

# 渗流条件下水下人工冻结装置温度场发展规律分析

薛翔<sup>123</sup> 苏家驹<sup>12</sup>

(1 海南省海洋地质资源与环境重点实验室 海南海口 570100; 2 海南省生态环境地质调查院 海南海口 570100; 3 三亚水文地质工程地质勘察院 海南三亚 572000)

**摘要:** 本文运用 COMSOL 有限元软件建立三维瞬态模型, 探究渗流条件下人工冻结装置冻结管排布方式对温度场的影响, 研究结果表明: 由于渗流作用的影响, 冻结过程中上游冻土帷幕发展受到抑制, 下游冻土帷幕范围发展受到促进, 最终导致冻结装置形成的冻土帷幕呈现不对称; 对比两种冻结管排布方案温度发展图发现, 改变冻结管长度会影响竖向冻土帷幕发展的深度; 当对横向冻结范围有要求对冻结深度无要求时, 可适当缩短冻结管的长度来达到节能的目的; 当对冻结深度有要求是, 需要保证冻结管长度与要求深度一致。

**关键词:** 人工冻结; 渗流场; 温度场; 数值模拟

## 1 前言

人工冻结技术是在 19 世纪 60 年代由一位德国工程师提出, 最初被运用于开采煤矿的矿井开挖中<sup>[1][2]</sup>。由于它具有安全、灵活、高效等优点, 在国内外被广泛应用并积累了大量经验<sup>[3-9]</sup>。然而前人的研究并没有考虑地下水渗流作用的影响, 国内外许多学者研究发现, 地下水渗流作用对冻结温度场的影响是不容忽视的。因此本文运用 COMSOL 有限元软件中的水热耦合模块, 将温度场和渗流场耦合, 建立三维瞬态模型对人工冻结装置在渗流状态下温度场的发展进行模拟。

## 2 数值模型的构建

### 2.1 几何建模

根据施工经验选模型尺寸确定为: X 为长度, Y 为宽度, Z 为高度, 分别取 20 m, 20 m, 10 m。冻结管半径取 0.09 m, 长度取 4 m, 为了提高数值模型计算结果的准确性, 采用三角形网格划分, 曲率因子为 0.6, 提高模型的收敛性, 几何模型如图 1。依据前人的研究经验, 运用 COMSOL 有限元软件水热耦合模块对冻结温度场进行分析是具有可行性的, 如陈璐<sup>[6]</sup>对渗流条件下盾尾刷更换不同冻结加固方案温度场演变规律进行研究, 模拟结果与实测数据较为吻合, 能够比较真实的反应实际工程结果。

### 2.2 基本假定<sup>[7]</sup>

- (1) 假设砂土层初始温度是 18℃, 砂土为均质连续多孔介质土体, 砂土颗粒与地下水温度一致;
- (2) 假设水渗流过程单向且均匀, 冻结过程无能量损失, 假设冻结区域不向外传递能量;
- (3) 假设盐水温度为冻结管外壁温度一致, 忽略盐水对换热热造成的热量损失;
- (4) 假设冻结区域范围内渗流场符合达西定律, 土体冻结后渗流速度接近于零;
- (5) 忽略应力场对温度场的影响, 冻结过程仅考虑温度场和渗流场的耦合作用;
- (6) 假定温度将为 -1℃ 时开始形成冻土帷幕, -10℃ 的冻土帷幕符合施工要求。

