

地铁联络通道冻结法土体温度现场试验研究

罗战友^{1a,1b}, 李晓泉^{1a}, 邹宝平^{1a,1b,2}, 易 觉³, 牟军东⁴

(1. 浙江科技学院 a. 土木与建筑工程学院; b. 隧道与地下空间技术开发研究院, 杭州 310023; 2. 中国矿业大学(北京) 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083; 3. 广东华隧建设集团股份有限公司, 广州 510335; 4. 杭州市地铁集团有限责任公司, 杭州 310003)

摘 要: 为研究地铁联络通道冻结施工在杭州淤泥质黏土地层中的土体温度变化规律及冻土帷幕厚度, 因此特依托杭州地铁5号线16标段江南大道站至江虹路西站区间1号联络通道冻结法施工项目, 进行现场冻结试验, 对测点温度及盐水去回路温度进行监测。结果表明: 冻结期间, 盐水去回路温差从2℃逐渐降至0.9℃, 冻土帷幕形成良好, 温度场趋于稳定; 受盐水温度及土中自由水相态影响, 冻结管1m处的土体温度变化曲线可大致分为快速降温、缓慢降温、自由水相变、稳定降温4个阶段; 自由水在快速降温和缓慢降温阶段为液态, 在自由水相变阶段和稳定降温阶段为固态; 累计冻结35d后, 冻结管1m范围内土体冻结, 冻土帷幕厚度达设计要求的2m。研究结果可为冻土帷幕性状分析及类似工程应用提供参考。

关键词: 地铁联络通道; 淤泥质软土; 冻结法; 测点温度; 现场试验

中图分类号: TU472.9; U456

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2021)06-0489-07

Field test study on soil temperature of subway connecting passage by freezing method

LUO Zhanyou^{1a,1b}, LI Xiaoquan^{1a}, ZOU Baoping^{1a,1b,2}, YI Jue³, MU Jundong⁴

(1a. School of Civil and Architectural Engineering; 1b. Tunnel and Underground Space Academy, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 3. Guangdong China Tunnel Construction Group Co., Ltd., Guangzhou 510335, Guangdong, China; 4. Hangzhou Metro Group Co., Ltd., Hangzhou 310003, Zhejiang, China)

Abstract: In order to study the law of soil temperature change and the thickness of frozen soil curtain during the freezing construction of subway connecting passage in Hangzhou muddy clay layer, the field freezing test was carried out on the basis of the freezing construction project of connecting passage between Jiangnan Avenue Station and Jianghong Road West Station in the 16th bid section of Hangzhou Metro Line 5, monitoring the temperature of measuring points

收稿日期: 2021-01-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602308, 41572299); 浙江省自然科学基金项目(LY20E080005); 浙江科技学院研究生教学改革研究项目(2019yjsjg01)

通信作者: 邹宝平(1982—), 男, 湖南省隆回人, 教授, 博士, 主要从事隧道工程研究。E-mail: zoubp@zust.edu.cn。

and the temperature of salt water to the loop. The results show that during the freezing period, the temperature difference of salt water to the loop gradually decreases from 2 °C to 0.9 °C, with good formation of the frozen soil curtain, and the temperature field tends to be stable; affected by salt water temperature and free water phase state in soil, the soil temperature time curve at 1 m of freezing pipe can be roughly divided into four stages: rapid cooling, slow cooling, free water phase transition and stable cooling; free water is liquid in rapid cooling and slow cooling stages, and solid in free water phase transition and stable cooling stages; after 35 days of cumulative freezing, the soil within 1 m of freezing pipe freezes, and the thickness of frozen soil curtain reaches the design requirement of 2 m. The results can provide reference for analysis of the frozen soil curtain properties and similar engineering applications.

