

文章编号:1671-6833(2012)02-0081-05

# 高承压富含水层人工强制解冻温度场数值分析

陈成, 杨平, 张婷

(南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037)

**摘要:** 在含水层跨江跨海盾构隧道施工中, 盾尾刷破坏后如何更换是目前需要解决的关键问题. 结合杭州庆春路过江隧道盾尾刷更换工程, 利用 ADINA 大型有限元软件建立三维数值模型人工强制解冻温度场进行数值模拟, 研究了温度空间分布及温度随时间变化规律, 并对影响解冻温度场的因素进行敏感性分析. 通过数值模拟和现场原位实测的对比分析, 得出了强制解冻温度场的发展规律: 人工强制解冻的时间随着土体导热系数的增大而延长, 随土体容积热容量的增大而延长, 随着循环热水温度升高而缩短, 随着土体相变潜热的增大而延长, 缩短了承压含水层中封水更换盾尾刷后盾构机重新推进的时间.

**关键词:** 强制解冻; 承压含水层; 冻结壁; 温度场; 数值分析

**中图分类号:** TU 472.9 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2012.02.020

## 0 引言

盾构法长距离掘进中容易出现盾尾钢丝刷磨损锈蚀而失去其密封作用, 从而需要进行更换. 冻结法形式灵活, 适应复杂的地质条件, 加固体均匀完整<sup>[1-4]</sup>, 对环境影响小在盾尾刷更换中具有广阔的应用前景.

冻土自然解冻速度非常缓慢, 强制解冻能显著的加快冻土解冻速度. 人工强制解冻利用热水加热系统通过热水和冻土体的温度交换加快冻土体的解冻, 所需设备简单, 施工经济安全<sup>[5-9]</sup>. 笔者借助大型有限元软件 ADINA 建立人工强制解冻三维模型, 对杭州庆春路过江隧道更换盾尾刷人工强制解冻温度场进行计算分析.

## 1 工程概况

杭州庆春路钱塘江过江隧道采用大型泥水加压式盾构进行推进, 其中右线盾构段长 1765.72 m, 右线盾构隧道出现漏浆, 伴随油脂、同步注浆浆液和少量砂砾的泥浆被挤出. 分析原因系盾尾密封失效, 通过对盾尾密封系统进行检查分析, 决定采用更换并增加盾尾刷的措施进行处理, 以保证后续盾构的安全掘进.

盾构隧道上覆层深度 22.9 m 左右, 主要为粉、砂性土层, 受钱塘江冲刷作用, 呈现中间薄南北两侧略厚. 隧道掘进段主要为孔隙承压水, 赋存于下部⑦层、⑧层砂及圆砾、卵石层内, 实测承压水压力为 0.3 MPa, 为此采用液氮冻结进行盾尾密封加固, 其测温孔布置见图 1.

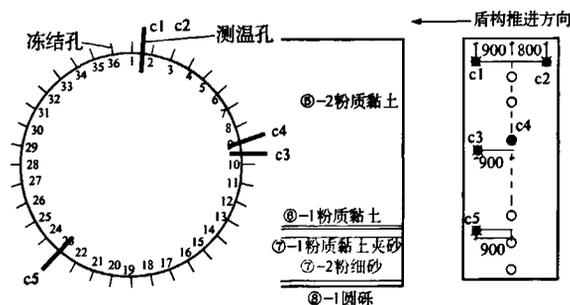


图 1 测温孔布置断面图

Fig. 1 Section and elevation of temperature measurement hole's laying

## 2 数值计算模型

### 2.1 几何模型

根据对称性, 3-D 模型取 1/4 杭州庆春路钱塘江过江隧道的实际尺寸进行计算. 根据受到冻结影响半径的范围为冻结圈布置半径的 5 倍原

收稿日期:2011-10-14; 修订日期:2011-12-25

基金项目:住房和城乡建设部科学技术项目(2009-K3-2);江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX09S\_015Z);南京地铁有限公司科研项目(2011年度).

通信作者:杨平(1964-),男,南京林业大学教授,博士生导师,主要从事岩土与地下工程研究工作, E-mail: yangping@njfu.edu.cn.

则,3-D模型取隧道管片一周厚度5 m的扇形土体,沿隧道走向取6 m(为3环管片宽度).管片厚度按实际尺寸取0.5 m厚度.实际工程中解冻热盘管采用内径为 $\phi 40 \times 4$ 的不锈钢管,解冻管共设5根,在冻结管中心布置1根,两侧分别布设3根和1根,相邻热盘管间距为0.3 m,但考虑到解冻热盘管的保温,模型中以原冻结孔为中心取宽度1.2 m厚0.1 m的环形加热区.几何模型如图2所示.

