

## 超长地铁联络通道水平冻结温度场变化规律分析\*

崔 灏

(北京中煤矿山工程有限公司,100013,北京//高级工程师)

**摘 要** 掌握了超长地铁联络通道冻结温度场的变化规律,就能够预测分析地层冻结温度场,可提前判断冻结壁发展状况。以福州地铁2号线某区间超长联络通道冻结施工为例,建立三维有限元数值计算模型,通过对比分析冻结阶段的数值模拟分析结果与实测数据,验证了计算模型的准确性。基于该数值计算模型,研究了初始地温、导热系数、比热容对该温度场影响的规律。结果表明:冻结温度场变化主要分为温度快速下降与相变阶段、温度下降、土体温度稳定3个阶段;冻结壁交圈时间与初始地温、比热容近似呈线性递增关系,初始地温每升高5℃,交圈时间延长2 d,交圈时间随比热容增加而延长;冻结壁交圈时间与导热系数呈负相关,导热系数每增高10%,交圈时间缩短1 d。

**关键词** 地铁;联络通道;冻结法;温度场

**中图分类号** U231.4

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2019.08.012

## Temperature Field Variation Law of the Horizontal Freezing in Ultra-long Subway Connecting Aisle

CUI Hao

**Abstract** With a mastery of the temperature field variation law of the freezing connecting aisle in an ultra-long subway tunnel, the temperature field of the frozen stratum can be predicted and analyzed, and the development of frozen wall be judged in advance. Taking the freezing construction of the ultra-long connecting aisle on Fuzhou metro Line 1 as the background, a 3D finite element numerical calculation model is established, and the accuracy of the calculation model is verified by comparing the numerical analysis at the freezing stage with the measured data. Based on the numerical calculation model, the influence of initial ground temperature, thermal conductivity and specific heat capacity on the temperature field is studied. The results show that the variation law of freezing temperature field can be divided into three stages: rapid temperature drop and phase transformation stage; temperature drop stage and soil temperature stability stage. The intersection time of freezing

wall increases linearly with the initial ground temperature and specific heat capacity. When the initial ground temperature increases 5℃, the intersection time will be extended to 2 days, and the intersection time will be prolonged with the increase of specific heat capacity. Negative correlation exists between the intersection time of freezing wall and the coefficient of heat conductivity, for every 10% increase in the later, the intersection time will be shortened by 1 day.

**Key words** metro; connecting aisle; freezing method; temperature field

**Author's address** Beijing Coal Mine Construction Co., Ltd., 100013, Beijing, China

联络通道是地铁隧道的重要组成部分,具有安全疏散和排水功能,一般位于各区间隧道的中部,其断面多为矩形、圆形或直墙拱形。联络通道的施工是地铁建设的关键。当联络通道处于软弱、破碎、富含水地层或断层破碎带时,可采用MJS(全方位高压喷射)法、管棚法、人工冻结法对通道周围土体进行预加固后再开挖。其中,冻结法由于具有安全可靠、适用面广、污染性小等优势,已在北京、上海等城市的地铁工程中得到了广泛运用<sup>[1-2]</sup>。文献[3]以北京中细砂层地铁联络通道冻结工程为背景,基于理论分析,得出该地层条件下冻结壁厚度计算公式;文献[4]基于上海双层越江隧道的实测数据,得出管片散热是影响冻结壁形成的重要因素;文献[5]以苏州地铁2号线某软弱地层联络通道冻结工程为背景,基于实测数据,得出冻结壁形成及解冻的基本规律。综上所述,目前常规联络通道冻结设计与施工已较为成熟,但对于复杂地层条件下的超长、超埋深联络通道冻结温度场变化规律还缺乏研究,而冻结温度场的预测分析可提前判断冻结壁发展状况,因此必须掌握超长联络通道冻结温度场的变化规律。

\* 中国煤炭科工集团重点项目(2018-TD-ZD004);中国煤炭科工集团团面上项目(2018-TD-MS010)