Keywords: subway connecting passage; muddy soft soil; freezing method; measuring point temperature; field test

冻结法的本质是使土中自由水冻结,形成人工冻土,加固区土体是否冻结决定地铁联络通道能否开挖。由于联络通道通常位于城市高密集区,开挖不当会引起挖孔坍塌、地面沉陷、周边建筑倒塌等重大工程地质灾害。冻土性状是温度的函数^[1],对于冻结过程的温度场^[2-3]变化规律,国内研究人员进行了大量的探索^[4-7],结果表明,不同土体在冻结过程中所呈现的冻结特性并不相同。在室内试验方面,程知言等^[8]测试了上海地区 3 种饱和软土的起始冻结温度、未冻水含量及含冰量,得到了上海地区软黏土冻结过程的温度变化曲线。张婷^[9]进行了冻结温度、冻胀及融沉试验,研究了南京地区典型淤泥质黏土、淤泥质粉质黏土及粉砂土的冻结温度随土质、含水量、干密度、含盐量及水质的变化规律。邢述彦^[10]进行了砂壤土、轻壤土和黏土的冻结温度试验,得到了土体冻结的温度变化曲线及 3 种土在不同含水率、含盐量条件下的冻结温度。在现场试验方面,土体温度一般通过测点温度进行监测,马俊等^[11]发现冻结期间各测点温度的变化趋势大致相同,但由于冻土帷幕外侧扩散时冷量损失比内侧大,导致内侧土体降温速率及冻结锋面的移动速率比外侧快。尚晓林^[12]对冻结法施工中盐水温度、泄压孔压力、测温管温度及地表沉降进行了监测,获得了对应测点的温度变化规律。

综上所述,国内外研究人员通过室内试验对土体冻结过程的自由水相态变化及冻结温度做了大量的探索,但在现场试验方面,前人对测点温度的分析很少结合自由水的相态变化规律。由于不同性状土的冻结温度不同,若不能正确认识测点温度与土中自由水相态的关系,则将无法判断土体是否冻结。此外,不同性质的土冻结过程的温度变化规律也不相同^[13],而关于杭州地区淤泥质黏土地层冻结法施工测点温度变化规律的相关研究较为缺乏。因此我们依托杭州市轨道交通 5 号线 16 标段江南大道站至江虹路西站区间段内联络通道冻结法施工项目,进行现场冻结试验,研究在杭州淤泥质黏土地层中地铁联络通道冻结法施工的测点温度变化规律及冻土帷幕厚度,从而为分析冻土帷幕性状及类似工程提供参考。

1 试验方案

1.1 工程概况及地质条件

杭州市轨道交通 5 号线 16 标段江南大道站至江虹路西站区间段联络通道冻结施工项目位于滨安路上,通道主体部分主要位于淤泥质粉质黏土层及淤泥质粉质黏土夹粉土层,冻结加固区土层基本物理参数见表 1,加固区位置及地层信息如图 1 所示。

表 1 冻结加固区土层基本物理参数

Table 1 Fundamental physical parameters of soil layer in frozen reinforcement area

地层代号	岩土名称	含水量/%	湿重度/ (kN · m ⁻³)	土粒相对密度	孔隙比	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
④ ₂	淤泥质粉质黏土	38.7	17.9	2.72	1.114	12	13
⑥ ₁	淤泥质粉质黏土夹粉土	35.5	18.2	2.72	1.021	13	15

