文章编号：1673-9469（2019）04-0031-06 doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.04.006

基坑端头井联结隧道冻结过程应力应变分析

汪志强[1]，秦 榛[2]，陈晓鹏[3]，高 虎[3]，汪亦显[1*]

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院，安徽 合肥 230009；2. 合肥市轨道交通建设工程质量安全监督站，安徽 合肥 230001；3. 中铁十局集团 第三建设有限公司，安徽 合肥 230001)

摘要：为分析冻结法对盾构隧道施工过程中的加固作用，以合肥市轨道交通2号线大东门站到达端盾构工程为依托，对无限大区域内单根冻结管稳态温度场公式进行推导，并根据工程实际情况建立了三维数值模型并进行热-力耦合计算。结果表明：冻结帷幕内温度场是以各冻结孔为中心圆形发展，各孔之间出现交圈之后再向四周发散；冻结法加固能显著降低由施工导致的地层沉降，降低幅度最大约为50%，加固效果较好；左线隧道较右线隧道后施工，其管片应力较大，应及时施作衬砌，尽快闭合支护体系，保证施工安全顺利进行。

关键词：冻结法；盾构隧道；温度场；地层沉降

中图分类号：U459.3 **文献标识码**：A

Stress and Strain Analysis of Freezing Process of End-shaft Connection Tunnel of Foundation Pit

WANG Zhiqiang[1]，QIN Zhen[2]，CHEN Xiaopeng[3]，GAO Hu[3]，WANG Yixian[1*]

(1.College of Civil Engineering，Hefei University of Technology，Hefei，Anhui 230009，China；2.Hefei Rail Transportation Quality Surveillance，Hefei，Anhui 230001，China；3.Third Construction Co.Ltd.，China Railway No.10 Engineering Group Co.，Ltd.，Hefei，Anhui 230001，China)

Abstract：In order to analyze the reinforcement effect of freezing method in shield tunnel construction，the steady temperature field around a single freezing pipe is analyzed based on the shield tunneling project of Dadongmen Station of Hefei Rail Transit Line 2 and a three-dimensional numerical model is established according to the actual situation of the project. The results show that the temperature field in the freezing curtain develops circularly around the freezing holes and diverges around them after the intersection of the holes occurs. And the freezing method has a better reinforcement effect that the ground settlement of tunneling construction can be significantly reduced with a maximum 50% reduction. Besides，the left tunnel has larger segment stress after the construction of the right tunnel，so the lining should be put into effect in time and the supporting system should be closed timely to ensure the safe and smooth construction.

Key words：freezing method；shield tunnel；temperature field；stratum settlement

人工地层冻结法(Artificial Ground Freezing Method)是一种利用低温冷媒循环使地层中的水结冰，将天然岩土变成冻土，隔断地层与水的联系，提高土体的强度和稳定性，从而在冻结帷幕的保护下进行井筒和地下工程施工的一种特殊的施工技术。冻结法始于19世纪，该技术首先应用于矿山立井工程，是深立井建设的主要工法，1862年英国建筑师在建筑工程中首次使用了冻结法进行施工，随着该施工方法的发展，近年来，冻结法成为隧道、城市地铁等领域常用的加固方法之一，如港珠澳大桥拱

收稿日期：2019-10-10

基金项目：国家自然科学基金资助项目(51774107)；合肥市重点工程建设科技支撑项目(2013CGAZ0771)；安徽省住房城乡建设厅科学技术计划项目(2013YF-27)

作者简介：汪志强(1997-)，男，安徽铜陵人，硕士研究生，主要从事岩土与隧道工程方面的研究。* **通讯作者**：汪亦显(1980-)，男，湖北黄冈人，博士，副教授，主要从事地铁隧道及岩土工程方面的教学与科研。

北隧道工程、广州地铁 2 号线区间联络通道工程、南京地铁 1 号线进出口工程等都采用了冻结法对地层进行加固，这些工程应用使得冻结法得到了极大的发展。至目前为止，很多学者从理论、工程实践、实验等方面对冻结法进行了大量研究，使得我们对冻结土性质的认识越来越深入 [1-3]。