本文以福州地铁 2 号线某区间超长联络通道冻结工程为背景,对冻结方案进行分析,并结合数值分析数据和实测数据对冻结温度场的发展与分布规律进行研究,重点分析了初始地温、导热系数、比热容对该温度场的影响规律。研究结果可为今后类似工程设计提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 地质条件

福州地铁 2 号线上洋一鼓山 1<sup>#</sup>联络通道及泵房位于右线里程 YDK35 + 898.179 (左线里程 ZDK35 + 939.022),主要穿越地层分布情况自上而下为:杂填土 <1-2>、淤泥 <2-4-1>、黏土 <3-1>、淤泥质土夹薄层砂 <3-5>、(泥质)中砂 <3-3>、黏土 <3-1>、强风化花岗岩 <7-1>。联络通道主要位于淤泥质土夹薄层砂、(泥质)中砂层中,地下水丰富。联络通道顶部埋深 20 m,左、右线地铁隧道中心线间距 42.68 m,联络通道净长 36.48 m。

### 1.2 工程特点

1) 周边环境复杂。联络通道左线位置上方有多栋建筑物,右线位置为福州西三环辅道边部,通行车辆较多,且右线上方上有一条 DN800 的雨水管线,埋深约 2.5 m;因此在施工过程中对变形控制要求高,若产生较大变形,将会引起房屋倾斜开裂、道路破坏或地下管线破损,造成严重的负面社会影响。

2) 地质条件差。联络通道主要处于淤泥质夹薄砂层、泥质中砂层中,埋深大。淤泥质夹薄砂层属于高压缩性土层,泥质中砂层承压水头较高,水量较大,开挖时易出现坑底突涌。

3) 通道过长,冻结体量大。常规联络通道中心距一般为 11 ~ 13 m,而此联络通道中心距达 42.68 m。采用单侧隧道打孔时,冻结管偏斜较难控制,跟管钻进难。该联络通道冻结体量是常规联络通道的 3 倍,在施工过程中需要严格控制冻胀对地层的扰动。

## 2 联络通道冻结加固方案

### 2.1 冻结加固方案

根据地层资料及联络通道特点,联络通道施工拟采用“隧道内水平冻结加固土体,隧道内暗挖构筑”的全隧道内施工方案。由于联络通道中心距长达 42.68 m,因此采用左、右线两端打孔,共布置 178 个  $\phi 89 \times 8$  mm ( $\phi 108 \times 8$  mm) 无缝钢管作为冻结管,其中,左线 90 个,右线 88 个,如图 1 所示。联络通道正常段冻结壁厚度不小于 2.1 m,喇叭口处冻结壁厚度不小于 1.8 m,积极冻结期 45 d,积极冻结期内盐水温度维持在  $-27 \sim -30$   $^{\circ}\text{C}$ ,采取低温快速冻结的方式,以减小冻胀。冻结壁平均温度不低于  $-10$   $^{\circ}\text{C}$ 。

