

越江联络通道原位冻结试验温度场规律分析

蔡益平^{1,2}, 陈军浩^{1,2}, 李栋伟³, 丁国胜⁴, 姚志雄^{1,2}

- (1. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118; 2. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118;
3. 东华理工大学 土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330013; 4. 福州地铁集团有限公司, 福建 福州 350009)

摘要: 针对越江联络通道温度场发展规律的不确定性, 提出在联络通道开挖反方向位置, 利用现场冻结盐水系统, 开展原位冻结试验, 以探究越江联络通道冻结温度场的发展规律。分别进行单孔、双孔、三孔原位冻结试验, 并对试验结果对比分析。结果表明, 在相同条件下三孔冻结模式冻结壁平均温度最低降到 $-11.74\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冻结壁的极限厚度达到 2.8 m 。通过分析得到各冻结模式下冻结壁的极限厚度和冻结平均温度, 确定在地下水渗流影响下三孔冻结能满足施工要求。结合冻结温度场控制微分方程, 建立平面数值模型, 进一步研究冻结温度场的扩展规律, 与现场实测数据对比验证结果基本吻合。

关键词: 原位冻结试验; 实测分析; 温度场; 数值分析

中图分类号: TU44

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2019)03-0224-06

Analysis of the temperature field of in situ freezing test of the cross-river contact channel

CAI Yiping^{1,2}, CHEN Junhao^{1,2}, LI Dongwei³, DING Guosheng⁴, YAO Zhixiong^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Underground Engineering of Colleges and Universities of Fujian Province, Fuzhou 350118, China;
2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
3. School of Civil and Architectural Engineering, Donghua University of Technology, Nanchang 330013, China;
4. Fuzhou Metro Group Co., Ltd, Fuzhou 350009, China)

Abstract: In view of the uncertainty of the development law of the temperature field of the cross-river contact channel, it was put forward that the in situ freezing test could be carried out by using the field frozen brine system, in the opposite direction of the excavation of the contact channel, so as to explore the development law of the freezing temperature field of the cross-river connection channel. Single-hole, double-hole and three-hole in situ freezing tests were carried out, and the test results were compared and analyzed. Results show that under the same conditions, the average temperature of the frozen wall in the three-hole freezing mode was reduced to $-11.74\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the limit thickness of the freezing wall reached 2.8 m . The limit thickness and average freezing temperature of the frozen wall under each freezing mode were obtained by analysis. It was concluded that the three-hole freezing can meet the construction requirements under the influence of groundwater seepage. Combined with the governing differential equation of the freezing temperature field, a two-dimensional numerical model was established, and the expansion law of the freezing temperature field was further studied, which was in good agreement with the field measured data.

Keywords: in-situ freeze test; measured data analysis; temperature field; numerical analysis

收稿日期: 2019-05-16

基金项目: 福建省高校杰出青年科研人才培育计划项目(GY-Z17070); 福建省高校产学研合作项目(2017Y4001); 福建工程学院科技发展基金(GY-Z17158)

第一作者简介: 蔡益平(1993-), 男, 福建仙游人, 硕士研究生, 研究方向: 地下工程。

通信作者: 陈军浩(1986-), 男, 福建福州人, 副教授, 博士, 研究方向: 地下工程。

冻结法因其具有止水性、较高冻土强度和对复杂地层适应性等特点,已成为地铁联络通道的主要施工方法^[1-3]。

国内外学者对冻结温度场做了大量的研究和模型试验,获得了有关冻结温度场的发展规律。孙雪兵^[4]研究了江底沙土采用冻结法加固的安全可靠性并提出减小集水池体量的方案;丁航等^[5]通过数值模拟比较静水、动水条件下冻结壁发育差异,对降低地下水流速对冻结壁发育的危害提供手段;E. Pimentel 等^[6]基于水热耦合方程,通过有限元软件模拟渗流条件下冻结壁变化规律;陈雪莹^[7]等对联络通道的加固进行了比选分析,最终得到在注浆加固的基础上再进行冻结加固的安全可靠性;M. Vitel 等^[8-9]通过渗流条件下三维冻结实验,为与多孔介质相变相关的水热耦合研究提供了关键参数依据;许黎明等^[10]研究了海底联络通道健康监测技术,提出安全可行的监测指标与方法,保证冻结施工的有序进行。