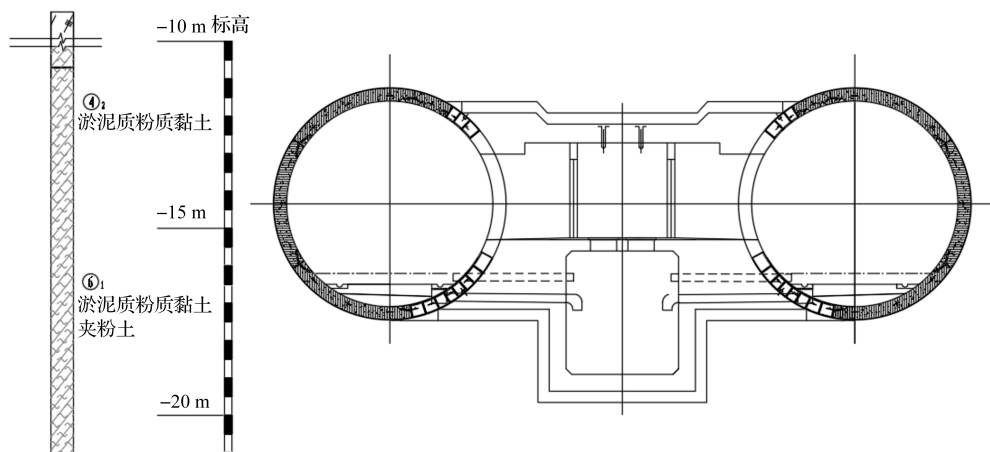


图 1 冻结加固区位置及地层

Fig. 1 Elevation and stratum of frozen reinforcement area

1.2 试验方案

冻土帷幕设计厚度为 2 m,由于地表为城市道路,为减少对交通的影响,采用水平冻结法进行冻结。冻结管共 77 根(编号为 D),选用 20 # 低碳钢无缝钢管;测温管共 7 根(编号为 C),选用 $\Phi 32$ mm、 $\delta 3$ mm 钢管,管内等间距布置 3 个测温点,用以监测冻结过程的土体温度,采样时间间隔为 24 h。其中,测温管 C1、C2、C3、C5、C6、C7 位于④₂ 淤泥质粉质黏土层,C4 位于⑥₁ 淤泥质黏土夹粉土层;C1、C2、C3、C4 位于隧道左线,C5、C6、C7 位于隧道右线。冻结管参数见表 2,冻结管及测温管布置如图 2 所示。

土体冻结的冷量来自冻结管,在其他条件相同的情况下,测点与冻结管的距离对温度也有一定的影响。为控制距离变量,将测温管按与冻结管距离的远近进行分组,距冻结管 1 m 有 C2、C3、C6、C7 等测点,距冻结管约 0.5 m 有 C1、C4、C5 等测点。

表 2 冻结管参数汇总表

Table 2 Summary of freezing pipe parameters

孔号	规格/mm	长度/m	定角度/(°)	倾角/(°)	数量/根	总长度/m
D1	$\Phi 89, \delta 8$	4.80	70	30.00	5	24.00
D2	$\Phi 89, \delta 8$	6.00	57	17.00	6	36.00
D2'	$\Phi 89, \delta 8$	5.40	47	11.50	2	10.80
D3	$\Phi 89, \delta 8$	6.00	38	6.00	2	12.00
D4	$\Phi 89, \delta 8$	7.40	30	2.00	2	14.80
D5	$\Phi 89, \delta 8$	6.70	14	1.00	2	13.40
D6	$\Phi 89, \delta 8$	6.90	0	0.00	2	13.80
D7	$\Phi 89, \delta 8$	7.20	-8	-5.00	2	14.40
D8	$\Phi 89, \delta 8$	7.40	-16	-9.00	2	14.80
D9	$\Phi 89, \delta 8$	10.10	-24	-13.00	2	20.20
D10	$\Phi 89, \delta 8$	9.00	-32	-17.50	2	18.00
D11	$\Phi 89, \delta 8$	8.70	-40	-22.50	2	17.40
D12	$\Phi 89, \delta 8$	8.50	-48	-27.00	2	17.00
D13	$\Phi 89, \delta 8$	8.50	-56	-32.00	2	17.00
D14	$\Phi 89, \delta 8$	8.50	-63	-38.00	2	17.00
D15	$\Phi 89, \delta 8$	8.00	-72	-44.00	7	56.00
D16	$\Phi 89, \delta 8$	6.60	-84	-50.00	6	39.60
D17	$\Phi 89, \delta 8$	4.80	70	30.00	5	24.00
D18	$\Phi 89, \delta 8$	4.90	57	16.00	6	29.40
D18'	$\Phi 89, \delta 8$	4.30	47	10.00	2	8.60
D19	$\Phi 89, \delta 8$	7.90	-56	-10.00	3	23.70
D20	$\Phi 89, \delta 8$	7.50	-72	-44.00	6	45.00
D21	$\Phi 89, \delta 8$	6.60	-84	-50.00	5	33.00
合计					77	519.90

