至解冻完成止。当冻结壁全部强制解冻完成后,停止该分区热盐水循环,随即转入下一分区进行强制解

冻。为将浆液有效注入到融化的冻结土体中,在注浆前,首先钻孔疏通预留注浆孔,注浆管钻孔钻进深度至加热融化区内即可。在注浆压力选择上,为保证隧道及单侧泵站结构安全,实际施工中正常注浆压力最大不超过 0.5 MPa,后期注浆困难时最大不超过 0.8 MPa。注浆流量控制在 0~70 L/min,注入双液浆时应配备混合器,使浆液进入地层前均匀混合。

4.3 快融注浆方案效果分析

从 4 月 1 日开始快融注浆到 5 月 20 日注浆结束,累计注浆 132 m³,其中前 35 d 累计注入单液浆 106 m³,后 15 d 累计注入双液浆 26 m³。单侧泵站通道注浆 20 m³,集水井注浆 112 m³。为分析融沉注浆沉降的控制效果,分别在单侧泵站结构内部、地面及泵站所在隧道管片布置沉降监测点。监测结果显示,快融注浆期间隧道沉降位移累计最大 -3.8 mm,收敛 17 mm,地面沉降位移累计最大

-19 mm,解冻期间隧道沉降变形基本维持稳定,注浆结束2个月后隧道沉降趋于稳定,目前区间隧道地铁运营正常。快融注浆期间隧道沉降变化如图7所示。

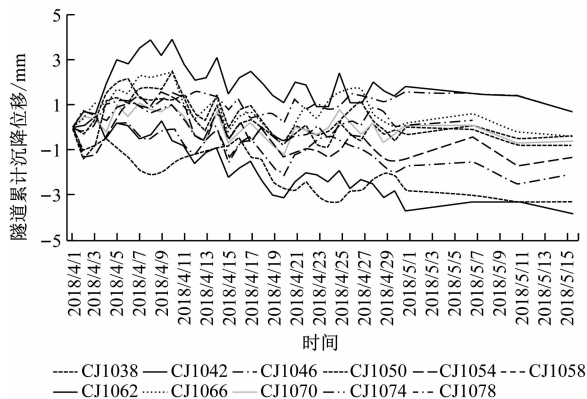


图7 隧道沉降曲线

5 结语

1) 快速解冻采用双盐水箱设置,先用低温盐水循环,并逐步加热到30℃的热盐水循环0.5 h后,再转换至加热到70℃的盐水箱进行循环解冻,可有效地控制断管风险,整个盐水加热解冻期间没有出现断管的现象。

2) 加强监测并及时注浆是有效控制隧道及地面沉降的保证,根据隧道、地面、管线以及建筑物的沉降和解冻温度场的监测,实时掌握解冻发展情况,调整注浆量和注浆时间间隔,保证冻土融化空间的及时填充,从而减小隧道和地面沉降。

3) 快速解冻不需要拔出冻结管安装注浆花管,可在拆除冻结站后组织实施,既减少了用电量,也避免了拔出冻结管的施工风险。

4) 合理分区,跳孔连接分组,适时循环热盐水快速解冻,并采取合理的注浆参数(注浆压力、注浆量、流量等)及时注浆,这是保证注浆质量控制隧道及地面沉降稳定的关键。

参考文献

- [1] 马俊,杨平.常州砂性地层联络通道解冻规律研究[J].地下空间与工程学报,2019(1):167.
- [2] 岳丰田,张水宾,仇培云.地铁联络通道冻结加固技术研究[J].地下空间与工程学报,2006(8):1341.
- [3] 肖朝昀,胡向东.人工地层冻结冻土自然解冻与强制解冻实测分析[J].长江大学学报(自然科学版),2009(3):93.
- [4] 周真云.冻结法施工强制解冻研究及施工实践[J].西部探矿工程,2003(10):84.
- [5] 陈成,杨平,张婷.高承压富含水层人工强制解冻温度场数值分析[J].郑州大学学报(工学版),2012(2):81.
- [6] 赵飞,胡向东.耦合效应下联络通道解冻规律[J].同济大学学报(自然科学版),2013(41):989.
- [7] 陈文豹,徐光济.建井工程手册[M].北京:煤炭工业出版社,1985:122-123.
- [8] 李增理,王伟.运营期地铁联络通道融沉注浆治理技术[J].隧道建设,2017(8):1032.
- [9] 刘计寒,齐家根.井筒强制解冻与冻结管射孔注浆施工技术[J].矿业工程,2012(3):62.
- [10] 吴繁,杨平,万朝栋.基于实测解冻温度的联络通道冻结法融沉注浆优化研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017(4):167.

(收稿日期:2020-01-29)

(上接第143页)

图3所示。由于受到列车限速影响,本次试验最高速度为78 km/h。

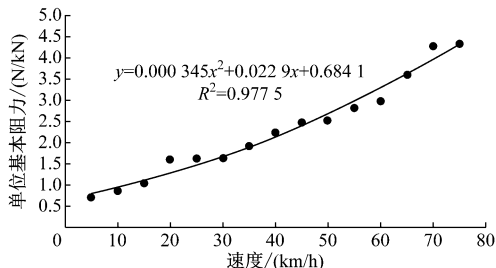


图3 列车单位基本阻力拟合结果

6 结语

列车基本阻力是列车的重要参数,但是在城轨领域长期得不到应有的重视。本文介绍在运营线

路上试验测定列车单位基本阻力公式的方法,不需要在列车安装额外试验设备,对试验线路要求较低,具有较高推广价值。

参考文献

- [1] 杨奇.城市轨道交通车辆起动牵引力选择研究[J].通信电源技术,2012(6):16.
- [2] 严修法,林建辉.直线电机驱动地铁车辆运行阻力试验研究[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2014(3):387.
- [3] 刘炜.城市轨道交通列车运行过程优化及牵引供电系统动态仿真[D].成都:西南交通大学,2009.
- [4] 徐纪康.城市轨道交通列车运行过程仿真研究[D].上海:同济大学,2008.

(收稿日期:2020-04-20)