以上都是针对低流速、低渗透地层中单排、两排冻结壁发展规律,而对高渗透地层中冻结壁形成规律的试验,尤其是原位冻结试验研究,国内外鲜有报道。本文结合实际工程,利用现场盐水冻结系统开展 1:1 比例原位冻结试验,依据单孔、双孔、三孔冻结原位试验,对高渗透地层中冻结壁形成的极限厚度、向外扩展速率及冻结平均温度进行了试验分析得到丰富数据,以求对高渗透地层的冻结壁发展规律进一步了解。

1 工程概况

福州市轨道交通 2 号线某区间,联络通道的覆土深度约 17.3 m,位于江底下方,江底以砂土为主,局部零星分布淤泥,联络通道中心与江底最大垂直距离约 20.5 m,与江水近年最高潮位垂直距离约 31.4 m,围岩等级为 VI 级。联络通道所处地层主要为粗中砂、卵石,渗透系数分别达到 45、55 m/d,均为强透水地层。通过实际测试地下水流速最大值达到 2.46 m/d。联络通道开挖断面大小约为 4 400 mm(宽)×5 100 mm(高);联络通道开挖长度约为 7.6 m。

2 原位冻结试验方案

2.1 原位冻结试验设计

为更好地了解高渗透地层联络通道的温度场

发展规律、掌握单排冻结模式和双排冻结模式的冻结影响,利用现场盐水冻结系统在联络通道开挖反方向钢管片位置,开展 1:1 比例高渗透地层单孔、双孔、三孔原位冻结试验。其中,双孔冻结是为了模拟单排冻结模式,三孔冻结可以模拟冻结现场拱顶双排孔冻结模式。为了保证冻结施工方便,冻结孔与测温孔均按水平角度布置,其中开设冻结孔 6 个(编号 D1~D6),间距 800 mm。其中设计的最低盐水温度为 -28~-30℃,单孔盐水流量 5~8 m³/h,冻结管规格 $\phi 89\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 。原位试验冻结设计位置及 1-1 剖面图如图 1、2 所示。

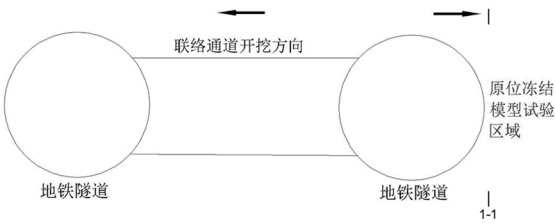


图 1 原位冻结试验设计位置图

Fig.1 Design position diagram of in situ freezing test

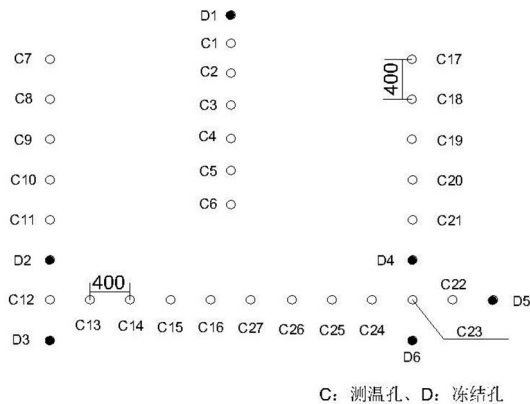


图 2 1-1 剖面图(单位:mm)

Fig.2 1-1 section (unit: mm)

2.2 试验过程监测方案

为把握积极冻结期原位冻结试验的冻结效果,需实时监测整个试验过程。在冻结管与土体进行热交换期间,通过热传感器对地层温度进行实时监测。在测温孔内纵向 0.5、1.5、2.5 m 处分别设置一个热传感器来测定不同深度土层的实时温度变化情况,其中 C1, C2, ..., C27 为测温孔编号,共 81 个测点,测温孔间距为 400 mm。由于测试数据较多,本实验采用智能监测技术,设定每隔 4 h 自动采集数据一次,在冻结帷幕形成过程中