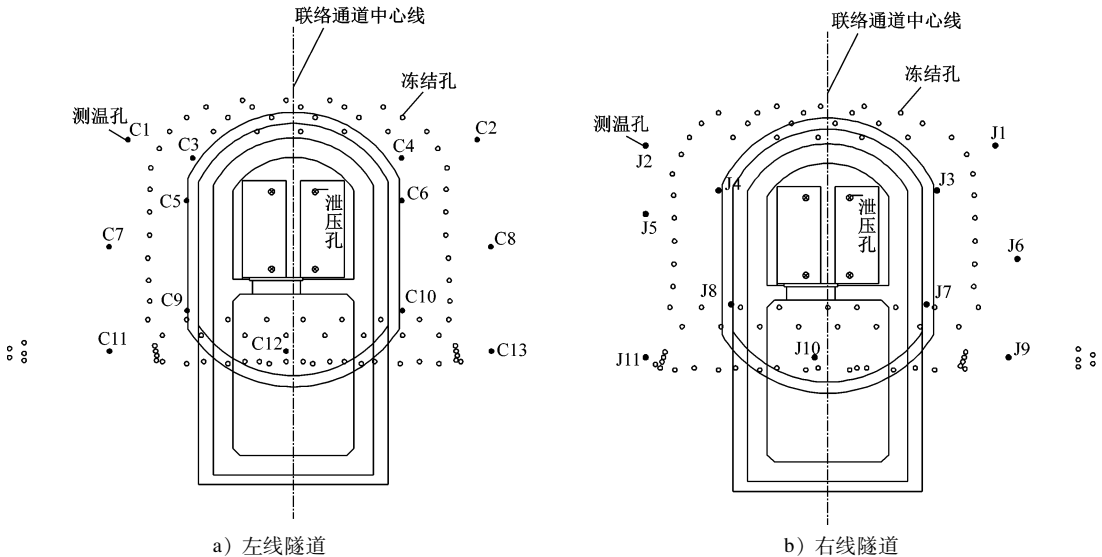


图 1 左、右线隧道冻结孔与测温孔布置图

### 2.2 测温孔布置

为准确掌握冻结温度场的变化情况,共布置 24

个测温孔,如图 1 所示。其中,左线隧道布置 13 个 (C1—C13) 测温孔,右线隧道布置 11 个 (J1—J11)

测温孔。C3、C4 测温孔较短,入土深度为 2 m,采用  $\phi 45 \times 5$  mm 无缝钢管,其余测温孔采用  $\phi 108 \times 8$  mm 无缝钢管;每个测温孔布设 3~4 个测温点,分别位于入土 0.5 m、5.0 m、12.0 m、19.0 m 深度处。

### 3 冻结温度场数值分析

#### 3.1 冻结温度场数学模型

地铁联络通道冻结温度场是含相变、内热源、边界条件复杂且与空间和时间相关的瞬态导热问题,结合多孔介质传热学和冻土学理论可知,三维冻结温度场的控制微分方程可表示为:

$$Q_m = C_{eq} \frac{\partial T}{\partial \tau} - \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{eq} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{eq} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{eq} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + q$$

(1)

式中:

- $C_{ep}$ ——等效体积热容;
- $T$ ——土体温度;
- $\tau$ ——时间;
- $\lambda_{ep}$ ——等效导热系数;
- $q$ ——相变潜热;
- $Q_m$ ——热源汇。

式 1 的初始条件为:

$$T|_{\tau=0} = T_0; \quad T|_{(x_p, y_p, z_p)} = T_y;$$
$$T|_{(x=\infty, \text{ or } y=\infty, \text{ or } z=\infty)} = T_0$$

(2)

式中:

- $T_0$ ——土体的初始温度;
- $x_p、y_p、z_p$ ——冻结管上各点的坐标数值;
- $T_y$ ——盐水温度;
- $x = \infty、y = \infty、z = \infty$ ——距离地铁联络通道冻结区无限远处。

隧道与空气交界面处的对流换热边界条件为:

$$\lambda_{eq} \frac{\partial T}{\partial n_1} = h_f (T_a - T)$$

(3)

式中:

- $T_a$ ——隧道内空气温度;
- $n_1$ ——隧道管片的法线方向矢量;
- $h_f$ ——空气与隧道管片之间的对流换热系数。

#### 3.2 计算模型与边界条件

采用 ANSYS 软件进行有限元分析,单元类型选取具有 20 节点的 SOLID 90 单元,假设工程所处位置计算范围内土体材质均匀且各向同性。考虑到冻结温度场影响区域为冻结管外侧冻结壁厚度

