

DOI: 10.11779/CJGE20220700

单圈孔矩形布置的大断面冻结稳态温度场解析解

洪泽群¹, 石荣剑¹, 岳丰田¹, 韩磊²

(1. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 温度场是人工冻结理论的重要研究方向, 也是评估冻结壁力学状态和封水性能的基础。对于周圈封闭布管形式的温度场, 目前仅有规则环形条件下的解析解, 包括单圈布置和双圈布置。但实际冻结工程中冻结管矩形布置也十分常见, 特别是地铁车站冻结暗挖工程, 其温度场尚无解答。根据冻结管矩形和环形布置的几何一致性, 基于4根冻结管模型首先提出了矩形布管问题的“以圆代方”求解方法。进而结合稳态导热控制方程的边界可分离特性和势函数叠加原理, 求解了8根管矩形布置和多根管广义矩形布置的温度场解析解。通过对比瞬态数值计算结果和模型试验结果, 验证了解析求解方法的正确性和解析解的适用性。结果表明, 矩形布管的温度场等值线在靠近冻结管管径处显示出高度的矩形分布特征, 随着计算点远离冻结圈, 等温线逐渐向圆形转化。矩形冻结壁内侧发展速度大于外侧, 内外0℃线内温度场受矩形布管影响显著, 在冻结设计时应合理考虑冻结管布置形状对冻结壁几何特征的影响。

关键词: 地层冻结; 矩形布管; 温度场; 解析解; 数值模拟; 模型试验

中图分类号: TU445; TK124

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)08-1653-11

作者简介: 洪泽群(1992—), 男, 工学博士, 讲师, 主要从事人工地层冻结法与隧道地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: zqhong@cumt.edu.cn。

Analytical solutions of steady-state temperature field for large-section freezing with rectangular layout of single-ring holes

HONG Zequn¹, SHI Rongjian¹, YUE Fengtian¹, HAN Lei²

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The temperature field is the basis for assessing the mechanical state and water-sealing performance of the frozen wall, which is an important research direction of the artificial freezing theory. For the freezing pipes in the form of a closed circumferential arrangement, there are only analytical solutions under regular annular conditions, including single-circle and double-circle models. However, the rectangular arrangement of freezing pipes is also very common in practical projects, especially for the subway station projects that use frozen concealed excavation, and the temperature field has not yet been answered. According to the geometric consistency of rectangular and annular layouts, based on the four-pipe model, a method of "replacing squares with circles" is firstly proposed for the rectangular problem. Furthermore, considering the boundary separable properties of the steady-state heat conduction control equation and the superposition principle of potential functions, the analytical solutions of the temperature field for rectangular arrangement with eight pipes and the generalized rectangular arrangement with multiple pipes are solved. By comparing with the transient numerical results the model test ones, the correctness and the applicability of the analytical solutions are verified. The results show that the temperature field exhibits a highly rectangular distribution characteristic near the pipe layout line, and the isotherm gradually transforms to a circular shape as it moves away from the freezing pipes. The inner side of the rectangular freezing wall develops faster than the outer side, and the temperature field inside and outside the 0℃ line is significantly affected. The influences of the freezing pipe arrangement on the geometric characteristics of the freezing wall should be reasonably considered in the design of freezing scheme.

Key words: ground freezing; rectangular pipe layout; temperature field; analytical solution; numerical simulation; model test

0 引言

人工冻结作为一种地层加固方法, 通过在拟建地下空间周围布置冻结管, 利用人工制冷技术在地层中

形成连续封闭的冻土帷幕后, 再进行后续土体开挖施

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108386)

收稿日期: 2022-06-01

工。由于所形成的冻土帷幕具有良好的力学性能和隔绝地下水的功能,在富水软土地层中能够充分发挥其优越性,除传统的煤矿凿井工程以外,目前已广泛应用于市政地下工程之中,如盾构进出洞、隧道联络通道、基坑支护等^[1]。

作为冻结工程的承载和挡水结构,冻土帷幕的力学强度、厚度和平均温度等关键设计指标都与其温度分布息息相关,因此冻结温度场也一直是冻结法的重要研究内容。纵观所有温度场的影响因素,除了盐水温度、地层导热系数、结冰温度等涉及材料本身热物理性质的参数外,冻结管布置形式的影响更为显著^[2]。实际工程中综合考虑断面形状、工程特点和施工场地条件等因素,往往具有不同的冻结管布置方案。已有研究对局部少量管冻结、直线排管冻结和环形圈管冻结的温度场进行了系统分析,从最早前苏联的经典单管冻结和单排管冻结问题^[3-4],发展到近年来的多排管、多圈管冻结问题^[5-8],国内外学者通过理论计算和模型试验等方法获得了考虑冻结管壁温度^[9]、冻结管偏斜^[10]、地下水渗流等不同工况条件下的冻结温度分布和发展规律^[12-15],并以温度场理论为基础开展了冻胀预测与控制方面的研究^[16-18]。

与此同时,实际工程中冻结管矩形布置形式一直以来也十分常见,无论是在含水砂砾地层的煤矿斜井工程^[19]、地铁基坑盆形冻结止水工程^[20-21]或是车站附属结构施工^[22]等,均有矩形断面冻结方案的应用报道。近年来,随着城市地下工程建设条件的越发复杂,以地铁车站暗挖、穿越既有线路为代表的矩形大断面冻结工程案例进一步增多,如广州地铁6号线下穿3号线冻结加固工程、上海地铁14号线下穿大连路隧道冻结暗挖工程及国内首个大断面冻结暗挖车站—18号线江浦路站等。考虑隧道断面规划限制及矩形断面本身在提高地下空间利用率等方面的优越性,矩形冻结暗挖在地下工程中的应用越来越多。然而,由于冻结管矩形布置的几何形式在数学处理上存在困难,对于其温度场研究目前还停留在室内试验和现场实测阶段,仍缺乏理论解,特别是针对大断面矩形冻结存在内外冻土边界的问题,目前温度场理论成果依然难以满足实际工程的应用需求。本文以此为背景,从矩形布管的几何特征出发,结合导热微分方程的边界分离特性和解的叠加性质,创新性的采用“以圆代方”求解方法,尝试给出了存在内外边界条件下4根管矩形布置、8根管矩形布置以及广义矩形布置的温度场解析解,并通过数值模拟和模型试验进行了对比验证,获得了大断面矩形布管条件下冻结温度场的分布特征,以期与实际工程设计与施工提供参考。

1 矩形布管的几何模型及数学描述

1.1 几何模型

如图1所示,最基本的矩形布管模型至少应包含4根冻结管 $P_1(x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$, $P_3(x_3, y_3)$, $P_4(x_4, y_4)$ 。以4根冻结管所形成矩形的中点为原点建立平面直角坐标系,并使得 x 轴平行于矩形的两条边,则有 $x_1=x_4$, $x_2=x_3$, $y_1=y_2$, $y_3=y_4$ 。参考常见冻结工况条件,这里假设所有冻结管半径相等,均为 r_0 ;各冻结管管壁温度不相等,分别假设为 T_{f1} , T_{f2} , T_{f3} , T_{f4} 。同时,对于大断面矩形冻结工程,冻结管矩形布置的边长相对较大,冻结壁内部经常存在部分未冻结区域,这也被称作内部未冻实问题。在几何模型中分别选取点 $M_1(R', \theta')$ 和点 $M_2(R'', \theta'')$ 作为冻土帷幕内外边界的控制点。