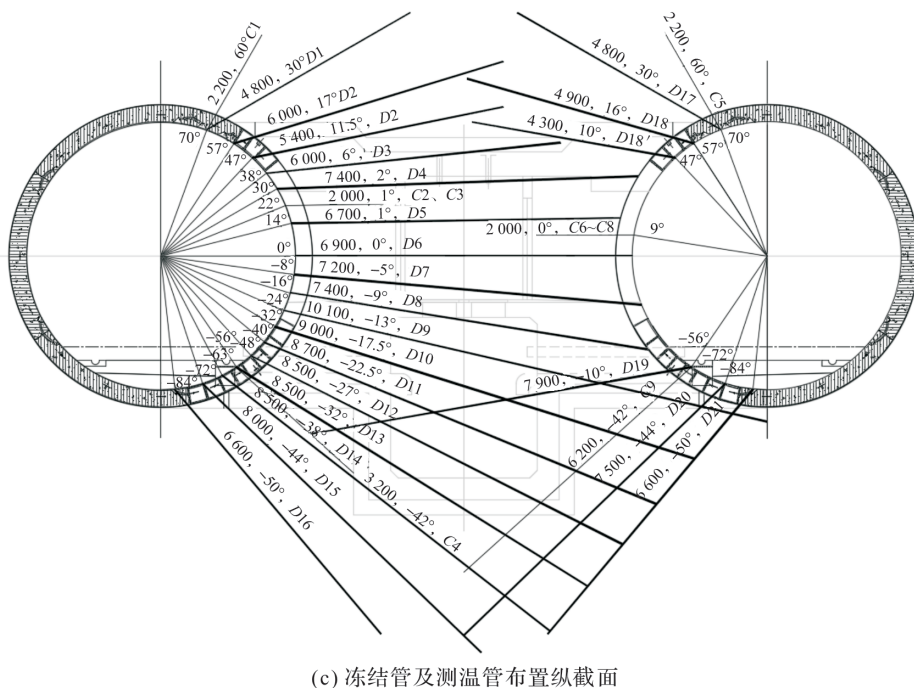
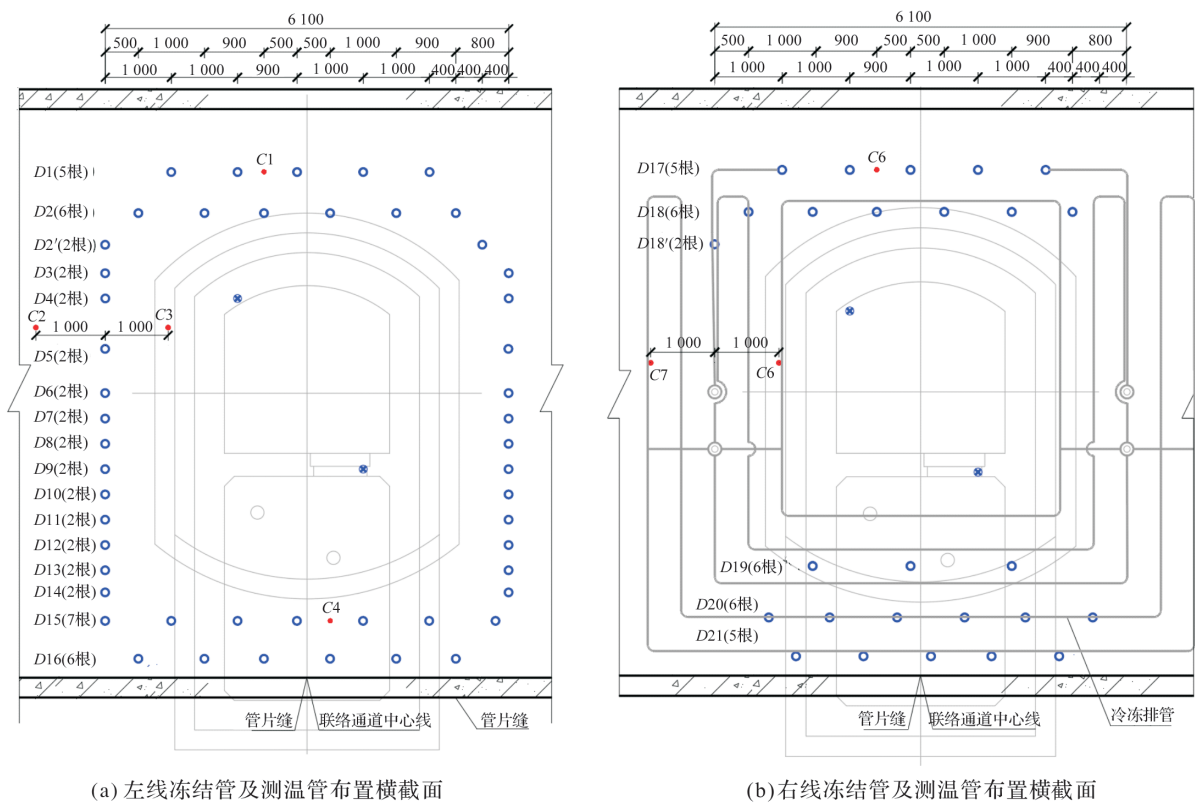