曹雪叶等 [4] 基于统一强度理论，推导得出了冻结帷幕内的弹塑性应力场及弹塑性极限荷载的解析解。张博等 [5] 考虑超深表土内大变形的影响，推导出变形前冻结壁开挖半径及有效厚度的求解公式。韩灵杰等 [6] 基于冻结锋面构建相应人工冻结相变温度场模型，采用变量替换法得到了冻结帷幕内温度场的解析解。蔡海兵等 [7] 采用随机介质理论建立了隧道冻结壁强制解冻期地表沉降的预测方法，由该方法得到了地表沉降随解冻试件的分布及变化规律。张军等 [8] 基于拱北隧道现场实测数据，对冻结法暗挖不同阶段管间实际冻结封水效果进行分析。杨平等 [9] 以软土隧道联络通道冻结法工程为背景，研究了冻结法施工过程中温度场及冻胀融沉变形规律。商厚胜等 [10] 以广州地铁冻结工程为原型设计模型实验，得到矩形冻结加固体温度场分布及冻胀融沉变形规律。石泉斌等 [11] 开展了多因素条件下冻结强度直剪实验，为人工冻土区冻结加固设计、盾构法施工等提供了冻结强度参数选取依据。

本文以合肥轨道交通 2 号线大东门站盾构隧道开挖为依托，基于热力学平面热传导方程，推导单根冻结管区域内温度场解析解，根据工程建设实际情况对施工过程进行热 - 力耦合模拟，得到冻结管周围温度场分布情况，以及冻结加固作用下盾构隧道开挖导致的土体沉降及应力变化，以数值模拟结果指导实际工程施工。

1 无限大区域内单根冻结管稳态温度场求解

热力学中热传递的方式主要有热传导、热对流、热辐射三种，在实际热传递过程中，这三种方式往往不是单独进行的。利用冻结法进行盾构开挖施工过程中，后两者对温度场的影响很小，相对于前者可忽略不计，因此，此处关于温度场的计算只考虑热传导模型。

根据傅里叶定律：

$$q = k\frac{\partial T}{\partial x} \tag{1}$$

式中：q 为热流量密度，$w\cdot m^{-2}$；k 为土体导热系数，$w/(m\cdot℃)$；T 为土体温度，℃。

Cote 等人在前人研究的基础上提出了关于土体归一化导热系数的一般计算方法 [13]：

$$k = \frac{\beta S_r}{1+(\beta-1)S_r} \tag{2}$$

式中：β 为土体处于不同状态下的经验参数；S_r 为土体饱和度。

定义热势：$\varphi = kt$ (3)

则有：$q = -\dfrac{\partial \varphi}{\partial x}$ (4)

根据热力学第一定律，平面内热传导方程为 [5]：

$$\frac{\partial qx}{\partial x} + \frac{\partial qy}{\partial x} - Q + \rho c\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \tag{5}$$

式中：Q 为单位体积系统与外界热量交换，$J/(s\cdot m^3)$；ρ 为密度，kg/m^3；c 为比热容，$J/(kg\cdot℃)$；t 为时间，s。

为简化推导过程，做出以下假设条件 [12]：(1) 土体为各向同性材料，即沿各方向的热传导系数均相等；(2) 不考虑研究区域与外界的热量交换；(3) 不考虑温度的时间效应，即近似为稳态温度场。

式 (5) 简化为：$\dfrac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0$ (6)

用极坐标表示公式 (6) 即 [2]：$\dfrac{d}{dr}\left(r\dfrac{d\varphi}{dr}\right) = 0$

对距冻结管 r 处的圆周，圆周上任一点热流量密度为 q，则有：

$$q_c = 2\pi rq = -2\pi r\frac{d\varphi}{dr} \tag{7}$$

可得：$\varphi = -\dfrac{q_c}{2\pi}\ln r + c$ (8)

根据势函数叠加原理，在平面内存在多个冻结管时，该点的热势是可以叠加的，因此，平面任一点热势等于各管在该点热势之和。当平面内存在 n 根冻结管时，冻结帷幕内任一点热势为：

$$\varphi = -\left(\frac{q_{c1}}{2\pi}\ln r_1 + \frac{q_{c2}}{2\pi}\ln r_2 + \cdots + \frac{q_{cn}}{2\pi}\ln r_n\right) + c = -\sum_{j=1}^{n}\frac{q_{ci}}{2\pi}\ln r_i + c \tag{9}$$