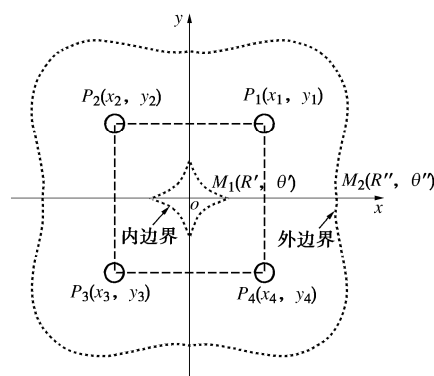


图1 4根冻结管矩形布置冻结模型

Fig. 1 Model for rectangular arrangement with four pipes

1.2 热传导问题的数学描述

对于稳态导热而言,结合傅里叶传热定律和热力学第二定律很容易获得温度场控制方程为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} = 0 \quad (1)$$

式中: $T(x, y)$ 为降温区域内温度函数; r 和 θ 分别为极径和极角。

对于图1所示的矩形布管模型,温度场边界条件包括冻结管管壁温度边界和冻土帷幕温度边界两类边界条件。由于冻结管截面尺寸相对于所求解的温度场计算区域很小,可以近似在圆形冻结管壁上任取一点作为替代,这里取原点至相应冻结管圆心延长线 with 外侧冻结管壁的交点。则上述两类边界条件可以描述为

①冻结管壁温度边界:

$$T(R_i + r_0, \theta_i) = T_{fi} \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

②冻土帷幕温度边界:

$$\left. \begin{array}{l} \text{内侧: } T(R', \theta') = T_0 \\ \text{外侧: } T(R'', \theta'') = T_0 \end{array} \right\} \quad (3)$$

式中: T_0 为土体的结冰温度; R_i 和 θ_i 分别为极坐标系

下各冻结管圆心的极径和极角。

控制方程(1)及边界条件(2),(3)一起构成了图1所示冻结模型稳态温度场的定解问题,求解该问题即可获得待求矩形布管温度场解析解,这也是本文的研究目标。

2 矩形布管温度场解析解

2.1 4根冻结管矩形布置

因冻结管边界和冻土帷幕边界条件的几何复杂性,特别是角部冻结管处矩形边界偏导的不连续,使得直接求解上述微分方程非常困难。但观察图1几何模型还可以发现,在所选坐标系下,各冻结管到原点的距离均相等,即冻结管坐标 $P_i(R_i, \theta_i)$ 的极径 R_i 相等。这说明对于最简单的4根冻结管矩形布置模型,又可以看作同一圆环上布置的4根冻结管。特别地,当所成的矩形为正方形时,又等价于4根冻结管单圈等间距布置在圆环上,如图2所示。

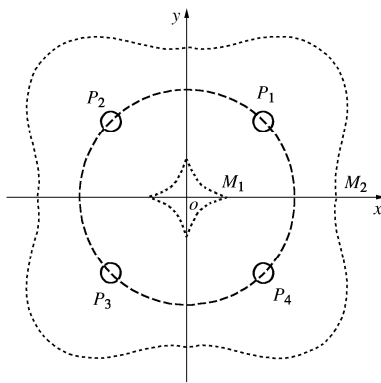


图2 4根冻结管单圈环形布置求解模型

Fig. 2 Circular solution model for four pipes

利用环形单圈管冻结稳态温度场一般解析解^[6],考虑冻结管相对原点的环向旋转角度,可以得到图1冻结模型的稳态温度场解析表达式为

$$T = T_M \left(M + \frac{2 \ln \frac{R_i^2}{R' R''} \ln \frac{R}{R_i} - 4 \ln \frac{R_i}{R'} \ln \frac{R''}{R_i}}{\ln R'' - \ln R'} \right) + T_0, \quad (4)$$

其中,

$$T_M = \frac{T_f - T_0}{\ln \frac{4r_0}{R_i} - \frac{4(\ln R_i - \ln R')(\ln R'' - \ln R_i)}{(\ln R'' - \ln R')}} ,$$

$$M = \frac{1}{2} \ln \left[\left(\frac{R}{R_i} \right)^4 + \left(\frac{R_i}{R} \right)^4 - 2 \cos(4\theta - \pi) \right] .$$

由于该解析解推导过程中冻土帷幕边界控制点要求在经过原点的主面上,所以式(4)推导过程中,图2中内外冻结壁控制点 M_1 和 M_2 坐标的极角均取 $\pi/4$ 。

2.2 8根冻结管矩形布置

从上述4根冻结管问题的求解过程来看,作为矩形布管的基础模型,其表现出的矩形特征并不十分明显。考虑实际工程中常见冻结管矩形分布状态,本节将对矩形边界上布置多根冻结管进行求解,在4根冻结管的基础上研究8根冻结管布置在矩形边界上的问题。

如图3所示,8根冻结管 $P_1(r_1, \theta_1) \sim P_8(r_8, \theta_8)$ 按照每条边3根冻结管等间距布置在矩形边界上。以矩形对角线交点为坐标原点,以经过 P_1 冻结管圆心为 x 轴建立直角坐标系。同样,仍需要选择冻土帷幕内外边界控制点 $M_1(R', \theta')$ 和点 $M_2(R'', \theta'')$ 。

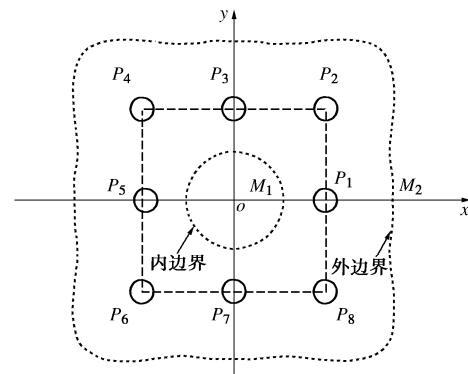


图3 8根冻结管矩形布置冻结模型

Fig. 3 Model for rectangular arrangement with eight pipes

参考4根管矩形布置“以圆代方”的求解方法,对8根管矩形布置冻结模型进行转化,如图4所示。按照各冻结管至坐标原点的距离进行划分,可以将8根冻结管分为两圈,内圈由冻结管 P_1 、 P_3 、 P_5 、 P_7 组成,布置半径为 R_1 ,冻结管壁温度为 T_{f1} ;外圈由冻结管 P_2 、 P_4 、 P_6 、 P_8 组成,布置半径为 R_2 ,冻结管壁温度为 T_{f2} ,外圈相对于内圈在圆周上逆时针错位角度为 $\pi/4$ 。这样,求解8根管矩形布置模型就转化为求解这一特殊的双圈管冻结模型。

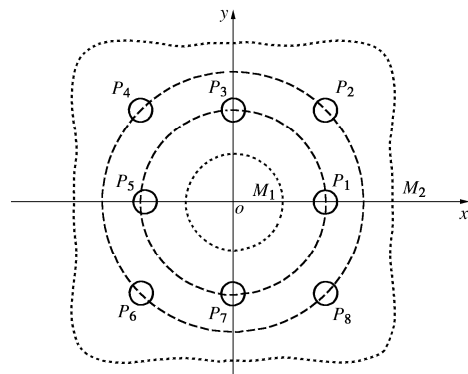


图4 8根冻结管双圈环形布置求解模型

Fig. 4 Circular solution model for eight pipes

假设所有冻结管半径相等均为 r_0 , 8 根冻结管管壁温度分别为 $T_{\text{f}} \sim T_{\text{f8}}$, 则图 4 冻结模型的数学表达可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} &= 0, \\ T\left(R_1 + r_0, \frac{\pi}{2}i\right) &= T_{\text{f}} \quad (i=0,1,2,3) \quad (\text{内圈冻结管}), \\ T\left(R_2 + r_0, \frac{\pi}{2}j + \frac{\pi}{4}\right) &= T_{\text{f2}} \quad (j=0,1,2,3) \quad (\text{外圈冻结管}), \\ T(R', \theta') &= 0 \quad (\text{内侧冻土帷幕控制点}), \\ T(R'', \theta'') &= 0 \quad (\text{外侧冻土帷幕控制点}). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