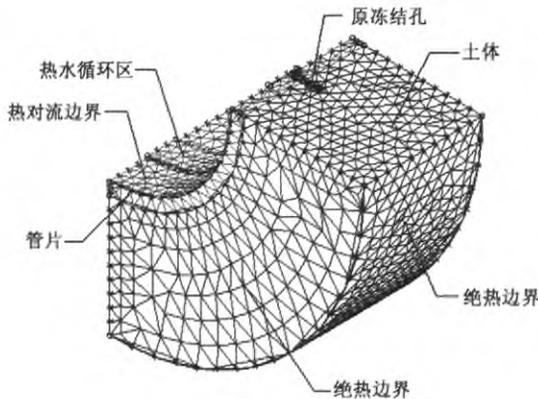


图2 几何模型

Fig.2 Geometric model

## 2.2 参数选择

在人工强制解冻温度场计算过程中,为了获取土体等材料的基本热物理参数,如土体的导热系数、容积热容量、相变潜热等,需要在现场取土在实验室中得出数据,本文有限元模型土体导热系数和容积热容量采用了杭州地区典型土层热物理参数的研究结果进行计算.

## 2.3 数学模型与边界条件

传热的基本形式有热传导、热对流和热辐射,液氮冻结土体的过程是非稳态的、没有内热源的过程,可以得出模型的三维导热方程为

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

式中: $\rho c \frac{\partial T}{\partial t}$ 为单位体积内能的增量; $\rho$ 为密度; $c$ 为比热; $T$ 为时间.强制解冻过程中,土层是各向异性的非均质体 $\rho$ 、 $c$ 、 $\lambda$ 都是变量,其数值随着土体中的水的相变而变化.

人工强制解冻温度场计算时主要施加的荷载为:

(1)隧道内空气与管片之间为散热边界,液氮解冻期间隧道内的环境温度基本维持在28℃左右,取该温度施加在管片内壁作为温度荷载,混凝土管片的导热系数取2.94 W/(m·℃),容积热容量取1 040 J/(kg·℃).

(2)土体及管片采用冻结期间的荷载作为解冻的初始荷载条件.

(3)解冻热盘管中热水循环温度取70℃作为解冻温度荷载.

## 2.4 土层参数选择

计算用土层参数为杭州地区典型土层热物理参数试验参数,详见表1

## 3 数值模拟计算结果与分析

### 3.1 数值模拟值与实测值比较

杭州庆春路过江隧道液氮冻结工程中,由于解冻时热水箱温度不是维持恒定不变的,且盾尾钢板的传热导致解冻实测相变时间比数值模拟的相变时间要短,现比较测温孔埋设位置的现场实测和数值模拟的解冻曲线,如图3所示,两者基本一致,数值模拟相变的时间较长,且拐点更加明显.主要是由于实际工程中存在着循环热水温度不恒定,土体不是均质的各向同性体,以及地下高承压水的不稳定性等因素.同时数值模拟中的参数取值并没有和冻结位置的土体参数完全吻合也是主要的影响因素.

表1 盾构穿越土层的主要热物理指标

Tab.1 The main physical and mechanical indicators of soil shield through

土层号	含水率 W/%	密度 $\rho$ / (kg·m <sup>-3</sup> )	导热系数 $\lambda$ /(W·m <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )		比热 $C$ /(J·kg <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )		潜热 $Q$ / (J·m <sup>-3</sup> )
			未冻土	冻土	未冻土	冻土	
⑤-1 粉质黏土	26	2 020	1.41	1.88	1 670	1 176	1.33E+8
⑥-1 粉质黏土	35.8	1 900	1.16	1.30	1 625	1 130	1.53E+8
⑦-1 粉质黏土夹砂	23.3	2 060	1.31	2.01	1 429	1 061	1.31E+8
⑦-2 粉细砂	21.1	2 070	1.49	2.23	1 570	1 050	1.23E+8
⑧-1 圆砾	26.4	1 980	—	—	—	—	—
砂管片	—	—	2.94	—	1 040	—	—

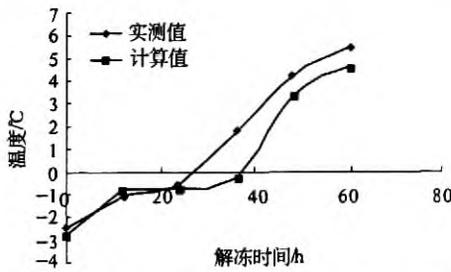


图 3 数值模拟与现场实测值对比分析曲线

Fig. 3 The numerical simulation and actual values contrast analysis curve

### 3.2 温度场随时间变化

沿盾构推进方向,在冻结管两侧各取距离冻结管中心 4.5,50 和 100 cm 3 个节点对管片与土体接触界面的温度进行分析,为研究各测点在冻土完全解冻过程中的温度变化规律,分别取总时间步长为 240 h 绘制其降温曲线如图 4.