式中：r_i 为第 i 根冻结管到某一点的距离，m；q_{ci} 为第 i 根冻结管的热流量，J/s；c 为常数。

综上所述，针对足够大区域内单根冻结管稳态温度场热势分布情况，将冻结管看作点源，以其为中心建立笛卡尔坐标系，图中：冻结管半径为 r_0，

单管冻结帷幕半径为 r，冻结管表面温度为 T_0，土体冻结温度为 T_1，冻结管热流量为 q_c。如图 1 所示：

冻结区域内任一点热势按公式 (8) 进行计算，

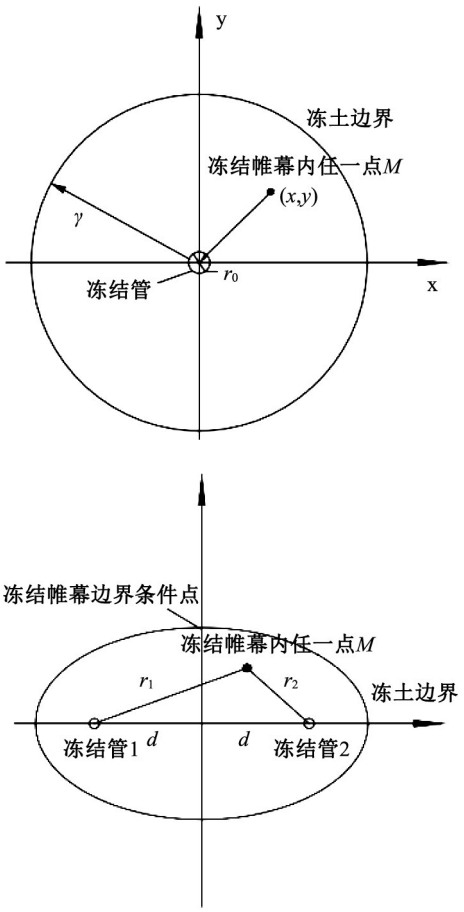


图 1 无限大区域内单根和两根冻结管冻结区域示意图

Fig.1 A sketch of the freezing zone of a single and two freezing pipes in an infinite area

式中 r 为计算点到冻结管距离 ($r=\sqrt{x^2+y^2}$)。

冻结管边缘热势为：

$$\varphi_0 = -\frac{q_c}{2\pi}\ln r_0 + c \tag{10}$$

冻土边界线上热势为：

$$\varphi_1 = -\frac{q_c}{2\pi}\ln \gamma + c \tag{11}$$

联立公式 (10)、(11) 可解得：

$$\varphi_0 - \varphi_1 = \frac{q_c}{2\pi}\ln\frac{\gamma}{r_0} \tag{12}$$

将公式 (3)$\varphi = kt$ 代入式 (12) 可得单根冻结管区域内稳态温度场解析解：

$$T = T_0 + \frac{\ln r/\gamma}{\ln r_0/r}\left(T_1 - T\right) \tag{13}$$

2 数值计算模型

2.1 工程概况

合肥轨道交通 2 号线宿州路站 - 大东门站区间隧道工程，采用盾构法施工，隧道外径为 6 000 mm，内径 5 700 mm，衬砌块厚 300 mm，宽 1 500 mm，隧道中心距地表埋深 21 m，大东门站西端端头井维护结构采用 1 000 mm 厚地下连续墙，由于预留加固距今时间较长，原加固体年久失效，其强度性质、变形性质、渗透系数等无法满足盾构接收要求。考虑到加固范围距离南淝河较近、地下水具有承压性且与南淝河水有水力联系，对原有加固体进行二次注浆法加固风险较高，故此处采用冻结法进行土体加固，保证盾构接收安全。冻结法施工区域土层条件主要为：杂填土、粉质黏土、粉土、强风化泥质砂岩等，具体土层力学参数见表 1 所示：

根据冻结帷幕设计，利用咬合桩布置水平冻结孔，冻结孔沿 φ7.6 m 圆形布置 32 个，沿 φ5.2 m、φ2.6 m 分别布置 16 个、8 个，冻结孔的平面布置图 2 所示。