对于式 (5), 若采用复变函数中保角变换的方法, 将其映射至相平面内的直线双排管模型, 固然可以进行求解^[7], 但由于映射函数选取的复杂性, 当冻结管圈数增多时将难以获得解答, 无法适用于矩形边界上布置有更多冻结管的情形。

观察到稳态热传导控制方程 (1) 实际上为拉普拉斯方程的极坐标形式, 而拉普拉斯方程的解满足线性叠加原理, 故可以引入边界分离方法, 将图 4 中的双圈冻结模型分解为两个较简单的模型:

模型一,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_1}{\partial \theta^2} &= 0, \\ T_1\left(R_1 + r_0, \frac{\pi}{2}i\right) &= T_{\text{f}} - T_{\text{a}}, \\ T_1\left(R_2 + r_0, \frac{\pi}{2}j + \frac{\pi}{4}\right) &= T_{\text{b}}, \\ T_1(R', \theta') &= 0, \\ T_1(R'', \theta'') &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

模型二,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_2}{\partial \theta^2} &= 0, \\ T_2\left(R_1 + r_0, \frac{\pi}{2}i\right) &= T_{\text{a}}, \\ T_2\left(R_2 + r_0, \frac{\pi}{2}j + \frac{\pi}{4}\right) &= T_{\text{f2}} - T_{\text{b}}, \\ T_2(R', \theta') &= 0, \\ T_2(R'', \theta'') &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中, T_{a} 和 T_{b} 为新引入的待定系数。由模型一和模型二的边界条件可知, 这两个模型解的线性叠加即为满足式 (5) 边界条件的特解, 即 $T = T_1 + T_2$ 。

考察式 (6), 通过选择合适的参数 T_{b} , 总可以保证模型一表示以内圈冻结管为主的单圈管冻结问题。依据内圈冻结管壁温度条件 $T_{\text{f}} - T_{\text{a}}$ 和冻土内外边界条

件, 参考式 (4) 可以得到模型一温度场解的表达式为

$$T_1 = (T_{\text{f}} - T_{\text{a}}) \frac{P + \frac{2 \ln \frac{R_1^2}{R'R''} \ln \frac{R}{R_1} - 4 \ln \frac{R_1}{R'} \ln \frac{R''}{R_1}}{\ln \frac{4r_0}{R_1} - \frac{4(\ln R_1 - \ln R')(\ln R'' - \ln R_1)}}{\ln R'' - \ln R'} \quad (8)$$

$$\text{式中, } P = \frac{1}{2} \ln \left[\left(\frac{R}{R_1} \right)^4 + \left(\frac{R_1}{R} \right)^4 - 2 \cos 4\theta \right].$$

将式 (6) 中外圈冻结管管壁温度边界条件 $T_1(R_2 + r_0, j\pi/2 + \pi/4) = T_{\text{b}}$ 代入式 (8) 得到

$$T_{\text{b}} = (T_{\text{f}} - T_{\text{a}}) A \quad (9)$$

其中,

$$A = \frac{\frac{1}{2} \ln \left[\left(\frac{R_2}{R_1} \right)^4 + \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^4 + 2 \right] + \frac{2 \ln \frac{R_1^2}{R'R''} \ln \frac{R_2}{R_1} - 4 \ln \frac{R_1}{R'} \ln \frac{R''}{R_1}}{\ln R'' - \ln R'}}{\ln \frac{4r_0}{R_1} - \frac{4(\ln R_1 - \ln R')(\ln R'' - \ln R_1)}}{\ln R'' - \ln R'}.$$

同理, 选择合适的 T_{a} , 式 (7) 模型二将变成以外圈冻结管为主的单圈冻结模型。考虑外圈冻结管管壁温度 $T_{\text{f2}} - T_{\text{b}}$ 和冻土内外边界条件, 可以获得模型二的解的表达式为

$$T_2 = (T_{\text{f2}} - T_{\text{b}}) \frac{Q + \frac{2 \ln \frac{R_2^2}{R'R''} \ln \frac{R}{R_2} - 4 \ln \frac{R_2}{R'} \ln \frac{R''}{R_2}}{\ln \frac{4r_0}{R_2} - \frac{4(\ln R_2 - \ln R')(\ln R'' - \ln R_2)}}{\ln R'' - \ln R'} \quad (10)$$

$$\text{其中, } Q = \frac{1}{2} \ln \left[\left(\frac{R}{R_2} \right)^4 + \left(\frac{R_2}{R} \right)^4 + 2 \cos 4\theta \right].$$

将式 (7) 中内圈冻结管管壁温度边界条件 $T_2(R_1 + r_0, i\pi/2) = T_{\text{a}}$ 代入式 (10) 可以得到

$$T_{\text{b}} = (T_{\text{f}} - T_{\text{a}}) B \quad (11)$$

其中,

$$B = \frac{\frac{1}{2} \ln \left[\left(\frac{R_1}{R_2} \right)^4 + \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^4 + 2 \right] + \frac{2 \ln \frac{R_2^2}{R'R''} \ln \frac{R_1}{R_2} - 4 \ln \frac{R_2}{R'} \ln \frac{R''}{R_2}}{\ln R'' - \ln R'}}{\ln \frac{4r_0}{R_2} - \frac{4(\ln R_2 - \ln R')(\ln R'' - \ln R_2)}}{\ln R'' - \ln R'}.$$

通过联立式 (9), (11) 求解 T_{a} 和 T_{b} 两参数的方程组可以得到

$$T_{\text{a}} = \frac{ABT_{\text{f}} - BT_{\text{f2}}}{AB - 1}; \quad T_{\text{b}} = \frac{ABT_{\text{f2}} - AT_{\text{f}}}{AB - 1}.$$

将 T_{a} 和 T_{b} 分别代入相应的简单模型温度场解式 (8), (10), 再叠加即可获得待求模型式 (5) 的冻结温度场解析解为

$$\begin{aligned}
 T &= T_1 + T_2 \\
 &= \frac{BT_{f2} - T_{f1}}{AB - 1} \frac{P + \frac{2 \ln \frac{R_1^2}{R'R''} \ln \frac{R}{R_1} - 4 \ln \frac{R_1}{R'} \ln \frac{R''}{R_1}}{\ln \frac{4r_0}{R_1} - \frac{4(\ln R_1 - \ln R')(\ln R'' - \ln R_1)}{\ln R'' - \ln R'}} + \\
 &\quad \frac{AT_{f1} - T_{f2}}{AB - 1} \frac{Q + \frac{2 \ln \frac{R_2^2}{R'R''} \ln \frac{R}{R_2} - 4 \ln \frac{R_2}{R'} \ln \frac{R''}{R_2}}{\ln \frac{4r_0}{R_2} - \frac{4(\ln R_2 - \ln R')(\ln R'' - \ln R_2)}{\ln R'' - \ln R'}}.
 \end{aligned} \quad (12)$$

特别地, 实际冻结工程后期所有冻结管内盐水温度相差不大, 当 $T_{f1}=T_{f2}=T_f$, 且考虑土体结冰温度 T_0 (一般低于 0°C) 时, 式 (12) 将变为

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{(B-1)(T_f - T_0)}{AB - 1} \frac{P + \frac{2 \ln \frac{R_1^2}{R'R''} \ln \frac{R}{R_1} - 4 \ln \frac{R_1}{R'} \ln \frac{R''}{R_1}}{\ln \frac{4r_0}{R_1} - \frac{4(\ln R_1 - \ln R')(\ln R'' - \ln R_1)}{\ln R'' - \ln R'}} + \\
 &\quad \frac{(A-1)(T_f - T_0)}{AB - 1} \frac{Q + \frac{2 \ln \frac{R_2^2}{R'R''} \ln \frac{R}{R_2} - 4 \ln \frac{R_2}{R'} \ln \frac{R''}{R_2}}{\ln \frac{4r_0}{R_2} - \frac{4(\ln R_2 - \ln R')(\ln R'' - \ln R_2)}{\ln R'' - \ln R'}} + T_0.
 \end{aligned} \quad (13)$$