实时监测不同位置冻土的温度变化。

3 现场测试结果分析

3.1 原位试验温度实测结果

为将监测数据受外界因素影响降到最低,选取测温孔内纵向三个测点位置的中间测点即 1.5 m 处的温度数据进行分析。绘制不同冻结模式下 C1~C6、C11~C16、C22~C27 测温孔 1.5 m 测深位置土体温度变化曲线,以便更好反映测温孔土体温度随时间的变化情况。图 3 为不同冻结模式测温孔降温曲线,其中 θ 表示温度, t 表示时间。

单孔冻结在距离冻结管 400 mm 处的 C1 测温孔冻结 10 d 温度下降速率达到 1.5 °C/d,且冻结 28 d, C1 测温孔的土体温度降到 0 °C 以下,此后曲线变缓,温度下降速率仅为 0.11 °C/d,这是由于测温点处土体的液态水发生相变,进行剧烈的热交换。C2~C6 测温孔在冻结 10 d 温度下降速率均在 1 °C/d 以下,且土体温度在冻结过程中均处于正温状态,这表明 C2~C6 测温孔的位置超出了冻结所能影响的极限半径。双孔冻结模式下冻结初期, C12 测温孔附近冻结土温度呈直线下降,冻结 10 d 温度下降速率达到 2.74 °C/d,而 C11 测温孔温度下降速率为 1.87 °C/d,这是由于 C12 受双冷源的影响,温度下降得更低也更快。在冻结过程中随着土体温度逐渐降低,土体内未冻结水含量越来越少,在冻结 10 d 后土体温度下降梯度变小,随着冻结区域自由水的减少,在冻结 30 天后温度曲线趋于平缓。三孔冻结模式下, C23 测温孔附近土体温度下降速率达到了 2.81 °C/d, C22 测温孔周围土温度下降速率为 2.74 °C/d 次之,表明距离多个冷源越近,温度下降的越快。随着土体温度不断降低,在冻结 20 d 左右温度曲线趋于平稳状态。从图 3(c) 中可以看出有 4 个测温孔的温度都达到了 0 °C 以下,说明冻结的极限半径相对双孔冻结在增大。

3.2 温度场计算方法

冻结温度场是包含相变、移动边界的复杂问题,分析时假设研究的土体是均匀连续且各向同性的粘弹塑性材料;研究的土体为多孔介质材料,忽略土体气相迁移;土体内部仅有冻结管提供热源,水、土之间的热动态平衡是瞬时发生的,水分迁移满足达西定律,无溶质迁移;忽略未冻水含量的影响^[11]。

