doi:10. 3969/j. issn. 1006-8023. 2024. 03. 019

# 水泥土地层冻融温度场全过程发展影响研究

金修伟,鹿庆蕊*,李栋伟,陈士军,张海军,洪进锋
(东华理工大学 土木与建筑工程学院,南昌 330013)

**摘　要**:为研究水泥改良土地层冻融温度场发展的影响因素,以广州地铁三号线某地铁隧道冻结工程为背景,通过水、热耦合的方式模拟隧道冻融温度场,研究其冻融温度场全过程发展影响规律,并与实测数据对比证明模型的精确性,分析导热系数、容积热容、原始地温和水泥掺量等因素对冻融温度场的影响。结果表明,土体在冻融温度场全过程发展过程中,先是大幅度降温,形成稳定冻结帷幕后,降温速率变缓,有效冻结壁厚度缓慢增加,进入自然解冻阶段后,温度快速上升直至达到相变阶段,在该阶段维持一段长时间后,土体迅速恢复正温;分析不同因素对冻结温度场的影响规律,其中土体容积热容,原始地温对冻结温度场冻结效果呈负相关,对于自然解冻温度场影响不大;土体导热系数的降低会抑制冻结温度场的发展,但是可以缩短自然解冻的周期;在水泥掺量为 12%时,土体冻结效果最好,且融沉温度场发展速率最快,自然解冻周期最短。

**关键词**:地铁隧道;水泥改良土;冻融;温度场;数值模拟
**中图分类号**:U455　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1006-8023(2024)03-0184-13

# Study on the Influence of the Whole Process Development of Freeze-thaw Temperature Field in Cement Improved Soil Layer

JIN Xiuwei, LU Qingrui*, LI Dongwei, CHEN Shijun, ZHANG Haijun, HONG Jinfeng
(School of Civil & Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

**Abstract**: In order to study the influencing factors of the development of freeze-thaw temperature field in cement improved soil layer, this paper takes the freezing project of a subway tunnel in Guangzhou Metro Line 3 as the background, simulates the freeze-thaw temperature field of the tunnel through the coupling of water and heat, studies the influence law of the whole process development of the freeze-thaw temperature field, and proves the accuracy of the model by comparing with the measured data. The influence of thermal conductivity, volume heat capacity, original ground temperature, cement content and other factors on the freeze-thaw temperature field is analyzed. The results show that during the whole process of freeze-thaw temperature field development, the soil is greatly cooled first, and after forming a stable freezing curtain, the cooling rate slows down, and the thickness of the effective freezing wall increases slowly. After entering the natural thawing stage, the temperature rises rapidly until it reaches the phase transition stage. After a long period of time in this stage, the soil quickly returns to positive temperature. The influence of different factors on the freezing temperature field is analyzed. The volume heat capacity of the soil and the original ground temperature are negatively correlated with the freezing effect of the freezing temperature field, and have little effect on the natural thawing temperature field. The decrease of thermal conductivity of soil will inhibit the development of freezing temperature field, but it can shorten the period of natural thawing. When the cement content is 12 %, the soil freezing effect is the best, and the development rate of the thaw settlement temperature field is the fastest, and the natural thawing period is the shortest.

**Keywords**: Subway tunnel; cement improved soil; freeze-thaw; temperature field; numerical simulation

---

**收稿日期**:2023-11-12
**基金项目**:国家重点实验室开放基金项目(NR1 930);国家自然科学基金项目(52168044);江西省教育厅科技项目(GJJ2200702)。
**第一作者简介**:金修伟,硕士研究生。研究方向为土木工程。E-mail: 2868650302@qq. com
*通信作者:鹿庆蕊,博士,副教授。研究方向为地下工程。E-mail: 15907058702@163. com
**引文格式**:金修伟,鹿庆蕊,李栋伟,等. 水泥土地层冻融温度场全过程发展影响研究[J]. 森林工程,2024,40(3):184-196.
JIN X W, LU Q R, LI D W, et al. Study on the influence of the whole process development of freeze-thaw temperature field in cement improved soil layer[J]. Forest Engineering, 2024, 40(3):184-196.

## 0　引言

随着国内地铁建设项目的发展,不可避免地会在复杂的水文地质环境中建设更多的地铁。人工冻结法因其可应对复杂地质条件、增强土壤强度和稳定性、控制地下水渗流等优势广泛应用于隧道开挖、地铁施工等地下工程中[1]。然而,人工冷冻法施工时常伴随着冻胀融沉效应,为有效地控制冻胀危害,相关工程人员采用水泥改良法得到了很好的效果[2-4]。由于水泥改良提高了土壤初始温度,降低了土壤含水量,改变了其矿物成分和热物理参数,因此水泥改良土层与原土层冻结温度场的应用和分布存在着差异。

国内外学者对于冻结场温度场特性研究大部分还停留在天然土阶段,Yu 等[5]研究了地铁联络通道水平冻结温度场的发展特征,验证了有限元数值模拟人工冻结法温度场变化的可靠性。夏才初等[6]运用现场实测和数值模拟方法,对联络通道的温度场分布和冻结壁厚度进行研究,研究发现不同埋深对于冻结温度场的影响规律。Li 等[7]通过数值模拟与试验结果对比验证了人工冻结法施工过程中水流对冻结帷幕形成的影响规律。王祥等[8]采用有限元软件对联络通道进行温度场分析,证明了冻结工艺设计的合理性。闫冰等[9]、李珂等[10]、Ziegler 等[11]通过数值模拟和实测数据对比验证模型的准确性,进而分析冻结管排布对温度场发展的影响,研究表明冻结孔越密集,形成的冻结帷幕越厚。董新平等[12]在对冻结温度场发展过程中冻结壁的发展规律进行研究,得出联络通道各部位在不同冻结时间下的发展规律。张世雷等[13]分析了盐水和测温孔温度变化规律,然后对冻结法施工过程进行了数值模拟,得出了冻结壁温度变化的 4 个阶段。孙佳琪等[14]通过开展接收端土层热物理试验,研究了杯型冻结壁有效厚度、平均温度及温度场发展与分布规律,研究发现在冻结 25 d 时冻结壁达到有效厚度,具有可靠的安全性;黄洁等[15]通过现场实测与有限元数值计算相结合方法,开展冻结温度场冻融全过程发展特性及影响因素分析研究,研究结果表明,联络通道冻结温度场发展受不同因素影响较大,在积极冻结阶段早期主要受地层初始地温度影响,积极冻结阶段后期主要受土层导热系数影响。黄建[16]通过数值分析软件模拟了土体参数单一变化时的温度场分布情况,分别得到了土体物理参数及地表温度等对冻结时间的影响规律。

水泥改良土地层的研究大多数停留在冻结温度场方面,高珍珍[17]、陈晓鹏[18]通过室内试验,测定土体导热系数、冻结温度和渗透系数等热物理参数随水泥掺量及养护龄期的变化规律。黄建华等[19-21]验证了在水泥预加固地层采用人工冻结法的可行性,研究了水泥土与加固地层各参数影响性分析,得出导热系数的变化对于水泥预加固地层影响性最大,且水泥掺量为 10%时,土体的冻结性能最佳。王效宾等[22]研究了导热系数、比热容和相变潜热等因素变化对融化温度场的影响规律,结果表明,冻结水泥土解冻速度受冻土位置影响较大。

在水泥预加固地层中,温度场的发展受到多个因素制约,已有的研究还停留在各影响因素单个温度场的敏感性分析中,但实际工程中冻结与融沉温度场之间是连续不间断的。本研究依托广州地铁三号线某地铁隧道水平冻结工程,对地铁隧道冻融温度场进行模拟,并结合实测数据,分析天然土地层中冻融温度场的发展规律,研究水泥预加固后导热系数、容积热容、原始地温和水泥掺量等因素对冻融温度场的影响,为类似工程水泥预加固地层的施工提供理论参考。

## 1　工程概况

该工程为广州地铁三号线某折返线隧道斜下穿广汕公路和沙河立交桥,附近有新天河商贸城和其他建筑商铺。广汕公路是连接广州与汕头之间的重要交通干道,交通繁忙,不能封路施工。且隧道上覆地层中的地下市政管线纵横交错,数目较多,其中有电信管线、给水管线、电力管线、排水管线和煤气管线等。因此隧道不能采用明挖法施工,且该隧道所处地层为含水丰富的砂层和残积土层,地质条件非常复杂,环境特别差,采用常规的超前管棚法和小导管注浆等工法很难确保该工程安全可靠地按期完成,最终选择全断面水平冻结帷幕暗挖工法。