### 2.3 初始条件和边界条件

#### 2.3.1 初始条件

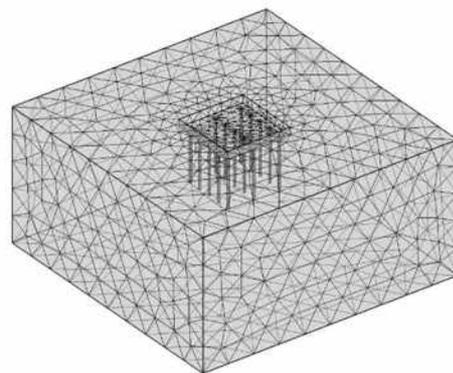


图 1 几何模型

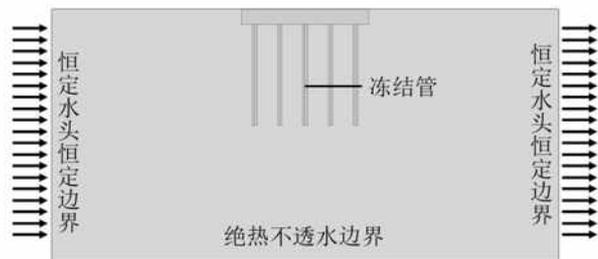


图 2 边界条件

假设水的温度为 18℃, 数值模拟时多孔介质温度设置为 18℃。多孔介质中渗流速度与水流速的关系为:

$$v = nV$$

式中  $v$  为渗流速度, 单位为 m/s;  $n$  为孔隙率;  $V$  为水的流速, 单位为 m/s。

渗流速度与水头差的关系为:

$$\Delta H = \frac{\Delta l * v}{K}$$

式中  $\Delta H$  为水头差, 单位为 m;  $K$  为渗透系数, 单位为 m/s;  $\Delta l$  为水流路劲, 单位为 m。

本文假设初始水头差为 5 m, 依据公式 12 计算得出渗流速度为  $9.55 \times 10^{-5}$  m/d。

#### 2.3.2 边界条件

水头上游设置为 XY(Y=20), 水头下游设置为 XY(Y=0), 假定为

恒定水头；其余四个面设置为绝热不透水边界。如图 2 所示。

#### 2.4 参数选取

根据相关资料<sup>[8]</sup>查得物理参数：水、冰、未冻土、冻土的密度分别为 1000、917、1920、1895Kg/m<sup>3</sup>，导热系数分别为 0.63、2.31、1.72、1.96W/(m·K)，比热分别为 4180、2050、1690、1690J/(kg·K)；未冻土、冻土的渗透系数分别为  $1.91 \times [10]^{-4}$ 、 $1.16 \times [10]^{-3}$  m/s。

在冻结过程中，砂土的物理性质会随着温度的变化发生变化，结冰前后导热系数、比热等数值会产生差异，为了使模拟结果更加接近真实工况，选用分段函数进行参数设置。假设 -30℃ ~ -1℃ 砂土冻结，-1℃ ~ 30℃ 砂土未冻结。假设砂土温度达到 -1℃ 时渗透系数取  $1.16 \times 10^{-3}$  m/s。盐水降温计划通过插入函数表示<sup>[9]</sup>，冻结 40 天，时间步长为 24h。如表 1。

表 1 盐水降温计划

时间/d	0	1	5	10	15	20	30	40
温度/℃	18	0	-20	-25	-28	-28	-28	-28

#### 3 计算结果分析

为了探究冻结管排布方式对人工冻结装置冻结效果的影响，本文建立两种冻结管排布方式不同的数值模型，通过对比温度场发展云图和观测点降温情况得出两种方案的冻结效果，从而可以优化模型结构。

##### 3.1 方案

人工冻结板尺寸为 5 m × 5 m × 0.6 m，冻结管排布方案见图 3。

方案一：底部沿着渗流方向布置 5 排冻结管，间距为 1m；垂直于冻结管布置 3 排冻结管，间距为 2m，所有冻结管长度均为 4 m。

方案二：底部沿着渗流方向布置 5 排冻结管，间距为 1m；其中第二排、第四排冻结管长度为 3 m，其余冻结管长度为 4 m；垂直于冻结管布置 3 排冻结管，间距为 2m。

经过 40 天积极冻结，温度场发展如图 4 所示。从温度场发展云图可以观察到，方案一：由于渗流作用的影响，上游区域冻土帷幕的发展受到抑制，下游冻土帷幕发展好于上游，冻土帷幕发展不对称；上游区域 -1℃ 和 -10℃ 等温线之间的距离远小于下游区域；另外可以观察到冻结管横向冻结效果好于纵向，原因有两个，其一是渗流作用促进下游冻结温度场的发展；其二是冻结管横向导热能力优于纵向导热能力。方案二：此种冻结管排布方式温度场发展与方案一类似，都表现为上游温度场受渗流抑制，下游温度场发展良好；水平方向上 -1℃ 和 -10℃ 等温线与方案一几乎相同；竖直方向上较短冻结管处 -10℃ 与 -1℃ 等温线出现了较大的偏差，并且上游区域比下游区域严重。