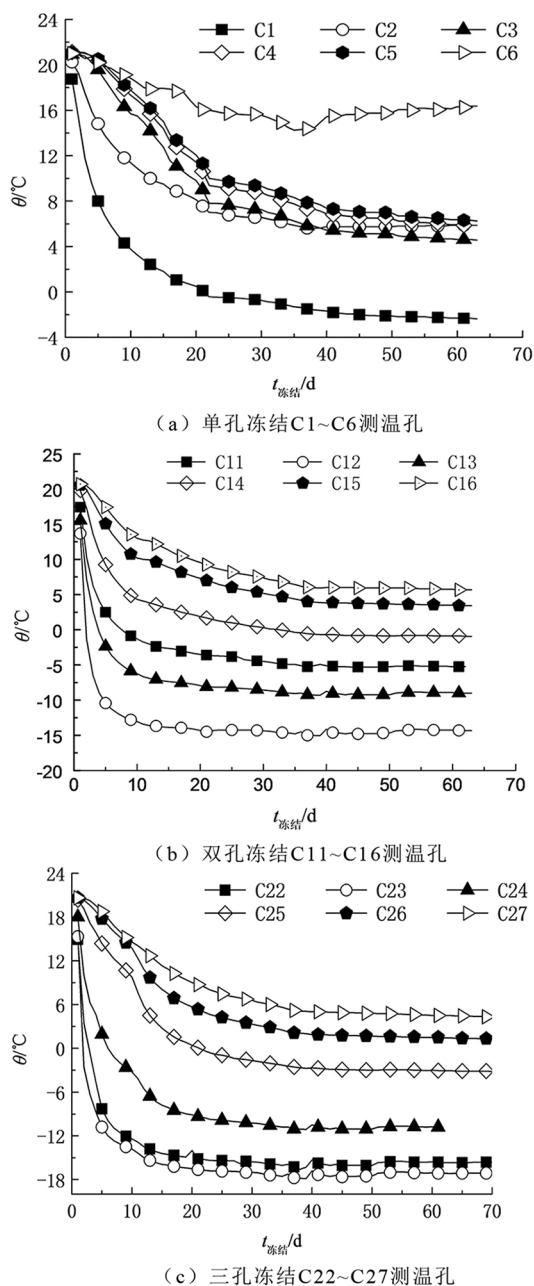


图 3 不同冻结模式测温孔降温曲线

Fig.3 Cooling curves of temperature measuring holes in different freezing modes

冻结壁厚度的计算在现阶段的地铁工程中还没有较多的研究,国内大多数工程的冻结壁厚度计算都是运用解析公式或冻结壁交圈时间来进行计算,通过计算得到冻结圆柱半径来获得冻结壁厚度。

1) 原位冻结试验中单孔冻结是通过实测获得的相关参数,运用解析公式^[12]计算得到冻结圆柱半径。

2) 双孔冻结是根据线性内插法, 可以获得双孔冻结的冻结壁外侧位置

$$x = \frac{T_0 - T_a}{T_b - T_a}(x_b - x_a) + x_a \quad (1)$$

式中: x 冻结壁外边界 (m), T_0 土体冻结温度 (°C), T_a 、 T_b 近距离、远距离冷源测点温度 (°C), x_a 、 x_b 近距离、远距离冷源测点距离 (m)。

3) 三孔冻结即双排孔冻结的冻结壁是由冻结管形成的冻土圆柱的组合物, 有效冻结壁即为完整的、连续的冻结壁范围。运用沈阳^[13]的总结归纳计算冻结壁厚度。

运用等效梯形的计算理念在冻结壁区域对各个区域温度 Δs 进行面积计算, 进而计算出冻结壁平均温度 \bar{T} 。

3.3 冻结壁厚度计算分析

由冻结壁厚度计算结果, 可以绘制不同冻结模式下, 冻结壁厚度 $\delta_{\text{冻结}}$ 随时间变化曲线如图 4 所示。

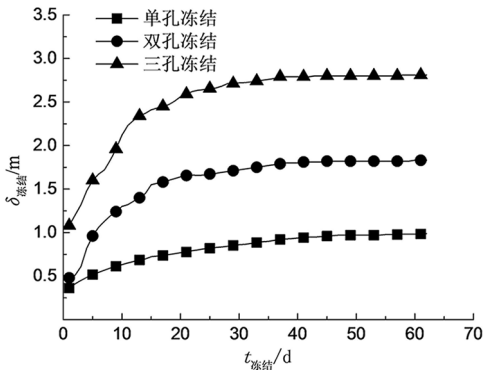


图 4 不同冻结模式冻结壁厚度随时间变化曲线

Fig.4 Variation curve of frozen wall thickness with time in different freezing modes

通过计算分析获得, 在单孔冻结作用下, 冻结初期冻结管外侧冻结壁体量相对较小, 冻结壁厚度扩展速度也相对较快, 冻结 15 d 时, 冻结壁厚度达到 0.68 m。但随着冻结持续, 冻结壁厚度增长较为缓慢, 在冻结 30d 冻结壁厚度发展至 0.85 m, 该阶段冻结壁单侧向外扩展速率在 5.6 mm/d 以内, 并随冻结时间推移, 冻结壁向外扩展速率逐渐减小。在冻结 40、50、60 d 冻结壁厚度分别达到 0.94、0.96、0.93 m, 可见冻结壁极限厚度在 0.96 m 左右。双孔冻结在冻结孔间距 800 mm 布置情况下, 冻结初期冻结壁向外扩展速率快速增大, 后