式 (13) 即为图 3 所示 8 根冻结管矩形布置形式的稳态冻结温度场解析解表达式。

2.3 多孔冻结管矩形布置

更一般的, 对于矩形边界上布置有更多冻结管的情形, 包含冻土内外边界的冻结模型示意如图 5 所示。

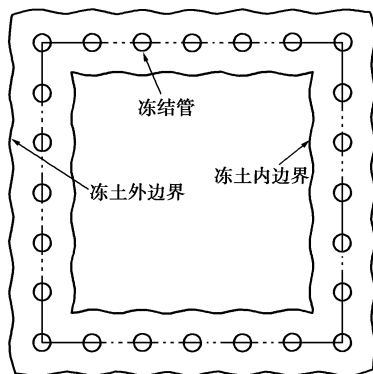


图 5 多孔冻结管矩形布置模型

Fig. 5 Rectangular layout model with multi-freezing pipes

以冻结管所在矩形中心为原点建立平面直角坐标系, 不失一般性地假设 x 轴和 y 轴分别经过一冻结管中心, 如图 6。记矩形上部边界上 x 轴负半轴上冻结管编号分别为 P_1, P_2, \dots, P_n , 则该 n 根冻结管圆心至原

点的距离均不相等, 分别记为 R_1, R_2, \dots, R_n 。

以原点 O 为圆心, 以 R_i 为半径作圆, 当 $i=1$ 或 $i=n$ 时, 均有 4 根冻结管等间距分布在圆周上; 当 $i \neq 1$ 且 $i \neq n$ 时, 圆周上有 $P_i, Q_i, M_i, N_i, P'_i, Q'_i, M'_i, N'_i$ 八根冻结管, 可以分成 P_i, Q_i, M_i, N_i 及 P'_i, Q'_i, M'_i, N'_i 两组, 每组也包含 4 根冻结管, 且在圆周上均匀分布。因此, 多根冻结管矩形布置模型可以转化为多组包含 4 根冻结管均匀分布的圆形布管模型的叠加。

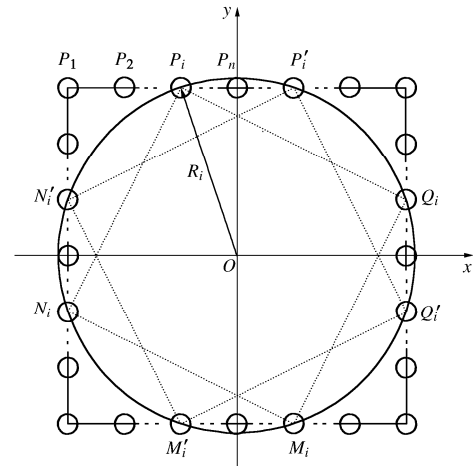


图 6 多孔冻结管矩形布置的环形求解模型

Fig. 6 Circular solution model for multi-freezing pipes

为描述方便, 假设相邻冻结管间距为 l , 冻结管所在矩形边长设为 a , 由几何关系知 $a=2(n-1)l$ 。同时, 正方形 $P_iQ_iM_iN_i$ 和 $P'_iQ'_iM'_iN'_i$ 的偏转角分别为

$$\left. \begin{aligned} \theta_i &= \angle xOQ_i = \arctan \frac{n-i}{n-1}, \\ \theta'_i &= \angle xOQ'_i = -\arctan \frac{n-i}{n-1}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

所在圆周的半径为

$$R_i = \sqrt{(n-i)^2 l^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2}. \quad (15)$$

根据 8 根管矩形布置的双圈叠加求解方法, 图 6 所示的广义矩形布管模型的温度场表达式应为 $2(n-1)$ 圈包含 4 根管圆形冻结模型温度场的叠加, 描述如下:

$$T(R, \theta) = \sum_{i=1}^n C_i T_i(R_i, \theta_i) + \sum_{i=2}^{n-1} C'_i T'_i(R_i, \theta'_i). \quad (16)$$

式中: C_i 和 C'_i 为待定系数; T_i (T'_i) 表示半径为 R_i , 错位角为 θ_i (θ'_i) 的第 i 圈 4 根冻结管分项温度场, 与式 (14) 相同,

$$T_i = T_M \left(M + \frac{2 \ln \frac{R_i^2}{R'R''} \ln \frac{R}{R_i} - 4 \ln \frac{R_i}{R'} \ln \frac{R''}{R_i}}{\ln \frac{R''}{R'}} \right) + T_0,$$

$$T_i' = T_M \left(M' + \frac{2 \ln \frac{R_i^2}{R'R''} \ln \frac{R}{R_i} - 4 \ln \frac{R_i}{R'} \ln \frac{R''}{R_i}}{\ln \frac{R''}{R'}} \right) + T_0。$$

其中,

$$M = \frac{1}{2} \ln \left[\left(\frac{R}{R_i} \right)^4 + \left(\frac{R_i}{R} \right)^4 - 2 \cos 4(\theta - \theta_i) \right] ,$$
$$M' = \frac{1}{2} \ln \left[\left(\frac{R}{R_i} \right)^4 + \left(\frac{R_i}{R} \right)^4 - 2 \cos 4(\theta - \theta_i') \right] 。$$

将式 (14), (15) 代入式 (16), 得到包含待定系数 $C_1 \sim C_n$, $C_2' \sim C_{n-1}'$ 以及冻土帷幕内半径 R' 和外半径 R'' 共计 $2n$ 个未知参数的方程组, 求解温度场的显式表达同样需要 $2n$ 个边界条件, 描述如下:

$$\left. \begin{aligned} T(R_i + r_0, \theta_i) &= T_{fi} \quad (i = 1, 2, 3, \cdots, n), \\ T(R_i + r_0, \theta_i') &= T_{fi}' \quad (i = 2, 3, 4, \cdots, n-1), \\ T(R_{M1}, \theta_{M1}) &= T_{M1}, \\ T(R_{M2}, \theta_{M2}) &= T_{M2}。 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中: T_{fi} 和 T_{fi}' 为冻结管壁温度, 可近似取为相同值, 均等于盐水温度; M_1 和 M_2 分别为冻土帷幕内外侧的温度监测点; T_{M1} 和 T_{M2} 为测点温度。

实际工程中结合现场温度监测, 式 (17) 的 $2n$ 个边界条件均为已知值, 代入式 (16) 即可获得不同时刻的矩形布管温度场分布表达式。需要指出的是, 本节矩形布孔准确来说属于标准正方形布孔, 对于实际冻结工程的断面为一般矩形特别是长方形时, “以圆代方” 的求解方法依然适用, 只需要将所叠加的等间距圈管模型替换为环向不等间距的圈管模型即可, 如本文后续 的模型试验部分, 这里不再赘述。

3 解析解的准确性验证

3.1 瞬态导热数值模拟

土体冻结过程实际上是包含冻结锋面移动的瞬态过程, 为了验证本文矩形冻结管布置温度场解析解的准确性, 采用瞬态导热数值模拟方法进行对比。以图 3 中 8 根冻结管矩形布置为例, 按照冻结工程常用的冻结参数进行计算, 选取冻结管半径 $r_0=0.054$ m, 相邻冻结管间距 $l=2$ m, 冻结管壁温度 $T_f=-30^{\circ}\text{C}$, 各冻结管位置参数如表 1 所示。土体热力学性质参数参照《长江口土层人工冻土力学性能试验报告》进行选取, 如表 2 所示^[24]。