的 3~5 倍,计算模型纵向长度(Z 轴)取值为 40 m、纵向宽度(X 轴)取值为 80 m、高度(Y 轴)取值为 50 m,隧道及冻结管几何模型如图 2 所示,土体参数取值如表 1 所示。为提高计算精度,对冻结管布置周围的土体进行网格加密。温度场计算边界条件为:土体初始温度为 20~25℃,因此假定初始地温为 23℃;模型上部及两侧为绝热边界,底部为 20℃的恒温边界;冻结管壁温度为盐水温度;隧道土体与空气接触面对流换热系数取值为 732.2 KJ/(m<sup>2</sup>·s·℃),空气温度取值为 23℃,在此条件下积极冻结取值为 45 d。



图 2 隧道及冻结管几何模型截图

表 1 土体参数取值表

体积质量/ (kg/m <sup>3</sup> )	导热系数/ (W/(m·K))		比热容/ (kJ/(m <sup>3</sup> ·℃))		潜热/ (10 <sup>5</sup> kJ/m <sup>3</sup> )
	未冻土	冻土	未冻土	冻土	
1 800	1.58	2.02	2.01	1.64	1.53

#### 3.3 结果分析

C8、J11 测温孔 0.5 m 处数值模拟计算结果与实测数据对比如图 4、图 5 所示。由图 4、图 5 可见,数值模拟计算结果与实测数据的降温规律基本一致,都表现为先快后慢;两者的变化速率也基本相同。土体温度变化速率大致可分为 3 个阶段:第一阶段,土体温度从初始地温降至 0℃,各测点的温度初期下降速度较快。以 C8 测温点实测数据为例,冻结 7 d 时,土体温度由初始地温 23℃下降到 5℃,每天下降约 2.6℃,这是由于冻结管与周围土体温差大,热交换明显;在这阶段后期土体温度下降速率短暂暂缓,这是由于受土体相变过程潜热影响所致。第二阶段,水冰相变阶段后,土体降温速率又逐渐增快,但温度下降速率小于第一阶段。以 C8 测温点实测数据为例,冻结 12 d 到 30 d 时,土体温度由 0℃下降到 -10℃,每天下降约为 0.55℃,这

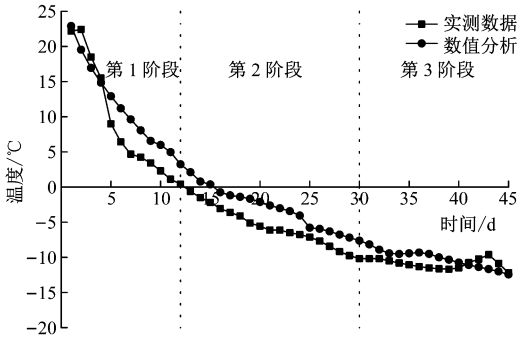


图3 C8测温点0.5 m处模拟计算温度与实测温度曲线对比图

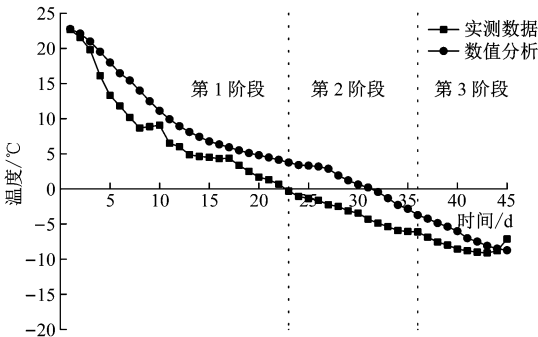


图4 J11测温点0.5 m处模拟计算温度与实测温度曲线对比图

是由于水冰相变后,冰的导热系数大于水的导热系数,所以降温速度加快;但随着冻结时间增长,地层温度与冻结管壁间温差减小,地层温度下降速度小于第一阶段。第三阶段,土体降温速率基本保持不变,这是由于热交换已达到平衡,推测冻结壁已基本形成。