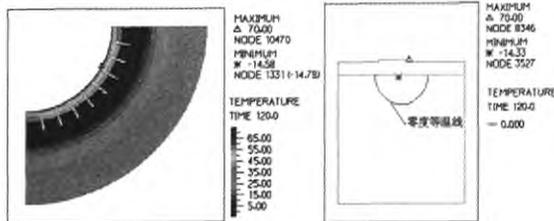


图 4 解冻 5 d 等温线云图

Fig. 4 Isotherms 5 days after thawing

图 5 可以得出人工强制解冻的温度变化主要分为 3 个阶段,第一个阶段为快速升温阶段,在轴面附近为 48 h,而在冻土壁边缘为 24 h,在这个阶段冻结区和降温区的温度随着对流边界和热水循环盘管的影响而上升.距离原冻结管中心 4.5 cm 处(轴面处)初始温度低,与解冻热水的温差大,升温空间大,解冻期间温度上升速率最快,表现在升温曲线前期的斜率较大,在 4 个时间步内的升温速率为 2.22 °C/h;距离冻结管中心 50 cm 处(即冻结壁边缘处)节点温度上升速率较快,但较之 4.5 cm 处曲线较平缓,在 2 个时间步内的升温速率为 0.137 °C/h;距离冻结管中心 100 cm 处因处于非冻结区,所以节点温度上升较慢,在 5 个时间步内的升温速率为 0.089 °C/h.第二个阶段为相变阶段,图中温度维持在 -1 °C 的平台位置,随着离轴面距离的增大,管片与土体接触面的相变阶段时间延长,4.5 cm 处 36 h,50 cm 处为 60 h;100 cm 处因初始温度处于未冻状态,不存在相变阶段.第三阶段为温度上升阶段,此阶段主要是依靠热水盘管吸收冻土体中的冷量来实现的.

图 6 给出了解冻时管片与土体接触面上不同位置的温度变化值,在冻结管中心两侧距离轴面越远温度越高.随着解冻时间的延长,各节点进入正温后温度继续升高,逐渐接近隧道的环境温度.图中左右两侧的温度上升值不一致,主要是因为靠近盾尾钢板前侧热水盘管布设为 3 根,提供热量较多;盾尾后方热水盘管只布设 1 根,热量相比较少.

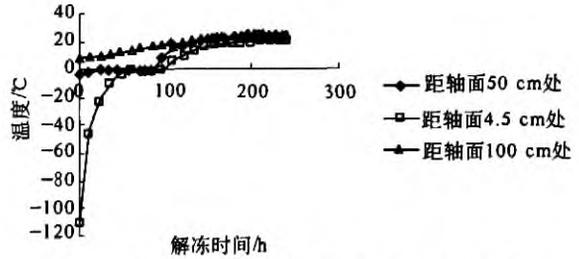


图 5 管片与土体接触界面温度 - 时间曲线

Fig. 5 Temperature-time curve between segment and soil contact interface permafrost

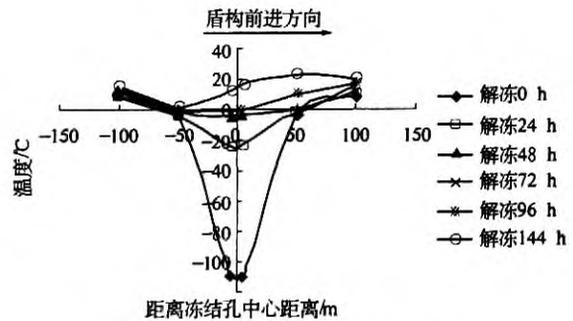


图 6 管片 - 土体接触面温度随距离变化曲线

Fig. 6 Temperature curve with distance changing between segment and soil contact interface

人工强制解冻目的是加速土体解冻,解冻温度场的变化是一个复杂的问题,受解冻管中热水温度的影响,同时也受管片导热性能的影响,自然解冻相对于人工强制解冻慢(见图 7).人工强制解冻 60 h 进入相变,相变历经 36 h;自然解冻 84 h 进入相变,相变历经 72 h.强制解冻大大缩短了解冻时间,有利于盾构机尽早继续推进.