数值模型中初始地温取 20°C , 冻结管坐标按照表 1 参数确定, 计算区域为半径 20 m 的圆域, 经试算该区域边界足够大, 几何边界不会对温度场发展产生影响。网格划分采用平面自由三角形网格, 冻结管矩形

位置进行加密处理, 如图 7 所示。选择冻结工程中特征时间节点 30 d 进行分析, 温度分布如图 8 所示。

表 1 冻结管坐标

Table 1 Coordinates of freezing pipes

编号	R/m	θ	$T_{fi}/^{\circ}\text{C}$
P_1	2	0	-30
P_2	2.83	$\pi/4$	-30
P_3	2	$\pi/2$	-30
P_4	2.83	$3\pi/4$	-30
P_5	2	π	-30
P_6	2.83	$5\pi/4$	-30
P_7	2	$3\pi/2$	-30
P_8	2.83	$7\pi/4$	-30

表 2 瞬态模拟土体热物理性质参数

Table 2 Thermal properties of soil adopted in transient simulation

参数	温度/ $^{\circ}\text{C}$	导热系数/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	比热/ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	焓值/ $(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3})$
冻土	-28	1.74	1870	1650	0
	-10				55714.4
	-4				115302.2
冰点	-2.1	1.74	1870	1650	199526.7
融土	18.0	1.42	1870	1650	247954.0

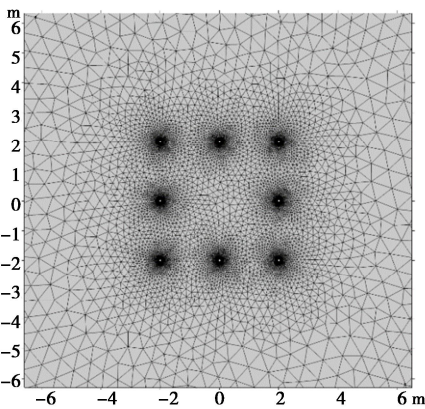


图 7 数值模型网格划分示意图

Fig. 7 Schematic diagram of numerical model meshing

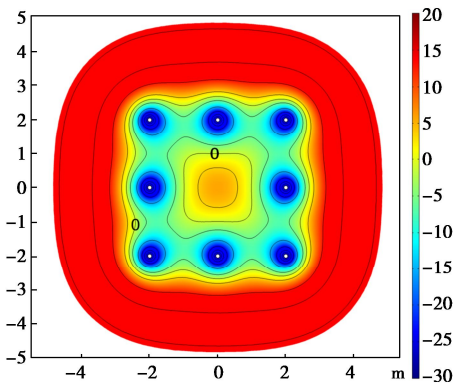


图 8 基于数值模拟的温度分布图

Fig. 8 Temperature distribution based on numerical simulation
为对比数值与解析结果, 根据矩形冻结管布置模

型的对称性, 选取两个特征截面的温度数据, 分别是极角为 0° 的截面 1 和极角为 45° 的截面 2, 特征截面位置示意如图 9 所示。

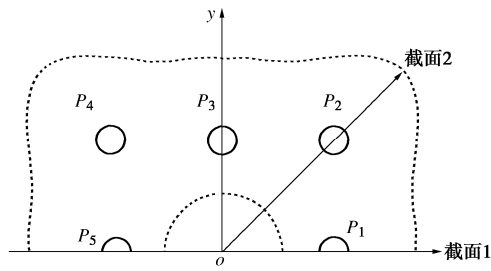


图 9 特征截面位置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of characteristic cross-sections

根据数值计算结果冻结第 30 天的温度数据, 在图 9 坐标系下, 截面 1 上内外侧温度为 0°C 的测点坐标分别为 $M_1(1.16, 0)$ 和 $M_2(2.67, 0)$, 也即矩形冻土侧壁内侧厚 0.84 m, 外侧厚 0.67 m。截面 2 上内外侧温度为 0°C 的测点坐标分别为 $M_1'(1.64, \pi/4)$ 和 $M_2'(3.41, \pi/4)$, 即矩形角部内侧冻结壁厚 1.18 m, 外侧厚 0.52 m, 均符合封闭布管的冻结壁发展规律。

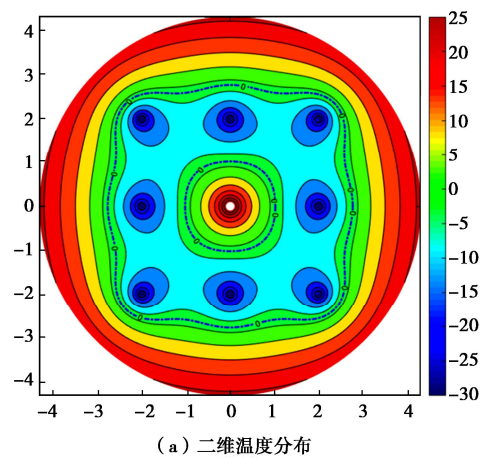
在解析计算中, 冻结管壁温度 T_f , 结冰温度 T_0 等冻结参数和数值模型相同, 冻结管坐标由表 1 知内圈布置半径 $R_1=2$ m, 外圈布置半径 $R_2=2\sqrt{2}$ m。对于截面 1, 将数值结果 M_1 和 M_2 的坐标和温度值代入 8 根管矩形布置温度场表达式 (13), 计算得冻结 30 d 的温度分布解析解为

$$T(R, \theta) = -4.47 + 5.23 \ln \left[\frac{1}{2^4} \left(\frac{R^4}{2^4} + \frac{2^4}{R^4} \right) - \frac{1}{2^3} \cos 4\theta \right] + 6.05 \ln \left[\frac{1}{2^4} \left(\frac{R^4}{2\sqrt{2}^4} + \frac{2\sqrt{2}^4}{R^4} \right) + \frac{1}{2^3} \cos 4\theta \right] + 25.65 \ln R. \quad (18)$$

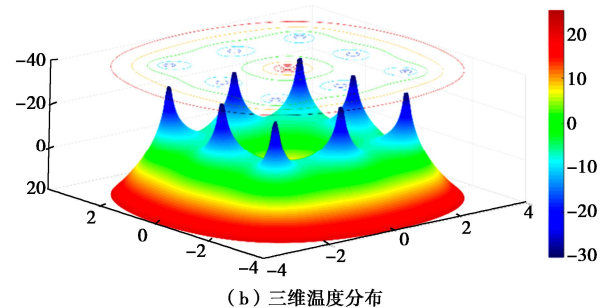
基于式 (18) 绘制的温度场分布云图如图 10 所示。由解析和数值结果的二维云图都可以看出, 矩形布管温度场具有明显特征, 等温线在冻结管附近表现出波浪形状, 随着与冻结管所在矩形边界距离的增加, 波浪形逐渐消失, 等温线首先过度到圆角矩形, 随后向圆形转变, 冻结壁内外侧均有此特征。这说明矩形布管的形状效应会明显影响冻结圈附近的温度场, 而对于距离较远的温度场影响相对较小。另一个直观解释是, 若将 8 根冻结管整体看作一个大冻结管, 在距离大冻结管很远处, 温度场必然成极坐标系下的径向对称分布, 也就是圆形分布, 而在靠近大冻结管边界附近, 则受到管壁温度的影响较大, 故而成矩形。由二维云图中代表低温的蓝色区域也可以看出, 内外侧 0°C 等温线之间的冻土帷幕圈处于距离冻结管较近的