期冻结壁单侧向外扩展速率逐渐减小, 冻结 15 d 时, 冻结壁厚度就已达到 1.55 m, 随着冻结时间的持续, 冻结 30 d 冻结壁厚度达到 1.73 m, 期间冻结壁单侧向外扩展速率在 5.9 mm/d, 在冻结 40、50、60 d 时, 冻结壁厚度分别达到 1.80、1.83、1.82 m, 可见冻结壁极限厚度在 1.83 m 左右。三孔冻结模式下冻结壁在短时间内即可形成, 冻结 15 d 冻结壁达到了 2.41 m, 至冻结 30 d 冻结壁厚度发展至 2.71 m, 冻结壁单侧向外扩展速率在 10 mm/d 左右。冻结 40、50、60 d 冻结壁厚度分别达到 2.78、2.80、2.79 m 可见三孔冻结的冻结壁的极限厚度在 2.80 m 左右。

3.4 冻结平均温度计算分析

由冻结平均温度计算结果, 可以绘得不同冻结模式下, 冻结平均温度 θ_{avg} 随时间变化曲线如图 5 所示。

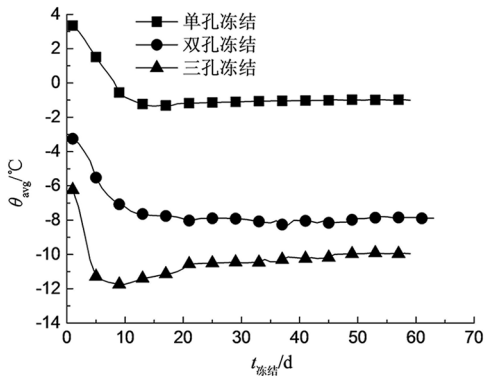


图 5 冻结平均温度随时间变化曲线
Fig.5 Variation curve of average freezing temperature with time

单孔冻结经计算, 冻结平均温度最低只有 -1.37 °C 不作对比。双孔冻结, 冻结 10 d 冻结平均温度下降速率达到 0.4 °C/d, 随后曲线变化较平稳, 冻结平均温度稳定在 -8 °C 左右。三孔冻结模式下平均温度最低, 冻结 10 d 左右, 冻结壁平均温度即可降至 -11 °C 左右, 冻结平均温度下降速率达到 0.5 °C/d, 后期随着冻结壁厚度增大, 冻结壁平均温度有略微回升, 但稳定在 -10 °C 以下。

从以上分析对比单孔冻结、双孔冻结、三孔冻结, 在冻结孔间距、排距都为 800 mm 布置情况下, 冻结壁极限厚度达到 2.8 m, 冻结平均温度稳定在 -10 °C, 三孔冻结效果较双孔冻结提升明显。

4 冻结温度场数值模拟

在江底沙土地区,经过冻结后的沙土对温度十分敏感且性质不稳定,应充分考虑其温度大小及冻结时间的影响,正确选用有关设计参数。通过 ANSYS 有限元软件对软土地层单孔、双孔、三孔温度场进行数值模拟,并通过现场实测和数值模拟的对比,进一步探讨冻土温度场变化规律。

4.1 冻结温度场数学方程

根据多孔介质传热理论和热量守恒定律^[14],若不考虑土体的内热源,轴对称条件下冻结温度场控制微分方程^[15]为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \tag{2}$$

正冻土中水分迁移满足水流的连续条件和达西定律,即

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = \alpha \frac{\partial H}{\partial t} \tag{3}$$

$v_x = -k_x \frac{\partial T}{\partial x}$ $v_y = -k_y \frac{\partial T}{\partial y}$ $v_z = -k_z \frac{\partial T}{\partial z}$
式中: T 为土体温度(℃), t 为时间(s), k 为介质导热系数[kJ/(m·s·℃)], r 为平面内任意一点距离冻结管圆心距离(m), v_x, v_y, v_z 分别表示 x, y, z 三个方向的水流速度(m/h), k_x, k_y, k_z 分别表示 x, y, z 方向的导水系数单[m²/(h·℃)], H 为水头高度或压力水头高度(m), α 为水分扩散系数。