该折返线隧道长 138.8 m,轨面纵向坡度为 2%,为双线马蹄形隧道,隧道净高 9.146 m,净宽 11.4 m。为避免明挖施工导致的地下管线改线,以及受限于立交桥引桥,该折返线隧道采用冻结法加固地层后实施浅埋暗挖法施工,冻结隧道的长度约为 140.0 m,冻结断面为 86.0 $m^2$。该折返线隧道初期支护采用网喷混凝土,混凝土标号为 C20,厚度为 0.4 m。二次衬砌为现浇钢筋混凝土,厚度为 0.45 m,

标号为 C30。隧道最小埋深约为 8.0 m,最大跨度达到了 11.4 m。

### 1.1 工程地质条件

隧道地质纵断面如图 1 所示,地层分层及主要特征见表 1,隧道开挖范围内土层从地表至下部基岩分别为人工填土层(1),淤泥质土层(4-2),粉质黏性软土(4-1),砂性土(3-2),可塑性砂质黏性软土(5H-1),硬塑性砂质黏性土(5H-2),全风化花岗岩基岩(6H)。隧道主要穿越砂性软土和砂质黏性软土。其中,砂性土密实度较差,富水性较强,而砂质黏土饱水性较好,透水性较弱。地层的地下水补给来源主要是大气降水,水位平均埋深为 1.76 m。隧道底板所在地层深度范围 9.1~18.4 m,该范围地层温度基本不受大气温度的影响,自然气温为 25 ℃。

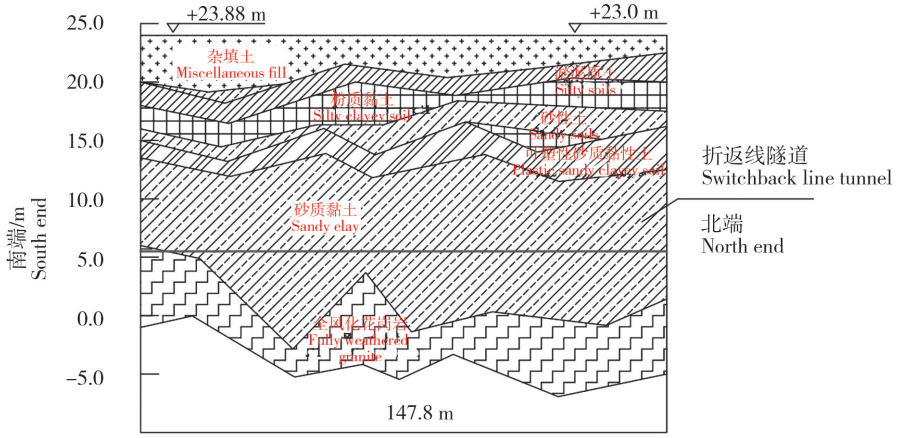



**图 1 折返线隧道地质纵断面**

Fig. 1 Geological profile of the switchback line tunnel

**表 1 地层分层及主要特征**

Tab. 1 Stratification and main characteristics of strata

| 地层名称 Stratigraphic name | 层号 Floor number | 地层土性(岩性) Formation soil property | 厚度/m Thickness | 标贯次数 Standard penetration number |
|---|---|---|---|---|
| 人工填土层 Artificial fill | 1 | 人工杂填土 | 0.6~4.0 | 2~11 |
| 河湖相沉积土层 Fluvial lacustrine sedimentary layer | 4-2 | 淤泥质土 | 0.4~3.9 | 1~3 |
| 冲积洪积土层 Alluvial alluvial soil layer | 4-1 | 粉质黏性软土 | 0.4~5.9 | 4~24 |
| 冲积洪积砂层 Alluvial alluvial sand layer | 3-2 | 砂性土 | 0.5~6.5 | 11~29 |
| 花岗岩残积土层 Granite residual soil layer | 5H-1 | 可塑砂质黏性软土 | 1.0~19.0 | 6~13 |
| | 5H-2 | 硬塑砂质黏性土 | 2.2~25.5 | 14~29 |
| 岩石全风化带 Rock completelyweathered zone | 6H | 全风化花岗岩 | 1.3~19.7 | 30~39 |

## 2 冻结方案设计

### 2.1 冻结孔及测温孔布置

该折返线隧道在南、北两端的冻结孔中安设冻结管实施冻结,选择隧道南端的实测温度开展代表性分析,如图 2 所示,具体设计如下。

1)水平冻结长度设计:冻结管长度均为 75.0 m,末端搭接大于 5.0 m。

2)冻结壁设计:冻土帷幕设计厚度为 2.5 m,平均温度需要低于-8℃。

3)水平冻结孔位设计:该隧道共布置 46 个冻结孔,沿隧道周围环形分布,顶拱冻结孔开孔间距为 0.7 m,侧壁和底板开孔间距为 0.85~0.95 m。

4)测温孔设计:隧道南端设长 76.0 m 的测温孔 4 个,末端搭接冻结范围为 5 m,分别用 CW-N-1、CW-N-2、CW-N-3 和 CW-N-4 表示。CW-N-1 和 CW-N-4 处于冻结帷幕外侧,距冻结孔距离分别为 1.18 m 和 0.88 m,CW-N-2 和 CW-N-3 处于冻结帷幕内侧,距冻结孔距离分别为 0.66 m 和 0.87 m。

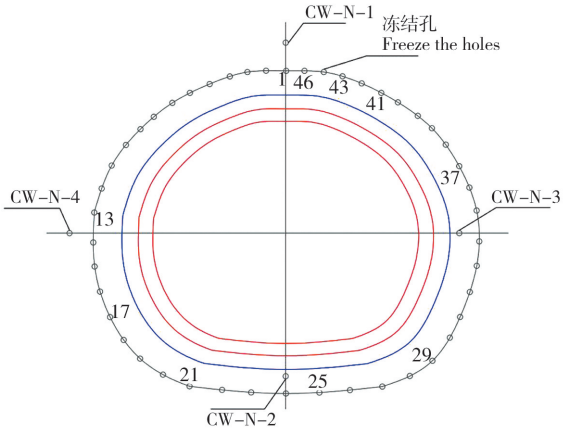



**图 2　折返线隧道南端冻结孔和监测孔布置**

Fig. 2 Layout of freezing hole and monitoring hole at the south end of the switch line tunnel

将测温孔布置在冻结帷幕内外侧的目的是检测冻结帷幕内外侧的冻结发展情况。各测温孔内每 3.0 m 布置一个测温点，观测频率为每天一次。

盐水降温曲线如图 3 所示。通过对盐水降温曲线图进行分析，1～60 d 属于冻结降温阶段，此时土层热交换最为剧烈，热负荷大；61～150 d 属于冻结强化阶段，土层热交换比较稳定，冻结速度加快，冻土平均温度大大降低，冻土强度迅速增大。

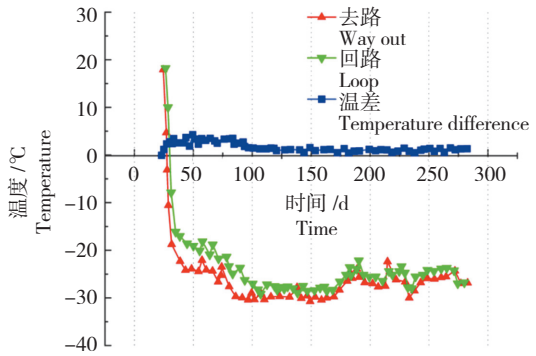



**图 3　冻结盐水温度曲线**

Fig. 3 Temperature curve of frozen brine

## 3　冻融温度场数值模拟

### 3.1　模型建立

本研究选取广州地铁某折返线隧道作为本次数值模拟分析对象，该折返线隧道断面为马蹄形，长 138.8 m，宽 11.4 m，高 9.146 m，埋深 8～10 m，属于浅埋大断面隧道。隧道内轮廓线为五心圆拱形，拱部曲率半径为 5.256 m，腰部曲率半径为 2.6 和 5.2 m，底部仰拱曲率半径为 9.13 m，腰部与底部连接处曲率半径为 1.6 m。隧道支护结构采用复合式衬砌，初期支护由 C20 喷射混凝土、钢筋网和格栅钢架组成，厚约 350 mm，二次衬砌采用 c30 厚 450 mm 的 s8 模筑钢筋混凝土。