图 2 冻结管及测温管布置(单位:mm)

Fig. 2 Layout of freezing pipe and temperature measuring pipe (unit: mm)

2 结果分析

2.1 盐水温度实测分析

本试验制冷系统于 2019 年 6 月 21 日完成安装调试并开机冻结,至 2019 年 7 月 24 日,累计冻结 35 d。盐水去回路温度及温差随时间的变化如图 3 所示。由图 3(a)可知,去回路温度曲线分为 4 个阶段:1)快速降温阶段。经过 8 d 的冻结,温度降至 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,平均降温速率为 $5.13\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。2)缓慢降温阶段。用

时7 d,平均降温速率为 $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。在冻结第15 d,去路温度为 $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 仍未达设计要求,因此加大制冷机功率以进一步降温。3)温度稳定阶段。这一阶段盐水去路温度稳定在 $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,达到设计要求,平均降温速率为 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。由图3(b)可知,在冻结期间,去回路温差总体呈下降趋势,从 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 逐渐降至 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明冻土帷幕形成良好,温度场趋于稳定。

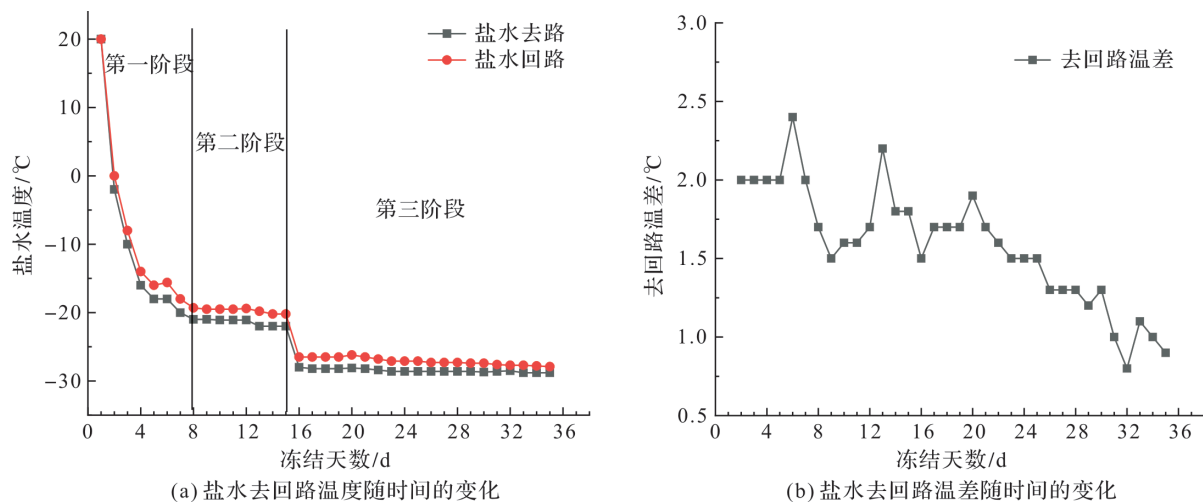


图3 盐水去回路温度及温差随时间的变化

Fig. 3 Variation of temperature and temperature difference of salt water to the loop with time

2.2 土体温度实测分析

2.2.1 测点温度随时间的变化规律

冻土帷幕设计厚度为2 m,因此冻结管1 m处的土体冻结状态决定了冻土帷幕是否达到设计厚度。由于冻结壁内外两侧的扩展速率不同,因此将测温管C2、C3、C6、C7分为2组,第1组为C3、C6位于冻结壁内侧,第2组为C2、C7位于冻结壁外侧,各组测点温度随时间的变化见图4。由图4可知,地层初始温度约为 $22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,各测点的曲线变化规律基本上相似;以测点C3-1及C2-1为例,可将曲线大致分为快速降温、缓慢降温、自由水相变、稳定降温4个阶段。