位置, 因此, 实际工程中不能忽视冻结管布置形状对冻结壁性状参数的影响, 在冻结壁承载能力设计和冻结效果评估时应考虑矩形布管造成的温度场差异。

另外, 由相邻等温线之间距离可以发现, 无论是冻结圈内侧或是外侧, 等温线间隔都随着与冻结管距离增大而增大, 说明距离冻结管越远, 温度梯度越小, 降温越缓慢。由 0°C 等温线分布位置发现, 内侧等温线到冻结管布置轮廓线的距离要明显大于外侧, 在图 8, 10 中外侧 0°C 线还处于波浪状态时, 内侧等温线已到达矩形, 这说明对于矩形封闭布管形式, 内侧冻土发展速度大于外侧的现象依然明显, 解析云图也较好地反映了这一特征。



(a) 二维温度分布



(b) 三维温度分布

图 10 基于解析解的温度分布图

Fig. 10 Temperature distribution based on analytical simulation

为对比特征截面上解析解和数值解的差异, 在式 (18) 中令极角 $\theta=0^\circ$ 可得截面 1 的解析温度分布 $T=T(R, 0)$, 与数值计算结果对比曲线如图 11 (a) 所示。同样, 截面 2 上的解析结果可由冻土内外边界控制点 M_1' 和 M_2' 计算得到, 与数值计算结果的对比情况如图 11 (b) 所示。

由图 11 可以看出, 特征截面上解析解和数值解温度曲线总体上具有较高的一致性, 在冻结壁厚度方向上温度分布规律相近, 特别是冻结管轴线外侧, 解析曲线与数值曲线几乎完全重合。在冻结管轴线内侧, 解析解与数值解存在一定误差, 解析结果低于数值结

果,截面 1 上最大差值为 1.63°C , 出现在 $R=1.6\text{ m}$ 处, 截面 2 上最大差值为约为 2.29°C , 出现在 $R=2.2\text{ m}$ 处, 均能控制在 3°C 以内。同时可以发现, 在冰点温度线上, 解析解和数值解曲线均十分吻合, 也说明利用温度场解析解预测冻土边界将具有较高的精度。在实际冻结工程中, 冻结圈内侧的冻土常随着通道开挖施工而被去除, 外侧冻土在冻结壁承载和封水的有效厚度计算中通常占据较大的比重。本文所获解析解与数值解在冻结管轴线外侧的高度吻合特征也使得其用在评估实际矩形布管的冻结效果时更加可靠。

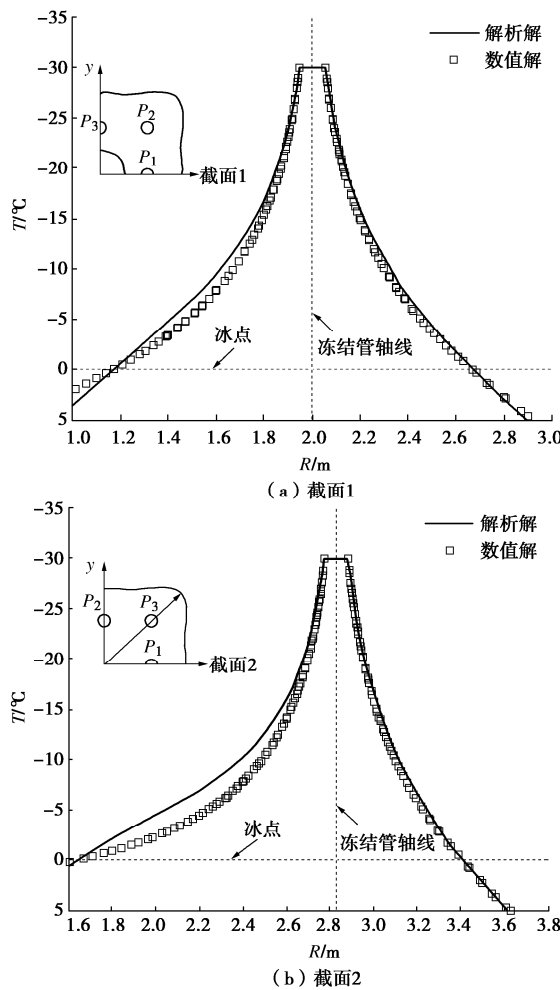


图 11 特征截面上解析与数值结果的温度对比

Fig. 11 Comparison between analytical and numerical results on characteristic cross-sections

3.2 矩形布管模型试验

以广州地铁 6 号线下穿 3 号线冻结暗挖工程为背景, 开挖断面尺寸为 $12.2\text{ m}\times 7.45\text{ m}$, 采用矩形断面以便与车站段进行对接^[23]。冻结施工阶段, 首先沿隧道轮廓线外侧布设一圈矩形分布的冻结管, 待形成封闭冻结帷幕后再进行内部土体开挖作业。同时, 为了保证大断面冻结壁开挖时内侧土体的稳定性, 断面中

部增设了两列纵向冻结孔, 示意图如图 12 所示。

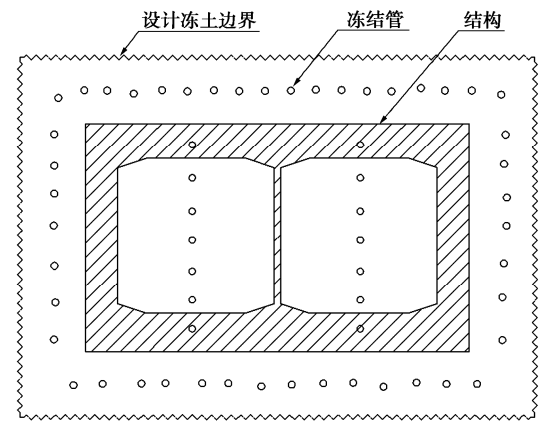


图 12 矩形断面冻结加固示意图

Fig. 12 Diagram of frozen reinforcement of rectangular section

以此为工程原型进行室内模型试验, 研究矩形断面的冻结壁温度场分布规律。如图 13 所示, 试验采用 $C_l=7.71$ 的几何缩比, 矩形断面长边上水平向布置 7 根冻结管, 短边上竖向布置 4 根冻结管, 两列纵向增补冻结孔将整个矩形断面分成 I 区、II 区、III 区 3 个部分。相邻管间距均为 130 mm (实际对应间距 1000 mm), 冻结管半径 7 mm (实际对应半径 54 mm)。

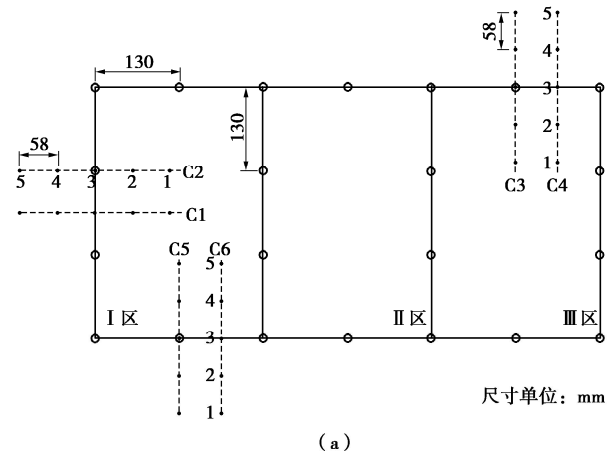


图 13 模型试验冻结方案及测点布置

Fig. 13 Layout of freezing pipes and monitoring points in model tests

试验用土为富水淤泥质砂土, 从冻结施工现场取

回, 含水率约为 45%, 天然密度为 1700 kg/m³, 冰点约为-0.5℃。考虑到模型箱不同位置的保温差异可能对温度场产生影响, 在矩形断面侧壁、顶部和底部各布置两根测温电缆, 编号 C1~C6, 分别沿冻结管主面和界面敷设。每根电缆上布置 5 个温度传感器, 间距 58 mm。为叙述方便, 所有传感器按照从矩形内部向外依次编号, 如图 13 (a) 所示。