1）几何模型建立：由于该隧道断面较大，埋深浅，对于地表的影响较大，因此建立长 150 m、高 60 m 二维有限元单元，并按照土层分界线进行划分，如图 4 所示，同时建立隧道模型以及外部冻结管模型。

2）参数赋值：本模型隧道施工区域为砂质黏土地层，土体性质较为接近，冻结帷幕大部分位于硬塑性砂质黏性土（5H-2）。为提高计算效率，在保证模型计算精确性、误差在允许范围内的情况下，适当简化土层，在该地层中参数按照冻土、未冻土和融土进行设定，根据室内试验研究，土体的热力学参数见表 2。

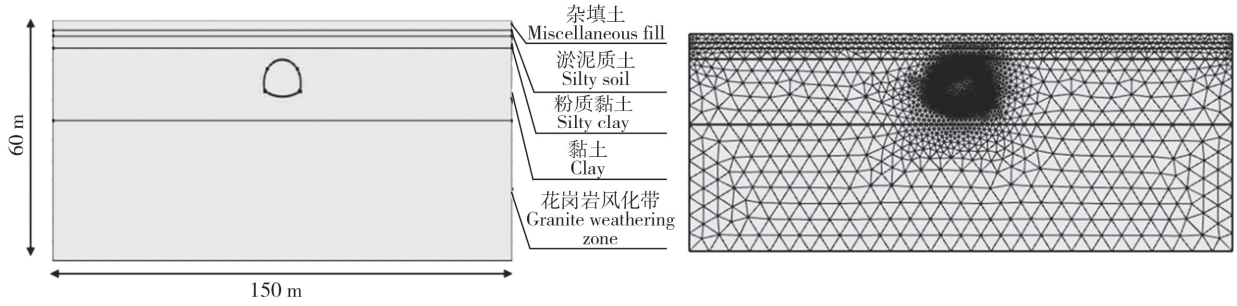



**图 4　几何模型示意图及网格划分示意图**

Fig. 4 Schematic diagram of geometric model and grid division

3）施加温度场、水分场：温度场与水分场采用添加上文推导的水热耦合方程，即系数型偏微分方程，设定扩散系数、吸收系数以及源项等。

4）边界条件与荷载：温度场模型初始土体温度设置为 18 ℃，冻结管四周持续冷量输送保持恒温为狄里克莱第一边界条件；冻结管中盐水温度参照实际工程用分段函数进行优化设置，模型顶部地表层温度依据实际工程的平均大气温度设置为 20 ℃，视

为第二类边界条件,模型两侧与底部距离因距离冻结区域较远视为不发生热量交换为第三类边界条件,绝热边界热流量为零,水分场四周边界为零通量。在积极冻结150 d结束后,模拟周期为750 d自然解冻温度场变化情况,此时第一类边界条件,使冻结管不再提供冷量,仅靠第二类边界条件大气与地层的热交换进行解冻。

**表2 土层热力学参数表**

Tab. 2 Thermodynamic parameters of soil layer

| 土层 Soil layer | 导热系数/(W·m$^{-1}$·℃$^{-1}$) Thermal conductivity | | | 比热容/(KJ·kg$^{-1}$·℃$^{-1}$) Specific heat capacity | | 相变潜热/(kJ·kg$^{-1}$) Latent heat of phase transformation | 冻结温度/℃ Freezing temperature | 饱和密度/(kg·m$^{-3}$) Saturation density |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 未冻土 Unfrozen soil | 冻土 Frozen soil | 融土 Melted soil | 未冻土 Unfrozen soil | 冻土 Frozen soil | | | |
| 杂填土 Miscellaneous fill | 0.92 | | 1.926 | — | — | 1 800.0 | | |
| 淤泥质土 Silty soil | 1.63 | | 1.712 | — | — | 1 828.0 | | |
| 粉质黏土 Silty clay | 1.50 | | 1.507 | — | — | 1 958.3 | | |
| 砂质黏土 Sandy clay | 1.330 | 1.86 | 1.31 | 2.311 | 1.143 | 58.974 | -0.4 | 1 958.1 |
| 6%水泥掺量砂质黏土 6% cement content sandy clay | 1.315 | 1.85 | 1.30 | 1.986 | 1.820 | 55.670 | -0.6 | 2 253.3 |
| 9%水泥掺量砂质黏土 9% cement content sandy clay | 1.300 | 1.85 | 1.28 | 1.899 | 1.720 | 53.580 | -0.9 | 2 420.6 |
| 12%水泥掺量砂质黏土 12% cement content sandy clay | 1.280 | 1.83 | 1.26 | 1.863 | 1.698 | 51.650 | -1.1 | 2 528.3 |
| 15%水泥掺量砂质黏土 12% cement content sandy clay | 1.265 | 1.82 | 1.245 | 1.844 | 1.665 | 48.190 | -1.3 | 2 595.3 |
| 18%水泥掺量砂质黏土 18% cement content sandy clay | 1.330 | 1.86 | 1.31 | 1.835 | 1.650 | 45.230 | -1.6 | 2 656.7 |
| 强风化花岗岩 Heavily weathered granite | 0.89 | 1.302 | — | — | 2 104.6 | | | |

### 3.2 水热耦合基本理论

温度场控制方程如下。

$$\rho_s C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - L\rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \lambda \cdot \square^2(T) \text{。} \quad (1)$$

式中:$\rho_s$为土体的密度,g/cm$^3$;$C$为土体的等效容积热容量,J/(cm$^3$·℃);$T$为温度,℃;$L$为冰水相变潜热,J/g;$\rho_i$为冰的密度,g/cm$^3$;$\lambda$为土体的导热系数,J/(cm·s·℃);$\theta_i$为土体中冰的体积含量,m$^3$;$t$为时间,s。

水分场控制方程如下。

$$\frac{\partial \theta_u}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w}\frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \square[D(\theta_u)\square\theta_u + K(\theta_u)] \text{。} \quad (2)$$

式中:□为哈密顿算子;$\rho_w$为水的密度,g/cm$^3$;$\theta_u$为土体中未冻水体积含量,cm$^3$;$\rho_i$为冰的密度,g/cm$^3$;$\theta_i$为土体中冰的体积含量,cm$^3$;$D(\theta_u)$为水分扩散系数,cm$^2$/s;$K(\theta_u)$为土的渗透系数,cm/h。

同时选用相对饱和度$S$为变量代替$\theta_u$进行水热耦合求解,公式为

$$S = \frac{\theta_u - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \text{。} \quad (3)$$

式中:$\theta_u$为未冻水体积含量;$\theta_r$为残余含水率;$\theta_s$为饱和含水率。

上述公式2个微分控制方程,包含3个基本变量,未冻水含量($\theta_u$)、含冰量($\theta_i$)和温度($T$),2个公式无法对3个变量进行求解,因此需要一个联系方程,方可求出3个基本变量。

白青波[23]根据前人经验提出“固液比”的概念,表示土体中固态冰与液态水的比值,将其作为耦合方程

$$B_I = \frac{\theta_i}{\theta_u}\begin{cases} 1.1\left(\dfrac{T}{T_f}\right)^B - 1 & T < T_f \\ 0 & T \geqslant T_f \end{cases} \text{。} \quad (4)$$