数值模拟计算结果与实测数据之间存在误差的原因是,在数值模拟计算中将土体视为均质各向同性材料,且忽略了水分迁移的影响。而在实际工程中,土体为多孔介质,为非均匀连续体,且水分迁移会影响土体物理参数指标,因此,数值模拟计算结果与实测数据有一定差异,模拟计算温度值高于实测温度值1~2℃。综上所述,基于该数值模拟计算模型进行超长联络通道冻结温度场计算时,可以较好地模拟实际工况。因此利用数值模拟计算方法分析研究冻结法施工冻结温度场是合理可行的。

冻结45 d时地铁超长联络通道冻结温度场的扩展分布情况如图5所示。冻结45 d时,联络通道正常段形成的冻结壁厚度达2.45 m,大于设计值2.10 m;喇叭口处冻结壁厚度达2.10 m,大于设计值1.80 m;冻结壁整体平均温度达到-13.6℃,小于设计值-10.0℃,有较大富余。符合设计要求。

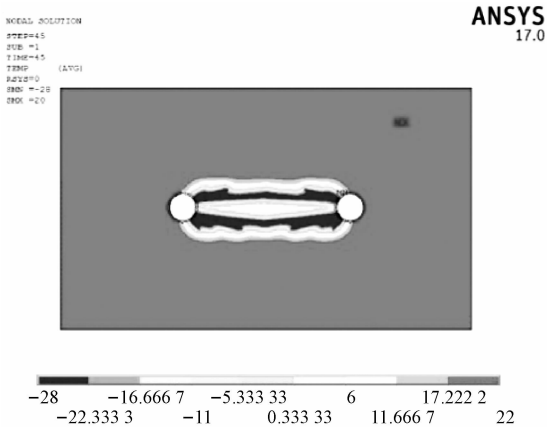


图5 冻结45 d时地铁超长联络通道冻结温度场云图截图

4 温度场影响因素敏感性分析

结合地铁联络通道冻结温度场方程,选取初始地温、导热系数和比热容这3个因素进行单因素分析,基于所建立的三维数值计算模型,选取测温点C8在0.5 m处的降温曲线来分析不同因素对冻结温度场影响的规律。

1) 初始地温的影响。土体初始温度分别取15℃、20℃、23℃(未变)、30℃进行计算,计算结果如图6所示。由图6可以看出,相同条件下,C8测温点土体温度降至0℃所需的时间与土体初始地温呈正相关,初始地温越高,测温点处土体温度降至0℃所需时间越长。如:初始地温15℃时,C8测温点土体温度降至0℃所需时间仅为10.5 d;当初始地温升高到30℃时,C8测温点土体温度降至0℃所需时间达到18 d,但土体温度的最终降温趋势趋于一致。这是由于土体初始温度越高,土体降温所需的冷量越大,因此土体温度降至0℃所需的时间越长;但当土体温度降至0℃后,随冻结时间增长,降温趋势趋于一致。

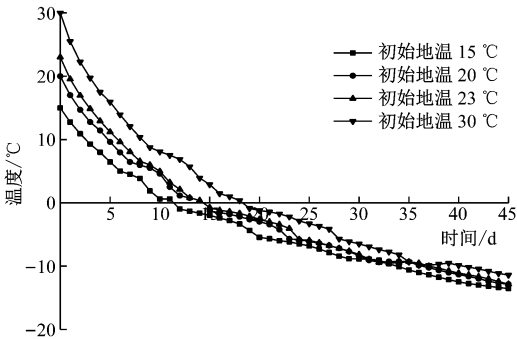


图6 不同初始地温下C8测温点土体温度降温曲线

2) 导热系数的影响。按土体导热系数在原有

基础上分别增大 10%、20%、30% 进行计算,计算结果如图 7 所示。由图 7 可以看出,相同条件下,C8 测温点土体温度降至 0℃ 所需的时间与导热系数呈负相关,导热系数越大,测温点处土体温度降至 0℃ 所需时间越短。如:导热系数增大 30% 时,C8 测温点土体温度降至 0℃ 所需时间仅为 11 d,该点降至 0℃ 所需时间较初始导热系数时缩短了 3 d。