## 4 温度场敏感性分析

### 4.1 导热系数对温度场的影响

导热系数对人工强制解冻的影响主要反映在相变发生时和正温阶段,相变时间随着导热系数的增大而延长,相变结束后正温阶段温度随着导热系数的减小而增大,这与土体中温度的变化是相反的.主要原因是,盾构机继续推进的前提条件

是土体与管片接触面的解冻,而土体导热系数越大,土体负温对管片与土体接触面上温度影响越大,因此相变需要时间越长,而相应的相变结束后接触面上需要吸收更多的热量来升高温度,而导热系数越大,土体负温对接触面的影响也就越大,升温的阻力也越大,因而接触面的温度越低.图8表现了随着导热系数的增大,解冻完成的时间相应延长,但导热系数增大至一定数值,解冻完成时间稳定不变.

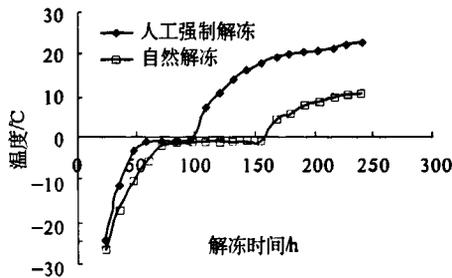


图7 强制解冻与自然解冻对比曲线  
Fig.7 Natural thawing and artificial thawing contrast analysis curve

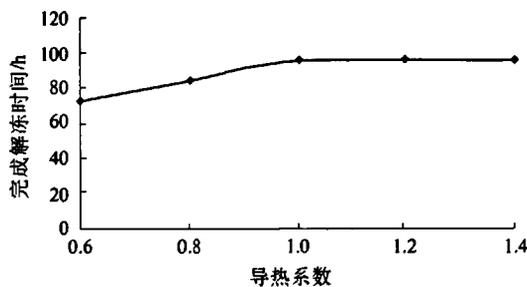


图8 解冻时间随导热系数变化曲线  
Fig.8 Coefficient of thermal conductivity time changing curve when thawing

#### 4.2 容积热容量对温度场的影响

在土体冻结的过程中,随着容积热容量增加,热量传递减慢,在解冻过程中,随着冻土体容积热容量的增大,土体的储冷性能随之提高,热量传递随之减缓.反映在相变过程中,随着冻土和融土容积热容量的增大,土体相变的时间延长,正温阶段的温度上升减缓,从而导致人工强制解冻的周期变长,如图9所示.

#### 4.3 循环热水温度对温度场的影响

图10反映了解冻完成时间随循环热水温度的变化曲线,随着循环热水的温度的提高,解冻完成时间明显缩短,在循环热水到达80℃以上时,对解冻时间的缩短影响已经不大,说明循环热水温度提高到一定数值,解冻完成时间趋于稳定.

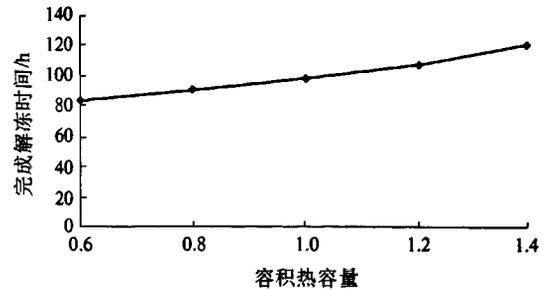


图9 解冻时间随容积热容量变化曲线  
Fig.9 Volumetric heat capacity time changing curve when thawing

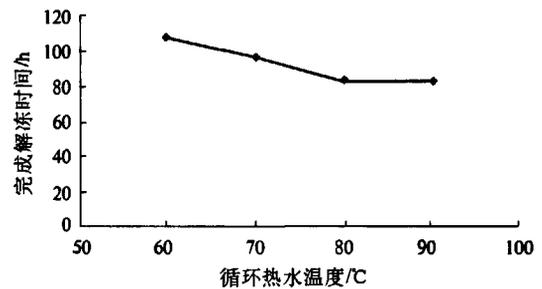


图10 解冻时间随循环热水温度变化曲线  
Fig.10 Circulation water temperature—time changing curve when thawing

#### 4.4 相变潜热对温度场的影响

土体的相变潜热越大,冻土体的相变时间就越长.图11中随着相变潜热的变化,相变过程的时间变化明显,当相变潜热增加时,相变过程的时间也相应延长,反之则缩短.相变潜热减小40%时,相变时间60h;相变潜热增加40%时,相变时间96h,说明相变潜热的改变对相变时间影响较明显,管片与土体接触界面的解冻时间与相变潜热近似呈线性关系.