式中:系数1.1为水与冰的密度之比$\rho_w/\rho_i$;$B$为随土质与含盐量变化的常数;$T_f$为土体冻结温度。

水热耦合属于强耦合,彼此相互影响,温度的变化使得未冻水含量变化,含冰量与含水量产生改变,含冰量与含水量的改变引起土体的导热系数与

热容发生改变，反过来对温度造成影响。本研究采用的水热耦合计算流程如图 5 所示。

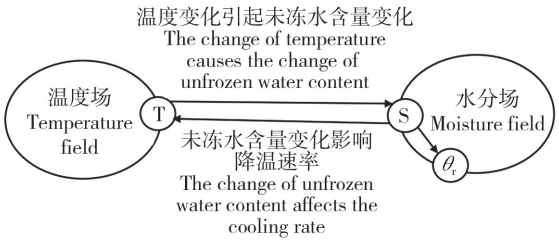


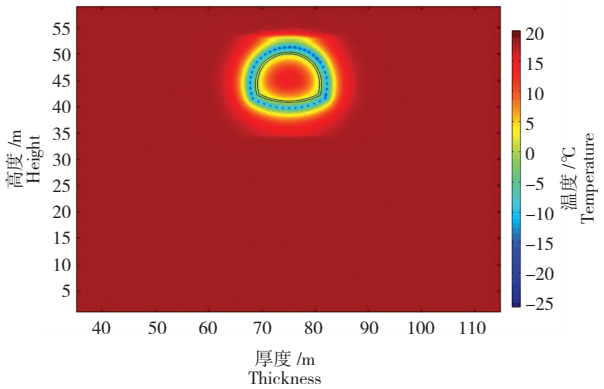

**图 5　水热耦合示意图**

Fig. 5 Schematic diagram of hydrothermal coupling

### 3.3　计算结果及分析

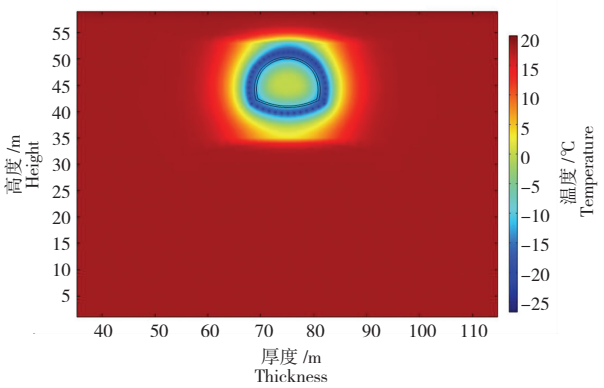
#### 3.3.1　积极冻结期温度场分布

该隧道实际冻结施工过程中，积极冻结期为 150 d，隧道南端实测的冻结壁有效厚度为 3.06 m。数值模拟中同样取积极冻结时间为 150 d，所形成的冻结壁总厚度为 4.57 m，其中冻结管圈径内侧厚度为 2.5 m，外侧厚度为 2.07 m，因冻结管圈径距隧道外半径为 1.1 m，可知冻结壁有效厚度为 3.17 m，与实际情况基本相符。积极冻结期内冻结壁的形成过程如图 6 所示。



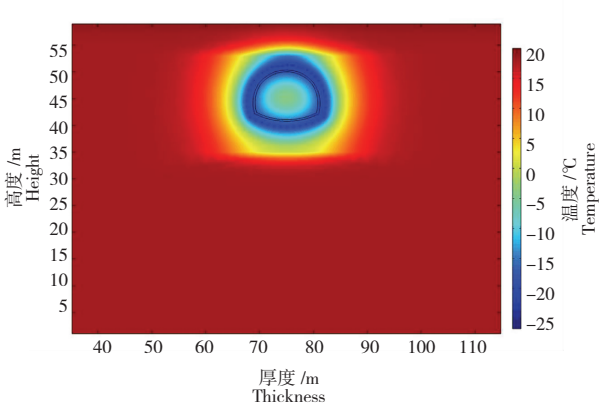

（a）第 20 天温度分布云图

（a）Temperature distribution cloud map on day 20



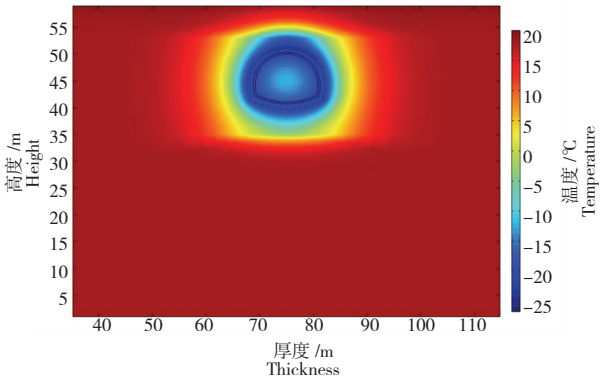

（b）第 60 天温度分布云图

（b）Temperature distribution cloud map on day 60



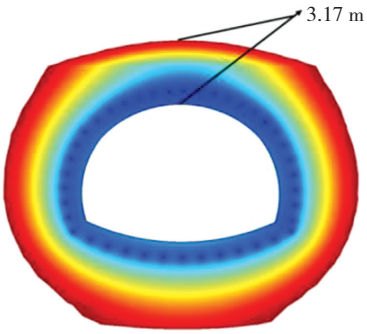

（c）第 100 天温度分布云图

（c）Temperature distribution cloud map on day 100




（d）第 150 天温度分布云图

（d）Temperature distribution cloud map on day 150




（e）第 150 天有效冻结壁厚度

（e）Effective freezing wall thickness on day 150

**图 6　积极冻结期温度场云图**

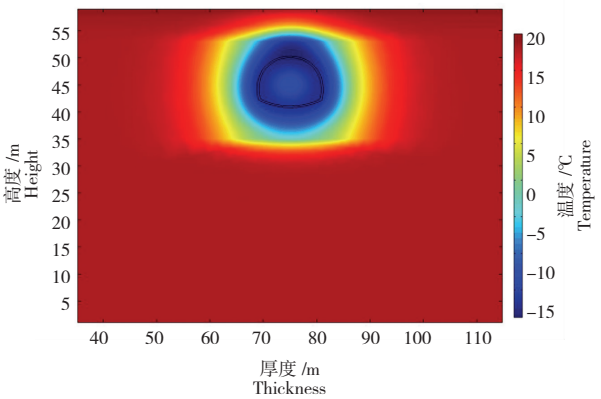
Fig. 6 Cloud map of temperature field during active freezing period

观察图 6 积极冻结期温度场云图可知，随着冻结时间的增加，土体冻结的影响范围逐渐增大；在积极冻结初期，土体的温度迅速降低，冻结管周围土体中孔隙水结成冰，并且互相胶结在一起，最终形成连续分布的止水帷幕；在积极冻结 60 d 后，冻结土体温度降低速度逐渐减缓，冻结帷幕厚度缓慢增加，隧道土体中心温度缓慢降低，根据成冰公式可推算出，此时冻结帷幕平均温度降至−9.5 ℃，满

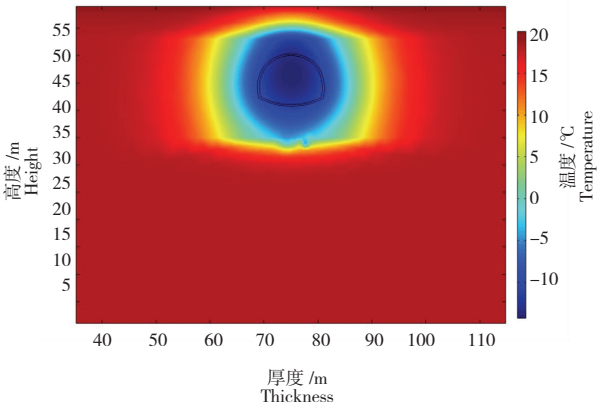
足设计冻结帷幕平均温度要求。在积极冻结期后期,对比隧道侧面及拱顶、拱底可知,隧道拱顶和拱底温度场扩散速度相比侧面扩散速度较慢,主要原因是,此时温度场扩散进入了上方的砂土地层及下方的全风化花岗岩地层,相比于隧道所处的砂质黏土地层,这 2 个地层的含水率及导热系数较低,因此温度场的扩散速率较低。

### 3.3.2 自然解冻期温度场分布

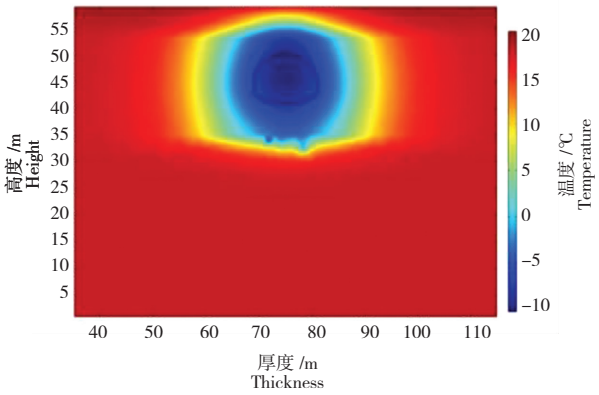
在冻结期结束之后,迅速关闭冻结站,并停止冷冻盐水循环,开始进入自然解冻期。由于本工程的冻结体量较大,加之地层自然解冻过程本身较为缓慢,因此,在本节的数值计算中,总共模拟了 750 d 自然解冻期的温度场变化,图 7 为隧道自然解冻 10、50、100、200、750 d 温度场变化云图。结果表明,自然解冻温度场分为快速解冻、相变阶段和稳定升温 3 个阶段,在自然解冻前期,土体处于快速解冻阶段,土体内部不同位置温差较大,自然解冻第 10 天时,冻土圈附近冻结帷幕平均温度快速升至-10 ℃,之后随着时间推移,冻结帷幕平均温度继续升高