2.2 数值模型

本次数值模拟采用有限差分程序软件 FLAC3D5.0 软件，该软件广泛应用于岩土工程、地下工程等数值模拟分析，尤其对于结构大变形的模拟具有较好的效果。所建模型如图 3 所示，模型整体尺寸为 60 m × 30 m × 41 m。模型中包括各层土体、隧道衬砌管片、端头井连续墙等，衬砌模型在模拟

表 1 土层物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil layer

土体	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /°	容重 /(kN·m^{-3})	弹性模量 /MPa	泊松比	厚度 /m
杂填土	10	12	18.0	10	0.3	5
粉质黏土	15	15	18.5	23	0.3	6
粉土	13	19	18.4	13	0.3	6
砂质粉土	20	22	19	35	0.3	20

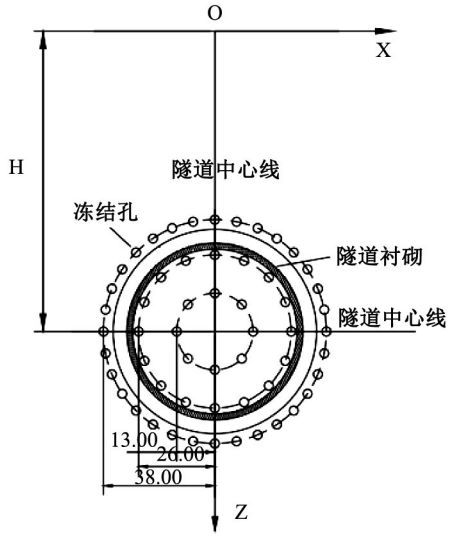


图 2 冻结孔平面布置图

Fig.2 Plane layout of freezing hole

开挖过程中依次加入。考虑到冻结区域的温度效应，计算时采用手动力 - 热耦合计算，模拟开挖时，每开挖一步，马上施工隧道衬砌并计算至收敛，再进行下一步开挖，亦即每步开挖是在前一步衬砌建立好并产生作用的情况下进行的。模拟时右线隧道开挖完后再开挖左线隧道，加上初始土体自重应力平衡计算，施工工况共计 23 个。