为了模拟实际工程盐水温度降低规律, 将试验过程总时长 50 h 分为两个阶段: 第一阶段维持冷却液温度为-15℃, 冻结 28 h 后冻土帷幕交圈, 之后进入第二阶段, 降低冷却液温度至-25℃持续冻结至试验结束。选择冻结第 40 h 交圈并达到稳定之后的温度数据与解析解进行对比。因试验中 3 个矩形冻结分区尺寸一致, 解析计算以任意一区为基础建立包含 10 根冻结管的矩形冻结模型, 坐标原点取矩形中心点, 结合前述解析计算原理, 按照各冻结管与原点距离的不同又可转化为三圈管模型, 三圈冻结管分布半径分别为 $R_1=14.5\text{ cm}$, $R_2=23.4\text{ cm}$ 和 $R_3=19.5\text{ cm}$ 。

以侧壁界面上 C1 为例, 具体对比方法为: 选择 C1-1 测点和 C1-5 测点作为冻土帷幕内外控制点 M_1 和 M_2 , 将其坐标和实测温度值作为冻土边界条件代入式 (17), 联合冻结管温度边界和其他冻结参数 $T_f=-25^\circ\text{C}$, $T_0=-0.6^\circ\text{C}$, 求解式 (16) 温度场表达式的各待定系数, 得到解析解的结果为

$$T(R,\theta)=-41.8+1.15\ln\left[\frac{1}{2^2}\left(\frac{R^2}{14.5^2}+\frac{14.5^2}{R^2}\right)-\frac{1}{2}\cos 2(\theta-\theta_1)\right]+$$
$$1.15\ln\left[\frac{1}{2^2}\left(\frac{R^2}{14.5^2}+\frac{14.5^2}{R^2}\right)-\frac{1}{2}\cos 2(\theta+\theta_1)\right]+$$
$$1.77\ln\left[\frac{1}{2^2}\left(\frac{R^2}{23.4^2}+\frac{23.4^2}{R^2}\right)-\frac{1}{2}\cos 2(\theta-\theta_2)\right]+$$
$$1.77\ln\left[\frac{1}{2^2}\left(\frac{R^2}{23.4^2}+\frac{23.4^2}{R^2}\right)-\frac{1}{2}\cos 2(\theta+\theta_2)\right]+$$
$$1.24\ln\left[\frac{1}{2^2}\left(\frac{R^2}{19.5^2}+\frac{19.5^2}{R^2}\right)-\frac{1}{2}\cos 2\left(\theta-\frac{\pi}{2}\right)\right]+13.32\ln R.$$

(19)

式中, θ_1 和 θ_2 分别为第一圈和第二圈冻结管相对原点的旋转角, 满足 $\tan\theta_1=0.5$, $\tan\theta_2=1.5$ 。第三圈冻结管旋转角为 $\pi/2$ 。

将 C1 截面的其他测点坐标代入式 (19) 即可获得温度场的解析计算值, 对比模型试验的实测温度数据^[23], 如表 3 所示。

通过主面与界面温度的实测值与解析解的对比结果可以看出, 两者的绝对误差均不超过 2℃, 相对误差也都在 20%以内, 解析解精度能够满足实际工程的

误差要求。

表 3 C1 界面 5 个测点坐标及温度对比

Table 3 Comparison of coordinates and temperatures of 5 measuring points on interface C1

测点	坐标/ (cm, cm)	实测值/ ℃	解析解/ ℃	绝对 误差/℃	相对 误差/℃
C1-1	(-1.4, 0)	-9.9	-9.92	0.02	0.20
C1-2	(-7.2, 0)	-10.0	-11.32	1.32	13.20
C1-3	(-13, 0)	-12.2	-10.78	1.42	11.64
C1-4	(-18.8, 0)	-5.8	-6.86	1.06	18.27
C1-5	(-24.6, 0)	-2.0	-1.99	0.01	0.50

其他截面的温度场解析计算过程与 C1 完全相同, 限于文章篇幅, 并区别于界面 C1, 这里仅再列出主面 C2 的对比情况, 如表 4 所示。

表 4 C2 主面 5 个测点坐标及温度对比

Table 4 Comparison of coordinates and temperatures of 5 measuring points on main surface C2

测点	坐标/ (cm, cm)	实测值/ ℃	解析解/ ℃	绝对 误差/℃	相对 误差/%
C2-1	(-1.4, 6.5)	-11.6	-11.62	0.02	0.17
C2-2	(-7.2, 6.5)	-11.4	-11.99	0.59	5.17
C2-3	(-13, 6.5)	-13.5	—	—	—
C2-4	(-18.8, 6.5)	-6.2	-7.14	0.94	15.16
C2-5	(-24.6, 6.5)	-2.1	-2.08	0.02	0.95

4 结 论

本文以人工地层冻结工程中广泛采用的矩形冻结管布置为背景进行温度场的解析研究, 得到以下 4 点结论。

(1) 以 4 根冻结管为基础, 根据矩形布管的几何特征, 提出了矩形布管模型“以圆代方”的温度场求解方法。

(2) 结合调和方程边界分离解法, 获得了 8 根管矩形布置解析解, 并在常见冻结参数下与瞬态数值模拟进行了对比, 特征截面上温度曲线吻合程度较高, 表明了解析求解方法的正确性。

(3) 基于多圈管叠加原理, 给出了广义矩形布管模型的温度场定解方程, 并利用物理模型试验数据分析了实测值与解析解的误差, 验证了解析解的工程适用性。

(4) 矩形布管模型所形成的温度场, 特别是内外侧 0℃线以内的温度分布受冻结管布置的形状影响显著, 在冻结壁设计时应予以考虑。

参考文献:

[1] 鲁先龙, 陈湘生, 陈 曦. 人工地层冻结法风险预控[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(12): 2308-2314. (LU Xianlong, CHEN Xiangsheng, CHEN Xi. Risk prevention and control