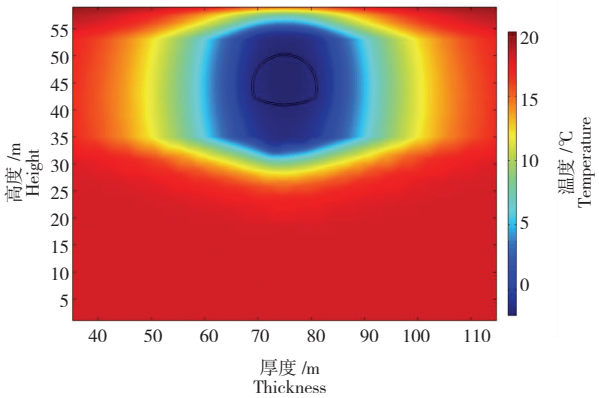

(a) 第 10 天
(a) Day 10



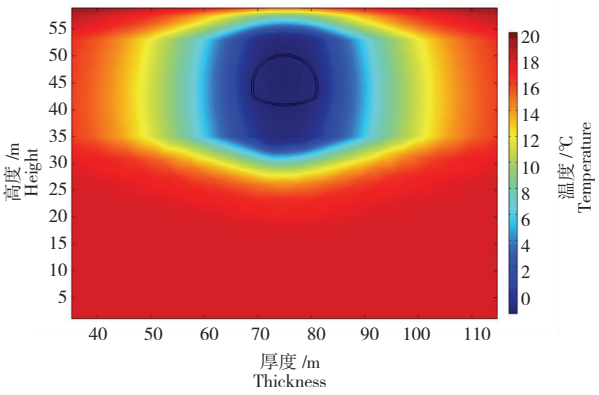

(b) 第 50 天
(b) Day 50




(c) 第 100 天
(c) Day 100




(d) 第 600 天
(d) Day 600




(e)第 750 天
(e) Day 750

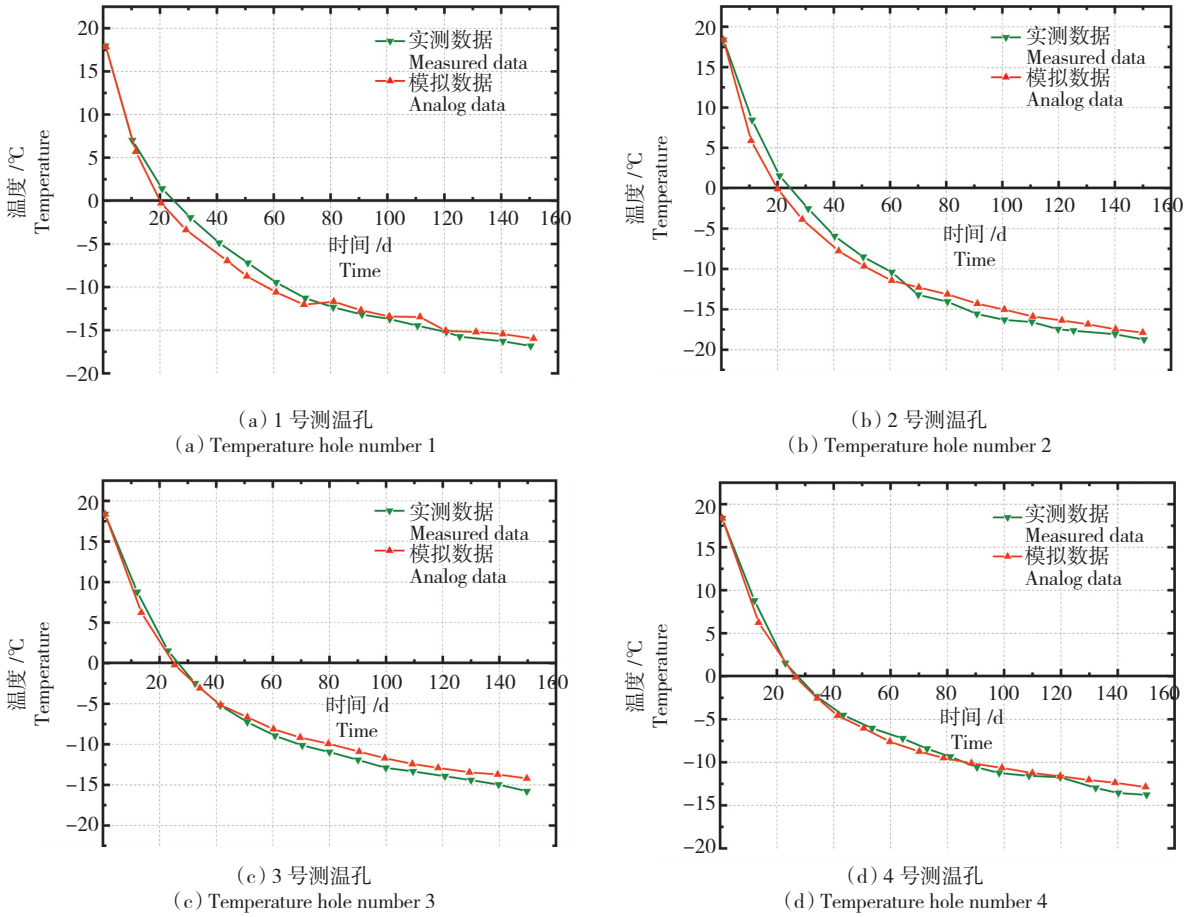
**图 7 自然解冻期温度场云图**

Fig. 7 Cloud map of temperature field during natural thawing period

至-2 ℃,此时冻土帷幕处于冰水相变阶段,土体中冰吸收大量热量融沉成水,但是温度不变,这一阶段持续较长,从自然解冻温度场 100 ~600 d 变化情况可以看出,温度场基本没有太大的变化。自然解冻期末期,土体进入稳定升温阶段,基本恢复正温,土体中孔隙冰重新转化成液态水的形式存在。

3.3.3　模拟与实测数据对比

本工程积极冻结期为 150 d,隧道南端共有 4 个测温孔,长度为 30~75 m,其中 1 号测温孔布置在马蹄形隧道拱顶,位于冻结管外侧约 0.8 m 处,2 号测温孔位于马蹄形隧道拱底,冻结管内侧约 0.8 m 处,3 号、4 号测温孔分别位于马蹄形隧道右、左两侧冻结管内部约 0.8 m 和外部约 0.8 m 处。土体温度的监测主要是为了进行冻结壁厚度计算,保证工程的安全稳定,为了验证温度场模拟结果的可靠性,将 4 个测温孔得出的实际数据与模拟数据进行对比,具体数据如图 8 所示。




(a) 1 号测温孔
(a) Temperature hole number 1

(b) 2 号测温孔
(b) Temperature hole number 2

(c) 3 号测温孔
(c) Temperature hole number 3

(d) 4 号测温孔
(d) Temperature hole number 4

**图 8　测温孔温度曲线**

Fig. 8 Temperature curve of temperature measuring hole

对比 4 个测温孔内温度监测数据,可得出以下结论。

1)相对于冻结管圈径外侧,冻结管圈径内侧的土体温降速度更快。

2)隧道拱顶、拱底的温度下降速率高于隧道左右两侧。

3)有限元模拟温度场数据与测温孔实测温度场数据整体趋势一致,结果虽有误差,但误差较小。因此说明了本次数值模拟得到的瞬态冻结温度场能够较为真实地反映工程现场情况,并具有相当的精确性,更进一步表明数值模拟中热物理参数依据冻土物理性能试验取值,可靠性较高。

造成误差的主要原因有以下原因:①在实际工程中土层的分布是不均匀的,而在模拟过程中的计算模型为理想模型,假定土层为均匀分布;②本研究在试验测定热物理参数时设置了冻土与非冻土 2 种状态,但实际上土体的热物理参数是随着时间不断变化的,这需要更多的试验数据进行精确减少误差。