若 3 个方向的渗流速度相同,则水分迁移方程用极坐标表示为

$$\alpha \frac{\partial H}{\partial t} = -k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \tag{4}$$

式(2)(3)为温度场和水分迁移耦合数学模型。

4.2 冻结温度场数值分析

由水文地质资料可知地层温度在 26℃ 左右,开挖土层最大渗流系数达到 55 m/d。由于地下水渗流对冻结效果的影响,采用 ANSYS 有限元软件,建立热流耦合有限元模型,以三孔冻结为例截取一平面作为计算模型,冻结外边界取 4 倍冻结壁有效厚度,计算模型取边长为 12 m 的正方形,冻结管采用直径 89 mm 的圆管,计算采用 plane55 单元。运用三角网格进行平面划分,并对冻结管周围进行加密处理,其中土的冻结温度取 -0.67℃,计算天数时间为 70 d。

数值计算模型假设:土体材质均匀且各向同性,不考虑盐水与冻结管壁之间的对流换热,其中冻结管壁上的温度等效盐水温度,计算中对施工中产生的温度不予考虑。各土层的热物理参数取值如表 1 所示。

表 1 各土层的热物理参数
Tab.1 Thermal physical parameters of each soil layer

土层	密度/ (kg·m ⁻³)	导热系数/ W(m·℃) ⁻¹		比热容/ J(kg·℃) ⁻¹		渗透系数/ m·d ⁻¹
		未冻土	冻土	未冻土	冻土	
粗中砂	2 580	1.33	1.86	1 430	2 000	45
卵石	1 750	1.29	1.70	1 220	1 290	55

5 数值模拟结果分析

5.1 冻结施工分析

通过增加渗流边界条件,得到渗流影响下的温度场计算结果。数值模拟分析得出冻结初期,冻结管与周围土体进行剧烈热交换,导致冻结管周围土体降温较快,冻结 30 d,冻结壁厚度达到 2.31 m,期间冻结壁沿径向内、外侧分别扩展了 0.71、0.62 m 左右;冻结 40 d,冻结壁厚度达 2.57 m,冻结壁厚度增长速度变缓,冻结壁沿径向内、外侧分别扩展了约 0.80、0.71 m;冻结中后期,冻结壁厚度基本不发展趋于平稳状态,冻结 50 d,冻结壁厚度达 2.61 m,冻结壁沿径向内、外侧分别扩展了约 0.89、0.71 m。冻结 60 d,冻结壁厚度趋于平稳在 2.60 m 左右,可见数值模拟的冻结壁极限厚度为 2.60 m。结果表明,模拟冻结壁总厚度与实测温度计算得冻结壁总厚度基本一致。

通过数值模拟计算得出冻结第 30、40、50 d 时,有效厚度范围内冻土平均温度分别达到 -10.17℃、-11.26℃、-11.53℃,与实测数值分析基本一致。

5.2 实测温度场与模拟温度场比较分析

选取 3 个主平面上的测温孔数值进行对比分析,其中 C21 位于 D4 上方 400 mm 处,C23 位于 D4 下方 400 mm 处,C25 位于 D5 左边 1 600 mm 处。从图 6 可以看出,数值模拟降温曲线与实测降温曲线基本趋势一致。图中模拟的温度前期下降得较慢,后期 C23 和 C25 的现场实测温度有所

升高, 实测数据较数值模拟数据高 1~2℃, 分析原因这是由于模型计算参数与实际土体的计算参数存在误差和越江隧道地下水的流向和流速不规则等问题, 导致热量的流失。综上所述, 通过现场实测与数值计算相比较, 得到的结论基本一致。