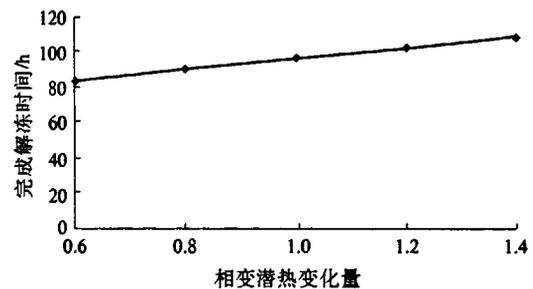


图11 解冻时间随相变潜热变化曲线  
Fig.11 Latent changing curve when thawing

### 5 结论

通过对杭州庆春路线塘江过江隧道盾尾刷更换工程的人强制解冻温度场有限元分析,主要获得以下几点结论:

(1)人工强制解冻较自然解冻大大缩短了时间,加速了盾构机的重新推进.

(2)数值模拟计算值和现场原位实测值进行了对比分析,验证了模型的适用性.

(3)土体导热系数在减小40%至增大20%范围内,强制解冻所需时间随土体导热系数的增大而延长.

(4)容积热容量在减小40%至增大40%范围内,强制解冻所需时间随土体容积热容量的增大而延长.

(5)循环热水温度在60℃~80℃范围内,强制解冻所需时间随循环热水温度升高而缩短.

(6)强制解冻的时间随土体相变潜热的增大而延长,且两者近似为线性关系.

#### 参考文献:

- [1] YANG Ping, KE Jie-ming, WANG Jing-ge, et al. Numerical simulation of frost heave with coupled water freezing, temperature and stress fields in tunnel excavation[J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33:6-7.
- [2] 夏江涛,杨平.盾构出洞水平冻结加固杯型冻土壁温度场数值分析[J].河南科技大学学报,2010,31(3):58-62.
- [3] 胡向东,程烨尔.盾构尾刷冻结法更换的温度场数值分析[J].岩土力学与工程学报,2009,28(S2):3516-3525.
- [4] 陈成,杨平.高承压含水层中更换盾尾刷长距离液氮冻结技术与应用[J].施工技术,2010(4):74-76.
- [5] 邱凡.人工冻土强制解冻基本理论和技术研究[D].上海:同济大学土木工程学院,2007.
- [6] 仇培云,岳丰田.冻结加固工程强制解冻融沉注浆施工技术[J].施工技术,2007,36(8):22-25.
- [7] 王涛,岳丰田,姜耀东,等.井筒冻结壁强制解冻技术的研究与实践[J].煤炭学报,2010,35(6):918-922.
- [8] 袁云辉.盾构进出洞水平冻结冻土帷幕解冻方式及解冻规律研究[D].南京:南京林业大学土木工程学院,2010.
- [9] 杨平,袁云辉,余才高,等.南京地铁集庆门盾构隧道进洞端头人工冻结法加固温度实测[J].解放军理工大学学报,2009,10(6):591-596.

## Numerical Analysis of Artificial Thawing Temperature Field in High-confined Aquifer Reinforcement

CHEN Cheng, YANG Ping, ZHANG Ting

(School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** Liquefied nitrogen freezing replacement shield brushes tail in China is the first application in shield tunnel excavation. With Qingchun Road cross-river tunnel of Hangzhou as an example, this paper applies ADINA finite element calculation software to compute thermal field for artificial thawing 3-D model, studies thermal spatial distribution and the variation laws of temperature with time, and makes the sensitivity analysis for influence factors of thawing temperature field. Through the contrast analysis of numerical simulation and field measurement, we get the development regularity of artificial thawing temperature field; artificial thawing time is longer with the increase of thermal conductivity and the increase of heat capacity; the higher the circulation hot water temperature is, the shorter the time of thawing is shorter; artificial thawing time is longer with the increase of latent; which solves the problem of shield brushes tail replacement in high-confined aquifer.

**Key words:** artificial thawing; confined aquifer; frozen soil wall; temperature field; numerical analysis