### 3.4　土体热物理参数改变对温度场的影响

#### 3.4.1　导热系数对冻融温度场影响分析

为了分析导热系数对冻融温度场的影响效果,

以实际工程为基础进行分析,根据高珍珍[17],陈晓鹏[18]研究经验可知,导热系数相较于注浆后地层是最大的,因此在天然土导热系数基础上降低 10%、20%、30%进行模拟。为了对比不同导热系数对土体温度发展影响,选取 1 号测温孔作为数据采集点,绘制温度随时间变化曲线,如图 9 所示。

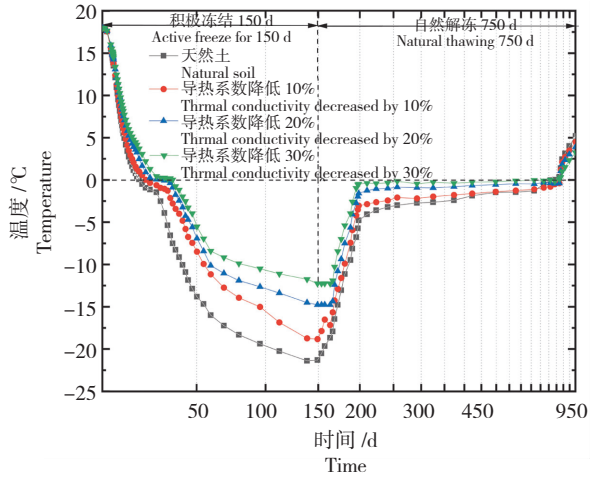



**图 9 不同导热系数下温度变化曲线**

Fig. 9 Temperature change curve under different thermal conductivity

由图 9 和图 10 可知,不同导热系数下,土体温度随时间变化趋势大致相同,相同冻结时间下,导热系数越小土体温度最终越高,土体达到相变温度时间越长,土体恢复正温的时间也越长。其中,在 100%、90%、80%和 70%导热系数下,根据内插法导热系数每降低 10%时,对应达到土体相变的时间平均增加 2 d,在经历积极冻结后,相同自然解冻时间下,导热系数高的土体较先达到冰水相变点且完成解冻的时间更短,平均导热系数每降低 10%时,自然解冻的时间增加 30 d。天然土体经过水泥改良之后,土的导热系数呈下降趋势,因此单独从导热系数的改变对冻结温度场发展分析,水泥的掺入对温度场发展速度有一定抑制效果。由以上数据能得出,在积极冻结期温度的下降速度与导热系数的变化量基本呈正相关性,而最终自然解冻的时间与导热系数呈负相关。

### 3.4.2 容积热容对冻融温度场影响分析

根据已有经验[19-21],由于水泥与水发生反应,土体中一部分的自由水被消耗掉,从而导致土体的容积热容,因此模拟以天然土模型为基础,分析容积热容降低 10%、20%和 30%时,对于冻融温度场的影响,具体模拟计算结果图 11 所示。

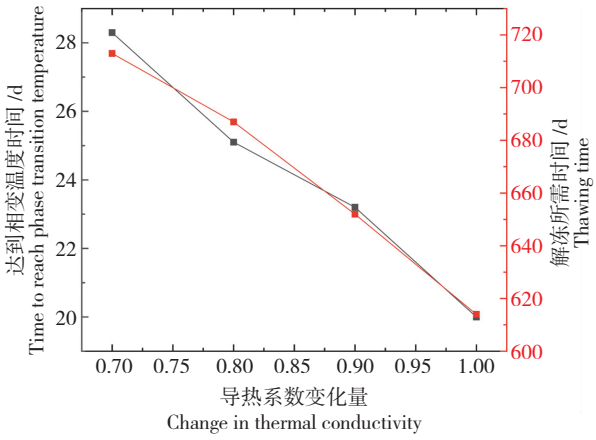



**图 10 土体到达相变及解冻时间随导热系数变化**

Fig. 10 Changes of soil phase transition and thawing time with thermal conductivity

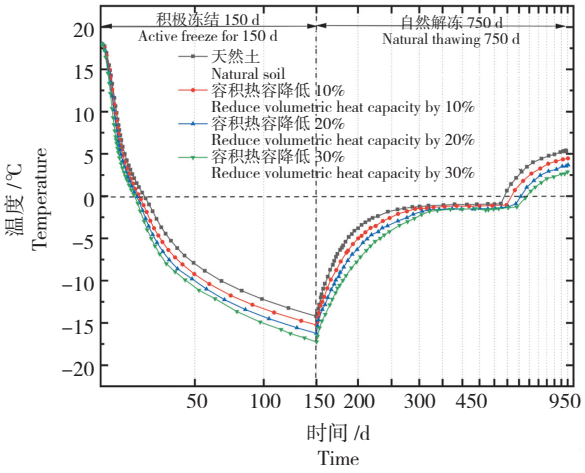



**图 11 不同容积热容下温度变化曲线**

Fig. 11 Temperature change curve under different volume heat capacity

由图 11 和图 12 可知,在积极冻结期测温孔内温度逐渐降低,达到相变温度后,测温孔内温度先是在一段时间内基本不变,随后骤降,在积极冻结期末期,温度降低速率变缓。进入自然解冻期后,测温孔内温度有明显的上升趋势,并快速提升到相变温度,在相变阶段维持一段时间后,测温孔内温度恢复正温。以容积热容为单一变量时,容积热容越低,相同冻结时间下测温孔内温度越低,相同自然解冻时间下,温度上升的速率越快。容积热容越低土体温度下降速度越快,达到相变温度时间越短。在自然解冻期间容积热容越小,解冻所需的时间也越短,但是减小的幅度不是很大,平均容积热容降低 10%自然解冻时间缩短 20 d,当采用先注浆后冻结工法时,由于水泥与水发生反应,

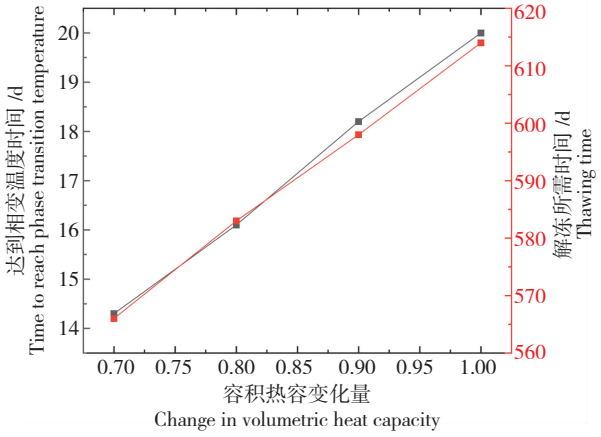



**图 12　土体到达相变及解冻时间随容积热容变化**

Fig. 12 Changes of soil phase transition and thawing time with volumetric heat capacity

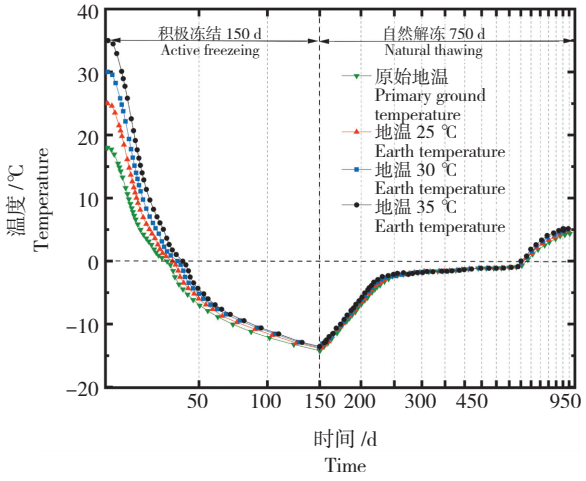



**图 13　不同原始地温下 1—4 号测温孔内温度变化曲线**

Fig. 13 Temperature variation curve in No. 1—4 temperature measuring hole under different original ground temperature

土体中一部分的自由水被消耗掉，从而导致土体的比热容降低，容积热容也随之发生改变，因此在增加水泥掺量下，有助于冻结温度场的发展，并缩短融沉周期。

### 3.5　环境改变量对温度场的影响

#### 3.5.1　原始地温对冻融温度场影响分析

在水泥预加固地层的实际工程中，原始地温会受到水泥掺量的影响而发生改变，原因是，水泥与水发生反应会释放出水化热使地层温度升高。水泥掺量的不同导致释放的水化热量也不一样，因此为了更加贴合实际工程现状，探讨原始地温升高至 25、30、35 ℃时，对冻融温度场的影响效果。