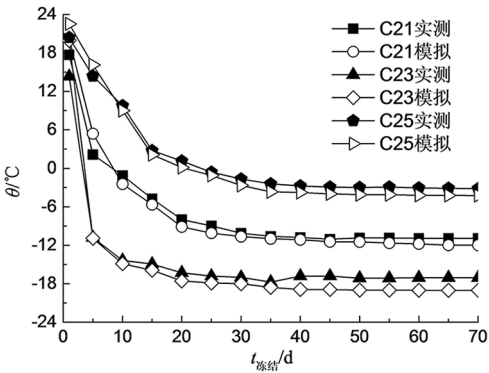


图 6 三孔冻结现场实测与数值模拟对比降温曲线
Fig.6 Comparison and cooling curves of field measured data and numerical simulations of three-hole freezing field

参考文献:

[1] 杨平, 陈瑾, 张尚贵, 等. 软弱地层联络通道冻结法施工温度及位移场全程实测研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2226-2234.

[2] ZHANG C, YANG W H, QI J G, et al. Analytic computation on the forcible thawing temperature field formed by a single heat transfer pipe with unsteady outer surface temperature[J]. Journal of Coal Science and Engineering, 2012, 18(1): 18-24.

[3] HU X D, FANG T. Numerical simulation of temperature field at the active freeze period in tunnel construction using freeze-sealing pipe roof method[C]//Geo-Shanghai 2014, May 26-28, 2014, Shanghai, China. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2014.

[4] 孙雪兵. 国内地铁首条越江区间联络通道结构设计[J]. 铁道工程学报, 2014(2): 72-77.

[5] 丁航, 李方政, 崔灏. 地下水作用下井筒冻结温度场数值分析[J]. 煤炭技术, 2018, 37(3): 195-197.

[6] PIMENTEL E, PAPAKONSTANTINOU S, ANAGNOSTOU G. Numerical interpretation of temperature distributions from three ground freezing applications in urban tunnelling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 28: 57-69.

[7] 陈雪莹, 谭忠盛, 袁杰, 等. 富水圆砾地层盾构隧道联络通道加固技术研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(S1): 105-110.

[8] VITEL M, ROUABHI A, TIJANI M, et al. Modeling heat and mass transfer during ground freezing subjected to high seepage velocities[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 73: 1-15.

[9] VITEL M, ROUABHI A, TIJANI M, et al. Modeling heat transfer between a freeze pipe and the surrounding ground during artificial ground freezing activities[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 63: 99-111.

[10] 许黎明, 陈晓坚, 彭正勇, 等. 海底隧道联络通道冻结法施工健康监测技术研究[J]. 隧道建设, 2018, 38(2): 295-299.

[11] 陈军浩. 多圈管冻结模型试验及人工冻土冻胀规律研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.

[12] 杨扬. 地下水渗流对联络通道冻结温度场的影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.

[13] 沈阳. 多排管人工冻结平均温度及厚度计算方法研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2015.

[14] 蔡海兵, 黄以春, 庞涛. 地铁联络通道三维冻结温度场有限元分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(6): 1436-1443.

[15] 李方政, 丁航, 张绪忠. 渗流作用下富水砂层双排管冻结壁形成规律模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(2): 386-395.

(责任编辑: 方素华)

6 结论

1) 三孔冻结在冻结孔间距、排距都为 800 mm 布置情况下, 冻结 15 d 冻结壁厚度就达到 2.41 m, 随后冻结壁厚度增加较缓, 至冻结 30 d 冻结壁厚度发展至 2.71 m, 期间冻结壁单侧向外扩展速率在 10 mm/d 左右, 此后冻结壁厚度增长不大, 至冻结 50 d 冻结壁厚度仅发展至 2.8 m, 冻结 60 d 冻结壁厚度下降 0.01 m, 可见三孔冻结的冻结壁的极限厚度在 2.8 m 左右。

2) 冻结 10 d 时, 三孔冻结与双孔冻结的冻结壁对应最低平均温度分别为 -8.1℃, -11.6℃, 温差为 3.5℃, 证明三孔冻结即双排管有明显的冻结优势。

3) 综合分析, 在地下水影响下的高渗透地层中采用双排管或多排管冻结效果好, 冻结平均温度更低, 冻结壁形成的速率更快。