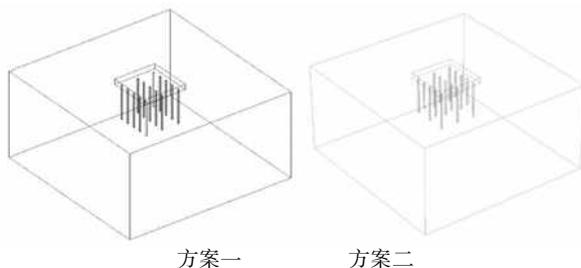


图 3 方案

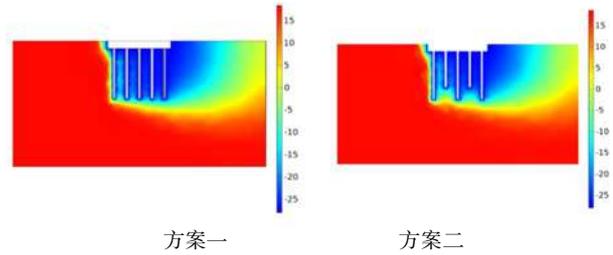


图 4 温度发展图

#### 4 结语

本文运用有限元软件 COMSOL 中的水热耦合模块，对渗流条件下冻结装置对冻结温度场的影响规律进行探究，并通过改变冻结管排布方式探究其对温度场发展规律的影响，得出以下结论：

1. 由于渗流作用的影响，冻结过程中上游冻土帷幕发展受到抑制，下游冻土帷幕范围发展受到促进，最终导致冻结装置形成的冻土帷幕呈现不对称；
2. 对比两种冻结管排布方案温度发展图发现，改变冻结管长度会影响竖向冻土帷幕发展的深度；
3. 当对横向冻结范围有要求对冻结深度无要求时，可适当缩短冻结管的长度来达到节能的目的；当对冻结深度有要求是，需要保证冻结管长度与要求深度一致。

#### 参考文献

- [1]程桦. 深厚冲积层冻结法凿井理论与技术[M]. 北京: 科学技术出版社, 2016.
  - [2]程桦, 姚直书, 荣传新. 我国深厚冲积层冻结法凿井技术新发展[C]// 矿山建设工程技术新进展——2008 全国矿山建设学术会议文集(上), 2008:57-63.
  - [3]奚家米. 深厚富水软岩井筒冻结壁力学特性及应用研究[D]. 西安科技大学, 2011.
  - [4]Peter J. Helmut H. Use of artificial ground freezing in three sections of the Dusseldorf subway[A]. Ground Freezing. Proc 7ISGF, 1994.
  - [5]Walis S. Freezing under the sea rescues Oslo fjord highway tunnel[J]. Tunnel, 1999, 8: 19-26
  - [6]陈璐. 渗流作用下盾尾刷更换不同冻结加固方案温度场演变规律研究[D]. 海南大学, 2022. DOI:10.27073/d.cnki.ghadu.2022.000561.
  - [7]任继勋, 佳琳, 阳建新, 胡俊, 林小淇, 曾东灵. 渗流条件下地下水含盐量对基坑坑底冻结温度场影响的数值模拟[J/OL]. 长江科学院院报 :1-11. http://kns.cnki.net/kcms/detail/42. 1171.TV.20230427. 1344.008.html
  - [8]胡俊, 詹旺宇, 蔡兵华, 李忠超, 陈健. 琼州海峡隧道盾构对接冻土帷幕温度场数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(02):629-636.
- 基金项目: 海南省自然科学基金青年基金项目 (421QN0964)
- 第一作者简介: 薛翔(1990), 山西省临猗县, 硕士研究生, 研究方向为岩土体稳定及水下冻结技术
- 通讯作者简介: 苏家驹(1979), 广东化州, 大学本科, 研究方向为建筑工程检测与水下冻结技术