由图 13 和图 14 可知，原始地温发生变化后对于冻结温度场有着显著的影响，主要体现在土体发生冰水相变的时间方面，平均原始地温提高 5 ℃，冰水相变时间延长 5 d。在积极冻结期末期不同原始地温下土体的温度基本一致。究其原因在于随着原始低温的升高，土体在降温时所需冷量也就越多，因此土体达到冻结温度的时间也就越长，但当冰水相变结束后，土体持续降温阶段的趋势是一致的。对于融沉温度场来说，原始地温的改变对其影响微乎其微，不同的原始地温下，土体解冻温度变化规律基本一致，并且土体恢复正温的时间也基本相同。因此在后期模拟分析水泥预加固地层对土体冻胀融沉位移影响时，不同水泥掺量下的原始地温可以设置为相同温度，其对于最终结果的影响基本可以忽略。

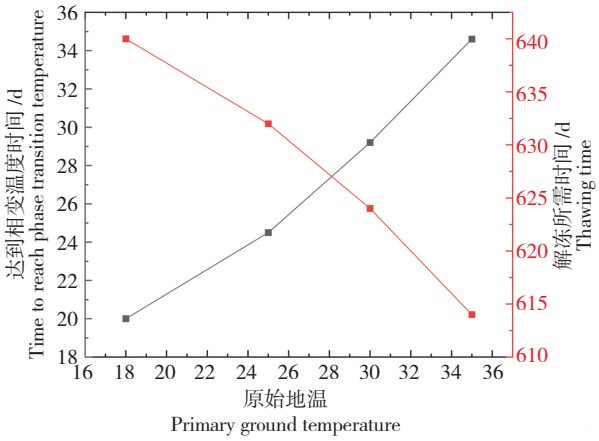



**图 14　土体到达相变及解冻时间随原始地温变化**

Fig. 14 Change of soil phase transition and thawing time with original ground temperature

#### 3.5.2　水泥掺量对冻融温度场影响分析

以上研究可知，人工冻结法中冻融温度场的发展受到多因素影响，在先注浆后冻结工法施工时由于不同水泥掺量注浆的影响，土体的热物理参数有所差异，会导致冻融过程中温度场的发展不一致，水泥的掺入导致土体导热系数、容积热容等因素发生变化。因此为了更加直观地体现水泥参量对冻融温度场的综合影响，有必要研究水泥掺量的变化对于冻融温度场的影响，以便于在施工时选取最合适的水泥掺量进行注浆。

由图 15 和图 16 分析可知，在相同降温条件下，不同水泥掺量积极冻结期末期达到的温度也不同，随着水泥掺量的增加，最终负温呈现先增大后减小

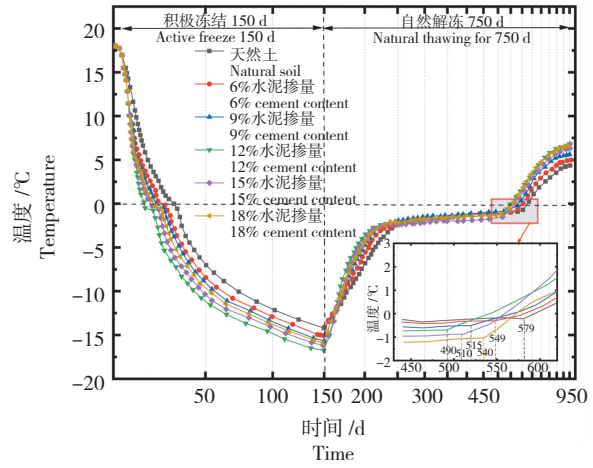



**图 15 不同水泥参量下温度变化曲线**

Fig. 15 Temperature change curve under different cement parameters

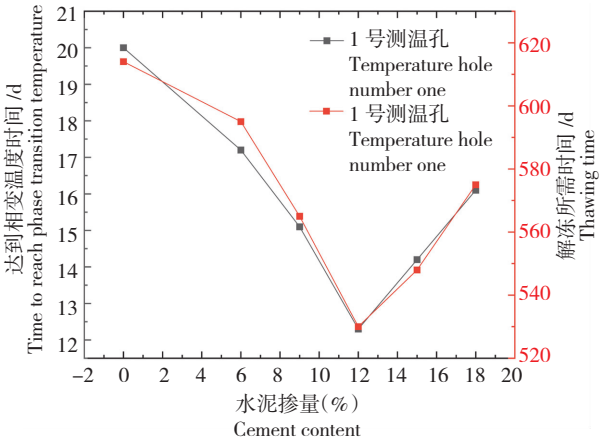



**图 16 土体到达相变及解冻时间随水泥掺量变化**

Fig. 16 Change of soil phase change and thawing time with cement content

的趋势,冻结末期 12%水泥掺量下达到的负温最高。在水泥掺量为 12%内,平均水泥掺量增加 3%,达到相变的时间减少 2.5 d,在水泥掺量为 12%以上,平均水泥掺量增加 3%,达到相变的时间增加 2 d,对于融沉温度场而言,在 12%水泥掺量下土体恢复正温的时间最短,相对于原状土减少了 84 d。

对于冻结温度场而言,不同水泥掺量下土体达到相变的时间及降温速率不同;对于自然解冻温度场分析,不同水泥掺量下土体的解冻时间具有一定差异。水泥土冻融时存在冻结最佳水泥掺量,砂质黏土冻融最佳水泥掺量为 12%,该掺量时土体冻结效果最好,且自然解冻周期最短。

## 4 结论

本研究分析水泥改良土地层冻融温度场全过程发展影响性分析主要结论有以下几点。

1)通过模拟地层温度场全过程发展规律分析,在积极冻结前 60 d 的地层迅速冻结,之后土体降温速度缓慢,冻结 150 d 是有效冻结壁厚度达到 3.17 m;在自然解冻前期,土体处于快速解冻阶段,土体内部不同位置温差较大,之后随着时间推移冻土帷幕达到冰水相变阶段,这一阶段持续较长,温度场基本没有太大的变化,自然解冻期末期,土体进入稳定升温阶段,基本恢复正温。

2)有限元模拟温度场数据与测温孔实测温度场数据整体趋势一致,对于同一测温孔实测数据与模拟数据接近,说明使用该数值模型模拟冻融温度场全过程发展是可行的,可为广东地铁轨道交通类似地质条件工程提供理论参考。

3)由温度场全过程敏感性分析可知,第一,对于水泥改良土来说,其导热系数低于天然土地层,导致抑制冻融温度场发展,相同冻结时间下,温度场下降速度与导热系;第二,容积热容与冻融温度场呈负相关性,容积热容降低,土壤温度下降速率增加,且解冻速率更快;第三,原始地温变化对于冻结温度场具有显著的影响,但对于融沉温度场而言其影响微乎其微,土体恢复正温的时间也基本相同;第四,水泥掺量的改变涉及到影响温度场的多个因素随之改变,通过研究发现在水泥掺量为 12%时,土体冻结效果最好,且融沉温度场发展速率最快,自然解冻周期最短。

## 【参 考 文 献】

[1] 奚家米,熊元林,马新民,等. 地铁联络通道冻结法施工研究现状[J]. 科学技术与工程,2020,20(17):6720-6728.
XI J M, XIONG Y L, MA X M, et al. Research status of freezing method construction of subway contact passage [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(17): 6720-6728.

[2] 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):174-182.
CHEN J H, ZHUANG Y, CHEN B J, et al. Development characteristics of freezing temperature field of coastal soft soil strata [J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48

(4): 174-182.

[3] 武亚军,杨建波,李大勇. 隧道联络通道及泵站冻结法施工数值分析[J]. 土木工程学报,2011,44(S2):144-147.
WU Y J, YANG J B, LI D Y. Numerical analysis of freezing construction of tunnel connecting passage and pumping station[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(S2): 144-147.

[4] 龙伟,荣传新,段寅,等. 拱北隧道管幕冻结法温度场数值计算[J]. 煤田地质与勘探,2020,48(3):160-168.
LONG W, RONG C X, DUAN Y, et al. Numerical calculation of temperature field of freeze-sealing pipe roof method in Gongbei tunnel[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(3): 160-168.