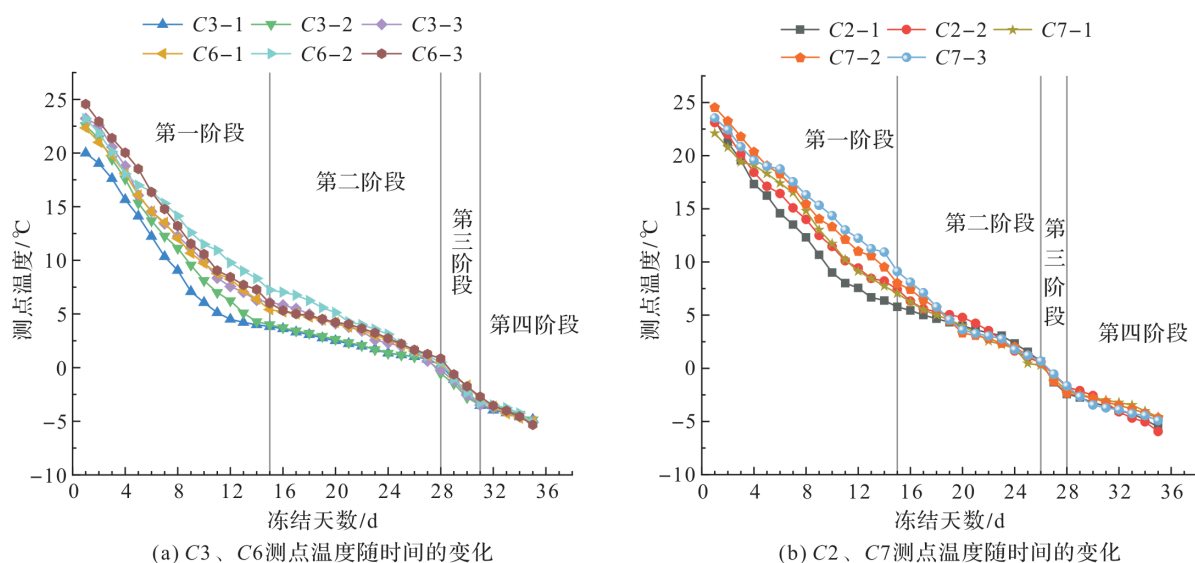


图4 测点温度随时间的变化

Fig. 4 Temperature variation of measuring point with time

1)快速降温阶段:此阶段共持续15 d,测点温度随时间的推移逐渐降低,第1组和第2组的平均降温速率均为 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。由图3可知,盐水温度在这一阶段持续下降,测点温度是盐水温度和时间的双变量函数,降温速率较快。

2)缓慢降温阶段:此阶段测点温度随时间的推移逐渐降低,第1组的平均降温速率为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$,第2

组为 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$, 相比快速降温阶段有所减慢。这主要是由于盐水温度维持在 $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 不变, 测点温度变成仅与时间相关的单变量函数。

3) 自由水相变阶段: 此阶段测点起始温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 测点温度随时间的推移逐渐降低, 第 1 组和第 2 组的平均降温速率均为 $1.25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$, 相比缓慢降温阶段明显升高。由于盐水温度保持不变, 因此, 降温速率升高是由土体本身的热物理性质变化导致的。

4) 稳定降温阶段: 此阶段测点温度随时间的推移逐渐降低, 第 1 组和第 2 组在这一阶段的平均降温速率均为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$, 明显低于自由水相变阶段。这主要是由于土中热负荷降低, 冻土帷幕逐渐达平衡态(热动态平衡^[14]), 温度场趋于稳定, 因此测点温度变化曲线开始收敛, 降温速率变慢。

从整体上看, 由于各测点初始温度不同及冻结管纵向冷量损失的原因, 在快速降温和缓慢降温阶段, 测点间的温度差距较大, 随着土中热负荷降低, 差距逐渐缩小。每组曲线呈现较强的一致性并向同一状态收敛, 冻结 35 d 后, 测点温度达 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 此时温度没有达到稳定状态, 曲线仍呈下降趋势, 说明冻结壁仍在缓慢发展。