- of artificial ground freezing(AGF)[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(12): 2308-2314. (in Chinese))
- [2] 王 鹏, 林 斌, 侯海杰, 等. 冻结管布置形式对冻结壁温度场发展规律影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, **47**(12): 38-44. (WANG Peng, LIN Bin, HOU Haijie, et al. Study on influence of freezing tubes layout on development law of temperature field of freezing wall[J]. Coal Science and Technology, 2019, **47**(12): 38-44. (in Chinese))
- [3] TRUPAK N. Ground Freezing in Shaft Sinking[M]. Moscow: Coal Technology Press, 1954: 20-65.
- [4] BAKHOLDIN B. Selection of Optimized Mode of Ground Freezing for Construction Purpose[M]. Moscow: State Construction Press, 1963: 21-27.
- [5] 侯运炳, 贾进峰, 赵易鑫, 等. 大断面斜井冻结施工多排管冻结温度场模拟研究[J]. 煤炭工程, 2012, **44**(12): 77-80. (HOU Yunbing, JIA Jinfeng, ZHAO Yixin, et al. Simulation study on freezing temperature field with multi row freezing tubes in construction of large cross section mine inclined shaft[J]. Coal Engineering, 2012, **44**(12): 77-80. (in Chinese))
- [6] 胡向东, 韩延广. 环形单圈管冻结稳态温度场一般解析解[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, **46**(6): 2342-2349. (HU Xiangdong, HAN Yanguang. General analytical solution to steady-state temperature field of single-circle-pipe freezing[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, **46**(6): 2342-2349. (in Chinese))
- [7] 胡向东, 方 涛, 韩延广. 环形双圈管冻结稳态温度场广义解析解[J]. 煤炭学报, 2017, **42**(9): 2287-2294. (HU Xiangdong, FANG Tao, HAN Yanguang. Generalized analytical solution to steady-state temperature field of double-circle-piped freezing[J]. Journal of China Coal Society, 2017, **42**(9): 2287-2294. (in Chinese))
- [8] 汪仁和, 李栋伟. 人工多圈管冻结水热耦合数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(2): 355-359. (WANG Renhe, LI Dongwei. Research on hydro-thermal coupling numerical simulation with artificial multi-freezing-tube cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(2): 355-359. (in Chinese))
- [9] 蒋斌松, 沈春儒, 冯 强. 外壁恒温条件下单管冻结温度场解析计算[J]. 煤炭学报, 2010, **35**(6): 923-927. (JIANG Binsong, SHEN Chunru, FENG Qiang. Analytical formulation of temperature field of single freezing pipe with constant outer surface temperature[J]. Journal of China Coal Society, 2010, **35**(6): 923-927. (in Chinese))
- [10] 汪仁和, 王 伟. 冻结孔偏斜下冻结壁温度场的形成特征与分析[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(6): 658-661. (WANG Renhe, WANG Wei. Analysis for features of the freezing temperature field under deflective pipes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(6): 658-661. (in Chinese))
- [11] 王申杰. 深立井冻结管偏斜对温度场及冻结压力的影响研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017. (WANG Shenjie. Study on the Influence of Freezing Pipe Deviation on Temperature Field and Freezing Pressure in Deep Shaft[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2017. (in Chinese))
- [12] 杨 平, 皮爱如. 高流速地下水流动地层冻结壁形成的研究[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(2): 167-171. (YANG Ping, PI Airu. Study on the effects of large groundwater flow velocity on the formation of frozen wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(2): 167-171. (in Chinese))
- [13] 周晓敏, 王梦恕, 张绪忠. 渗流作用下地层冻结壁形成的模型试验研究[J]. 煤炭学报, 2005, **30**(2): 196-201. (ZHOU Xiaomin, WANG Mengshu, ZHANG Xuzhong. Model test research on the formation of freezing wall in seepage ground[J]. Journal of China Coal Society, 2005, **30**(2): 196-201. (in Chinese))
- [14] WANG B, RONG C X, CHENG H, et al. Temporal and spatial evolution of temperature field of single freezing pipe in large velocity infiltration configuration[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, **175**: 103080.
- [15] HUANG S B, GUO Y L, LIU Y Z, et al. Study on the influence of water flow on temperature around freeze pipes and its distribution optimization during artificial ground freezing[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, **135**: 435-445.
- [16] 程 桦, 姚直书, 张经双, 等. 人工水平冻结法施工隧道冻胀与融沉效应模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, **40**(10): 80-85. (CHENG Hua, YAO Zhishu, ZHANG Jingshuang, et al. A model test study on the effect of freeze heaving and thaw subsidence for tunnel construction with artificial horizontal ground freezing[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, **40**(10): 80-85. (in Chinese))
- [17] 蔡海兵, 彭立敏, 郑腾龙. 隧道水平冻结施工引起地表冻胀的历时预测模型[J]. 岩土力学, 2012, **33**(6): 1761-1768. (CAI Haibing, PENG Limin, ZHENG Tenglong. A duration prediction model of surface frost heave induced by tunnelling

- with horizontal freezing method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(6): 1761-1768. (in Chinese))
- [18] CAI H B, HONG R B, XU L X, et al. Frost heave and thawing settlement of the ground after using a freeze-sealing pipe-roof method in the construction of the Gongbei Tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, **125**: 104503.
- [19] 李文涛, 盛小飞, 张逸民. 矩形冻结帷幕施工技术及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, **30**(增刊 1): 139-141. (LI Wen-tao, SHENG Xiao-fei, ZHANG Yi-min. Construction technology and practical applications of rectangular frozen wall [J]. Journal of Mining & Safety Engineering. 2013, **30**(S1): 139-14. (in Chinese))
- [20] 张晋勋, 亓 轶, 杨 昊, 等. 北京砂卵石地层渗流条件下多排管局部冻结水平板成形规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(增刊 1): 3188-3196. (ZHANG Jinxun, QI Yi, YANG Hao, et al. Formation rules of horizontal frozen plate with multiple rows in Beijing sandy gravel stratum under seepage condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(S1): 3188-3196. (in Chinese))
- [21] QI Y, ZHANG J X, YANG H, et al. Application of artificial ground freezing technology in modern urban underground engineering[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, **2020**: 1-12.
- [22] 方忠强, 孙晓锋, 陈 磊. 冻结暗挖法在地铁车站附属结构中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2015, **18**(2): 106-110. (FANG Zhongqiang, SUN Xiaofeng, CHEN Lei. Application of freeze excavation method in attached structure of subway station[J]. Urban Mass Transit, 2015, **18**(2): 106-110. (in Chinese))
- [23] 商厚胜, 岳丰田, 石荣剑. 浅覆土下矩形冻结加固的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(增刊 2): 149-155, 161. (SHANG Housheng, YUE Fengtian, SHI Rongjian. Model test of artificial ground freezing in shallow-buried rectangular cemented soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(S2): 149-155, 161. (in Chinese))
- [24] HU X D, SHE S Y. Study of freezing scheme in freeze-sealing pipe roof method based on numerical simulation of temperature field[C]// ICPTT 2012. Wuhan, China. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2012: 1798-1805.

第四届全国能源地下结构与工程学术研讨会 (一号通知·征文)

为聚集优秀的学术和工程技术人员,推动能源岩土工程的研究和应用,服务千年大计和国家战略。现拟于2023年9月,在河北雄安召开第四届全国能源地下结构与工程学术研讨会。届时将邀请国内外著名的能源岩土工程专家、新区建设者就能源地下结构与工程的发展做综述报告,分享最新的研究进展和成果,交流最新的学术观点和解决实际工程问题的新方法;同时,组织参观雄安新区建设,为学术界最新科研成果创造落地场景与合作机会,促进能源岩土学科“产学研用,协同创新”。

会议议题: ①能源地下结构与工程(包括能源桩、能源隧道、能源管廊、能源筏板、能源地下连续墙、能源竖井、建筑筏板下地埋管以及大规模钻孔埋管等等); ②极端温度地下工程(冻结法隧道、高温岩石隧道、热固结地基处理工法、桩身检测热工法,隧道过火后安全评价、机场跑道及公路桥面等防冻除冰技术); ③抽水蓄能及地下压缩空气储能中的岩土工程技术; ④高放射性核废料及CO₂地下封存; ⑤能源地下存储与输送; ⑥可燃冰、页岩气等油气开采相关岩土工程; ⑦浅层、中深层地热开发技术; ⑧能源地下工程中多场耦合岩土力学和

孔隙介质传输力学; ⑨其他与地热能、风能、太阳能等新能源利用相关的岩土工程问题。

主办单位: 中国岩石力学与工程学会能源地下结构与工程专委会

承办单位: 清华大学; 中国建筑科学研究院地基基础研究所; 三峡大学

重要日期: 2023年7月31日前稿件接收截止; 2023年8月20日前通知作者是否录用; 2023年8月31日前提交修改后的论文。

论文出版要求: 优秀稿件推荐至《清华大学学报》(正刊)、《深圳大学学报》(正刊)、《建筑科学》(正刊)、《建筑结构》(正刊)和《防灾减灾工程学报》(专栏正刊)发表。邮寄一份电子文本,论文中请务必注明详细通讯地址、邮编、联系电话及Email地址。

论文投稿及会议报告事宜请联系: 清华大学土木工程系郭红仙 13811838826, energy_geotech2023@ylsas.cn(会议投稿), <https://kdocs.cn/l/cugFIoXrPltB?fid=301>(模板下载)。

(中国岩石力学与工程学会能源地下结构与工程专委会 供稿)