[5] YU C Y, LU M Y. Study on development characteristics of horizontal freezing temperature field in subway connecting passage[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 619(1): 012086.

[6] 夏才初,方杭楠,赵昊楠,等. 富水软土地层联络通道冻结温度场分布规律[J]. 地下空间与工程学报,2023,19(4):1339-1350.
XIA C C, FANG H N, ZHAO H N, et al. Distribution law of freezing temperature field in connecting channel of water rich soft soil layer[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(4): 1339-1350.

[7] LI Z M, CHEN J, SUGIMOTO M, et al. Numerical simulation model of artificial ground freezing for tunneling under seepage flow conditions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 92: 103035.

[8] 王祥,陈发达,徐文胜,等. 某地铁工程长距离联络通道水平冻结法加固设计与有限元分析[J]. 城市轨道交通研究,2022,25(10):82-86.
WANG X, CHEN F D, XU W S, et al. Reinforcement design of horizontal freezing method applied to a long-distance link passage of metro project, and finite element analysis[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(10): 82-86.

[9] 闫冰,陈清扬,张世雷,等. 富水红砂岩地层隧道联络通道冻结温度场分布规律及其敏感性分析[J]. 中国安全生产科学技术,2022,18(9):41-48.
YAN B, CHEN Q Y, ZHANG S L, et al. Distribution law and sensitivity analysis of freezing temperature field in connecting channel of tunnel in water-rich red sandstone stratum[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(9): 41-48.

[10] 李珂,胡俊,林小淇,等. 砂卵石地层联络通道温度场发展规律及敏感性分析[J]. 森林工程,2023,39(1):174-186.
LI K, HU J, LIN X Q, et al. Development law and sensitivity analysis of temperature field of contact channel in sand and pebble strata[J]. Forest Engineering, 2023, 39(1): 174-186.

[11] ZIEGLER M, BAIER C. Optimization of artificial ground freezing application for tunneling subject to water seepage[J]. Journal of PLA University of Science & Technology, 2003, 4(6):69-74.

[12] 董新平,井景凤,王余飞,等. 地铁联络通道冻土帷幕薄弱部位及其成因分析[J]. 城市轨道交通研究,2022,25(10):20-23,29.
DONG X P, JING J F, WANG Y F, et al. Weak parts and cause analysis of frozen soil wall in metro cross passage[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(10): 20-23, 29.

[13] 张世雷,汪磊,何越磊,等. 复合地层联络通道冻结温度场发展规律研究[J]. 地下空间与工程学报,2022,18(S1):266-273.
ZHANG S L, WANG L, HE Y L, et al. The development regularities research of freezing temperature field for the cross passage in compound stratum[J]. Underground Space and Engineering Journal, 2022, 18(S1):266-273.

[14] 孙佳琪,苗胜军,隋智力. 盾构隧道接收端冻结温度场的演化规律[J]. 科学技术与工程,2022,22(8):3300-3308.
SUN J Q, MIAO S J, SUI Z L. Evolution rule of freezing temperature field at the receiving end of shield tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(8): 3300-3308.

[15] 黄洁,何亮,陈军浩. 地铁联络通道冻结法施工冻融全过程温度场发展特性及影响因素分析[J]. 城市轨道交通研究,2022,25(12):101-105,111.
HUANG J, HE L, CHEN J H. Analysis of development characteristics and influencing factors of temperature field during metro cross passage thawing full process[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(12): 101-105, 111.

[16] 黄建. 盾构地铁隧道联络通道冻结加固数值模拟分析[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2021.
HUANG J. Numerical simulation measured analysis of freezing reinforcement for cross passage of shield metro tunnel[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2021.

[17] 高珍珍. 水泥改良土的冻结特性试验研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2022.
GAO Z Z. Experimental study on freezing characteristics of cement improved soil[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022.

[18] 陈晓鹏. 人工冻结水泥改良土力学性能及其冻胀融沉特性研究[D]. 抚州:东华理工大学,2022.
CHEN X P. Study on the mechanical properties of artificially frozen cement to improve soil and its frost heave and sink characteristics[D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2022.

[19] 黄建华,严耿明,杨鹿鸣. 水泥改良土地层联络通道冻结温度场分析[J]. 土木工程学报,2021,54(5):108-116.
HUANG J H, YAN G M, YANG L M. Analysis of freezing temperature field in connecting passage of cement improved soil layer[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(5): 108-116.

[20] 黄建华,杨鹿鸣,王蕴晨. 水泥改良对地层冻结温度场影响分析[J]. 科学技术与工程,2020,20(27):11308-11314.
HUANG J H, YANG L M, WANG Y C. Influence of cement soil on stratum freezing temperature field[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(27): 11308-11314.

[21] 黄建华,杨鹿鸣,王蕴晨. 水泥改良土地层人工冻结温度场的特性[J]. 福建工程学院学报,2020,18(4):307-313.
HUANG J H, YANG L M, WANG Y C. Characteristics of artificial freezing temperature field in cement-soil layer[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2020, 18(4): 307-313.

[22] 王效宾,胡俊,居俊. 水泥改良土杯型冻土壁融化温度场三维数值模拟[J]. 煤田地质与勘探,2017,45(4):102-106,111.
WANG X B, HU J, JU J. 3D numerical simulation of melting temperature field of cement-improved soil cup-shaped frozen soil wall[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(4): 102-106, 111.

[23] 白青波. 附面层参数标定及冻土路基水热稳定数值模拟方法初探[D]. 北京:北京交通大学,2016.
BAI Q B. Determination of boundary layer parameters and a preliminary research on hydrothermal stability of subgrade in cold region[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.

(上接第183页)

[12] SHARIFI M, YOUNG M S, CHEN X Q, et al. Mechatronic design and development of a non-holonomic omnidirectional mobile robot for automation of primary production[J]. Cogent Engineering, 2016, 3(1): 1250431.

[13] LEE K, JUNG C, CHUNG W. Accurate calibration of kinematic parameters for two wheel differential mobile robots[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(6): 1603-1611.

[14] 彭高扬. 室内智能移动机器人底盘运动控制系统设计与实现[D]. 长沙:湖南大学,2021.
PENG G Y. Design and implementation of motion control system of indoor intelligent mobile robot[D]. Changsha: Hunan University, 2021.

[15] 赵明翰,周郁,赵桂军,等. 纵向双轮平衡车滑模控制设计与仿真[J]. 自动化技术与应用,2022,41(3):7-11,34.
ZHAO M H, ZHOU Y, ZHAO G J, et al. Design and simulation of sliding mode control for longitudinal two wheel balance vehicle[J]. Techniques of Automation and Applications, 2022, 41(3): 7-11, 34.

[16] DUTTA P, NAYAK S K. Grey wolf optimizer based PID controller for speed control of BLDC motor[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2021, 16(2): 955-961.

[17] 胡亚维. 基于单神经元PID的机械手移动路径智能控制方法[J]. 自动化技术与应用,2022,41(8):5-7,17.
HU Y W. Intelligent control method of manipulator movement path based on single neuron PID[J]. Techniques of Automation and Applications, 2022, 41(8): 5-7, 17.

[18] 詹长书,詹鸿飞,李志鹏,等. 基于模糊自适应PID控制的气动伺服系统位置控制[J]. 森林工程,2019,35(6):55-60.
ZHAN C S, ZHAN H F, LI Z P, et al. Position control of pneumatic servo system based on fuzzy adaptive PID control[J]. Forest Engineering, 2019, 35(6): 55-60.

[19] KANAGASINGHAM S, EKPANYAPONG M, CHAIHAN R. Integrating machine vision-based row guidance with GPS and compass-based routing to achieve autonomous navigation for a rice field weeding robot[J]. Precision Agriculture, 2020, 21(4): 831-855.

[20] 彭洋,黄青青,刘晋浩,等. 联合采育作业精确进料控制系统开发与测试[J]. 森林工程,2018,34(3):58-62.
PENG Y, HUANG Q Q, LIU J H, et al. Development and test of accurate feed control system for harvester combined operation[J]. Forest Engineering, 2018, 34(3): 58-62.

[21] BALAMURUGAN K, MAHALAKSHMI R. ANFIS-fractional order PID with inspired oppositional optimization based speed controller for brushless DC motor[J]. International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing, 2020, 18(1): 1941004.