2.2.2 自由水相态分析

自由水相态与土体温度有关, 温度受比热 C 影响, 比热公式如下:

$$C = \frac{Q}{m(t - t_0)} \quad (1)$$

式(1)中: Q 为热量; m 为质量; t 为变化后的温度; t_0 为初始温度。

由式(1)可知, 物体质量(m)和单位时间输入的热量(Q)保持不变时, 比热降低会导致单位时间内温度变化量($t - t_0$)增大, 即温度变化率上升。由于比热为广延量, 土体冻结前后的比热变化即为水到冰的比热变化。水的比热为 $4\,200\text{ J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$, 冰的比热为 $2\,100\text{ J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$, 所以理论上, 土体冻结后比热降低(文献[15]的试验结果表明淤泥质土冻结后比热的确降低了)。

在缓慢降温和自由水相变阶段土体质量和盐水温度均未发生变化(即 m 与 Q 保持不变), 因此测点降温速率上升的这一现象是由土中自由水比热降低引起的, 而自由水的比热变化仅在自由水相变时发生, 说明在测点温度达 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时, 自由水发生相变, 冻结成冰。

在土体温度达到冻结温度时, 土中自由水发生相变, 冻结成冰。对于淤泥质土的冻结温度, 文献[15]的试验结果表明, 含水率 38.6%、密度 $1.94\text{ g}/\text{cm}^3$ 的淤泥质粉质黏土原状土的冻结温度为 $-0.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由表 1 可知, 其土质类型、含水率及密度都与本工程加固区土体性状相似, 因此本工程土体冻结温度应为 $-0.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。由于测温点并非直接埋置于土中, 而是通过测温管与土体间接接触, 于是存在冷量损失, 因此自由水相变时测点温度约为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 略高于土体冻结温度 $-0.36\text{ }^{\circ}\text{C}$, 属于正常现象。

综上所述, 土中自由水在快速降温及缓慢降温阶段为液态; 在自由水相变及稳定降温阶段为固态, 由于黏土冻结主要以自由水冻结为主^[16], 故可认为此时土体已经冻结。

3 结 论

本研究结合实际工程进行了现场冻结试验, 通过分析冻结过程的盐水去回路温度及测点温度, 探讨了测点温度的变化规律、土体冻结状态及冻土帷幕厚度, 得到如下结论:

1) 冻结期间, 盐水去回路温差逐渐从 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冻土帷幕形成良好, 温度场趋于稳定;

2) 杭州市淤泥质黏土地层在冻结作用下, 距冻结管 1 m 处的测点温度变化曲线可大致分为快速降温、缓慢降温、自由水相变、稳定降温 4 个阶段, 受盐水温度及土中自由水相态的影响, 在各个阶段冻结壁内外两侧的测点平均降温速率不同;

3) 土中自由水在快速降温和缓慢降温阶段为液态, 在自由水相变和稳定降温阶段为固态;

4) 在累计冻结 35 d 后, 冻结管 1 m 处的测点均已达到稳定降温阶段, 土体冻结, 冻土帷幕达到设计厚度 2 m , 满足设计要求;

5) 试验结果验证了冻结法在杭州淤泥质黏土地层加固中的可行性, 可为冻土帷幕性状分析及类似工程应用提供参考。

参考文献:

- [1] 齐吉琳,党博翔,徐国方,等.冻土强度研究的现状分析[J].北京建筑大学学报,2016,32(3):89.
- [2] 黄建,贾德华.北京地铁联络通道三维冻结温度场数值模拟[J].铁道建筑,2021,61(1):73.
- [3] 陈军浩,庄言,陈笔尖,等.滨海软土冻结温度场发展规律[J].煤田地质与勘探,2020,48(4):174.
- [4] WANG S F, YANG Z H, YANG P. Structural change and volumetric shrinkage of clay due to freeze-thaw by 3D X-ray computed tomography[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017(138):108.
- [5] 李亚利.郑州地铁3号线联络通道冻结法施工温度控制的理论研究[D].北京:北京交通大学,2020.
- [6] 向亮,王飞,靳宝成,等.红砂岩地层联络通道冻结法施工温度场分布研究[J].土木工程学报,2020,53(增刊1):306.
- [7] 邵新军,李铭远,张景伟,等.富水粉质黏土中地铁联络通道冻结法试验研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(6):10.
- [8] 程知言.浅表隧道工程多冷源冻结温度、应力、水分场耦合研究[D].长沙:中南大学,2003.
- [9] 张婷.人工冻土冻胀、融沉特性试验研究[D].南京:南京林业大学,2004.
- [10] 邢述彦.土壤冻结温度测定试验研究[J].太原理工大学学报,2004(4):385-386.
- [11] 马俊,胡导云,杨平.平面斜交联络通道水平冻结及实测分析[J].隧道建设,2019,39(12):1965-1966.
- [12] 尚晓林.人工冻结法施工地铁联络通道冻结设计及实测研究[D].西安:西安科技大学,2019.
- [13] 应赛,周凤玺,文桃,等.硫酸盐渍土降温过程中的盐胀与冻胀特性[J].长江科学院院报,2021,38(6):116.
- [14] 华自强,张忠进,高青,等.工程热力学[M].4版.北京:高等教育出版社,2009.
- [15] 贺俊.苏州地铁典型土层冻土物理力学特性研究[D].南京:南京林业大学,2010.
- [16] 王大雁,马巍,王永涛,等.高压作用下深部黏土冷却过程及其特征研究[J].岩土工程学报,2016,38(10):1889.

~~~~~  
(上接第481页)

## 参考文献:

- [1] 梁万礼,邹恩坤.冷冻面团法生产面包的关键工艺讨论[J].粮食与食品工业,2015,22(2):22.
- [2] 徐斌.论酵母的科学管理与使用[J].啤酒科技,2005(11):3.
- [3] 窦冰然,郭会明,骆海燕,等.耐高糖面包酵母发酵工艺优化[J].食品工业科技,2016,37(18):208.
- [4] 王碧莹,孙溪,肖冬光.内源与(或)外源海藻糖对面包酵母耐冷冻性的影响研究[J].酿酒科技,2015(12):4.
- [5] KONDO K, INOUE M. TIP 1, a cold shock-inducible gene of *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Journal of Biological Chemistry, 1991, 266(26):17537.
- [6] 张俊凯.添加剂对面包品质产生的影响分析[J].现代食品,2017(14):84.
- [7] HIRASAWA R, YOKOIGAWA K, ISOBE Y, et al. Improving the freeze tolerance of bakers' yeast by loading with trehalose[J]. Bioence Biotechnology & Biochemistry, 2001, 65(3):522.
- [8] 王颖,李勇.适量添加海藻糖有效改善面包品质[J].中国食品,2020(22):134.
- [9] 白雪,张美莉.影响冷冻面团的因素及其品质改良研究进展[J].食品工业科技,2020,41(5):348.
- [10] 陈丽君,肖冬光,郭学武,等.面包酵母海藻糖含量与酵母耐性之间的关系[J].食品工业科技,2011,32(8):112.
- [11] PLOURDE-OWOBI L, DURNER S, GOMA G, et al. Trehalose reserve in *Saccharomyces cerevisiae*: phenomenon of transport, accumulation and role in cell viability[J]. International Journal of Food Microbiology, 2000, 55(1/2/3):33.
- [12] 宋振玉,李楠,张姝,等.低糖适应性耐冻酵母与普通酵母菌细胞构成成分的比较[J].中国酿造,2009(6):57.
- [13] 余利新,刘亚伟,吴迪.聚葡萄糖对焙烤食品食用品质的影响[J].粮食与饲料工业,2013(1):23.
- [14] 韩芸娇,张媛媛,张彬,等.空气等离子体技术对面包酵母的诱变选育研究[J].食品工业科技,2019,40(24):94.
- [15] 江正强,王怡斯,李里特.低糖面团用耐冷冻酵母的筛选及其性质[J].中国粮油学报,2009,24(6):15.
- [16] 郭薇丹,刘薇丛,胡作民,等.抗鱼肉脂肪氧化的耐冷冻酵母筛选及鉴定[J].食品科学,2019,40(10):166.
- [17] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局.食品安全国家标准 食品加工用酵母:GB 31639-2016[S].北京:中国标准出版社,2016.