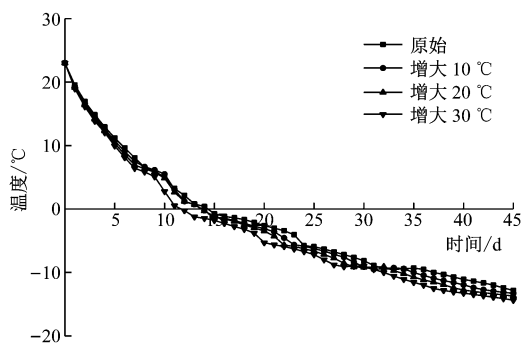


图 7 不同导热系数下 C8 测温点土体温度降温曲线

3) 比热容的影响。按土体比热容在原有基础上分别增大 10%、20%、30% 进行计算,计算结果如图 8 所示。由图 8 可以看出,相同条件下,C8 测温点土体温度降至 0℃ 所需的时间与比热容呈正相关,比热容越大,测温点处土体温度降至 0℃ 所需时间越长。如:比热容增大 30% 时,C8 测温点土体温度降至 0℃ 所需时间为 17 d,该点降至 0℃ 所需时间较初始比热容时延长了 3 d。

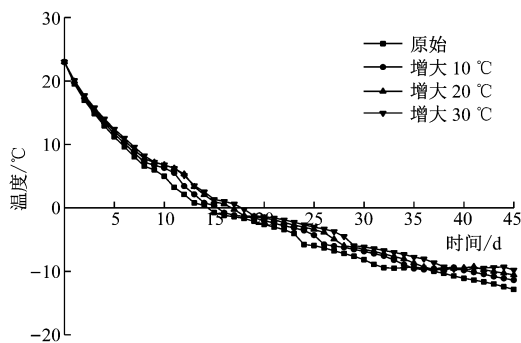


图 8 不同比热容下 C8 测温点土体温度降温曲线

原始地温主要受气温环境影响,以及水泥加固过程中水泥水化热释放出的热量影响。导热系数、比热容与土体性质有关,而采用水泥加固土体后可有效增加土体导热系数、减小比热容<sup>[6]</sup>。因此,在遇到大体量冻结工程时,可采用水泥、MJS 等技术对土体进行预加固后再进行冻结,避免两者同时施工时因水泥水化热量释放而导致冻结壁交圈时间的增加。

## 5 结语

超长地铁联络通道采用双侧打孔冻结时,冻结温度场变化规律主要分为温度快速下降与水冰相变阶段、温度下降、土体温度稳定等 3 个阶段,积极冻结期内各测点的温度变化趋势基本一致。数值模拟计算结果与实测数据验证了地铁联络通道三维冻结温度场有限元分析的可靠性。初始地温、导热系数、比热容对冻结温度场影响较为明显,冻结壁交圈时间与初始地温、比热容近似呈线性递增关系,初始地温每升高 5℃,交圈时间延长 2 d,交圈时间随比热容增加而延长;冻结壁交圈时间与导热系数呈负相关,导热系数每增高 10%,交圈时间缩短 1 d。

## 参考文献

- [1] 李方政. 人工地层冻结的环境效应及其工程对策[J]. 公路交通科技, 2004(3): 67.
- [2] 蔡海兵, 程桦, 姚直书, 等. 基于冻土正交各向异性冻胀变形的隧道冻结期地层位移数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1667.
- [3] 李方政, 孔令辉. 北京饱和和细砂地层地铁联络通道冻结壁厚度优化研究[J]. 工业建筑, 2017(增刊 2): 325.
- [4] 胡向东, 肖朝昀, 毛良根. 双层越江隧道联络通道冻结法温度场影响因素[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1): 7.
- [5] 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.
- [6] 王杰. 盾构进出洞水泥土加固后水平冻结温度场研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.

(收稿日期: 2019-05-17)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—51030704