在模型的建立与计算过程中为简化计算需进行以下假定：

(1) 施工过程中工程所在位置各土层均水平分布；

(2) 冻土帷幕为冻结温度为 -14℃ 的等温体，冻土帷幕边缘距隧道平均厚度为 3 m；

(3) 未冻土和冻土均为弹塑性材料，本构关系采用 Mohr coulomb 模型，管片衬砌采用弹性模型。

(4) 模型边界温度固定，与周围土体无热量交换。

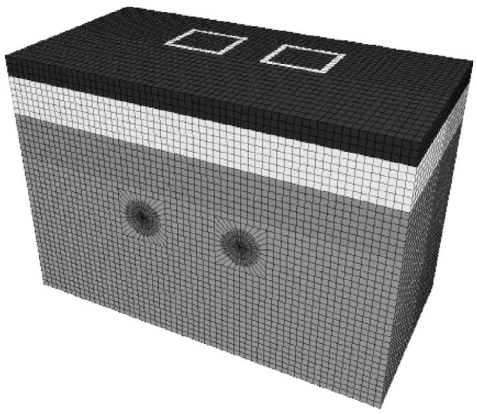


图 3 三维计算模型

Fig.3 Three-dimensional computational model

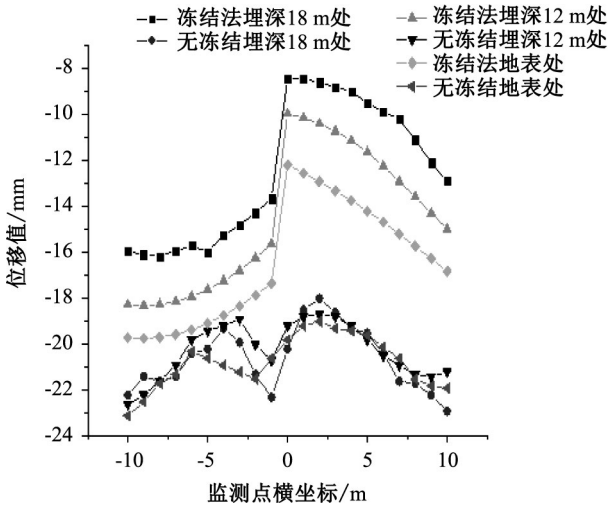


图 4 冻结法对地层沉降影响

Fig.4 The influence of freezing method on ground subsidence

3 计算结果分析

3.1 沉降监测分析

在模型中不同深处设置竖向位移监测点，并将冻结法施工所引起的地层沉降与无冻结加固的普通地层的沉降相对比，结果如图 4 所示。由图可以看到，经冻结加固土体后，各层土体的沉降值均有了大幅度的降低，如地表处普通开挖其沉降值约为 20 mm，经过冻结加固处理后其最小沉降值减小至 12 mm。此外，虽然隧道周围地层经加固后能在一定程度上降低其计算收敛值，但不可忽视的是其变形量较大，因此施工过程中必须对冻土帷幕及隧道附近渗透水进行监测，防止渗透水对冻土帷幕的力学性质及变形性质产生影响。对于冻结法加固的土层，由于隧道两线的先后开挖，左线隧道上方土体沉降明显小于右线隧道上方土体。

3.2 温度场分析

冻结区域温度场任一点温度均为多个冻结管共同作用的结果，文中公式 (13) 虽然推导出了单根管周围的温度场分布，但由于人工冻结温度场是一个包含相变且移动边界的温度场，其理论求解较困难，如前述对相关条件进行简化后采用 FLAC3D 软件热学分析模块对温度场进行计算，具体温度场分布见图 5 所示。

图 5 中冻结孔是以隧道中心为中心，以同心圆的形式向四周发展，在各相邻冻结孔之间出现交圈之后逐渐向四周发散，即内外排冻结孔的冻结圆柱

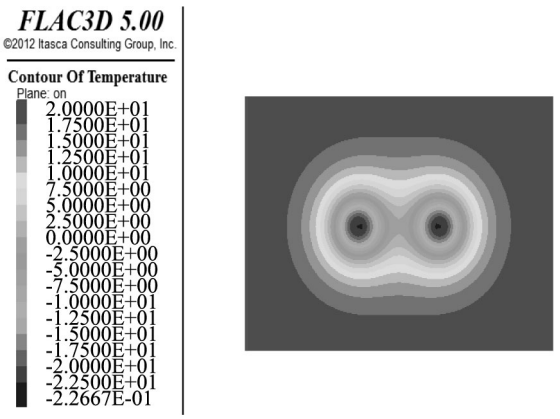


图 5 冻结期温度场云图

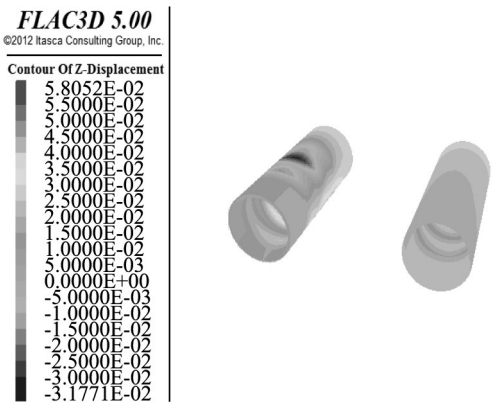
Fig.5 Temperature field nephogram during freezing period

逐步扩大至相互连接，并在两排管之间形成封闭的冻结壁，各圈冻结管附近及隧道中心温度最低，向四周温度逐渐升高。由于数值模拟中未考虑冻结管的偏斜情况，且模型外边界设置为绝热条件，边界温度设置为常温 20℃，即不考虑与外界热量交换的影响，故冻结帷幕附近温度下降较快，由图 5 可知，冻结管中心温度为 -22℃，以同心圆的形式向四周扩散增大，在两隧道中间区域，冻结帷幕区域出现相交，该区域温度为 -10℃，冻结帷幕区域内平均温度约为 -14℃，除去开挖面半径 3 m，冻土帷幕有效厚度约为 3 m，一般来说，数值计算所得的温度及冻结帷幕厚度会比现场实际略大，其原因可能是由于没有考虑土体的导热以及与外界的热量交换。

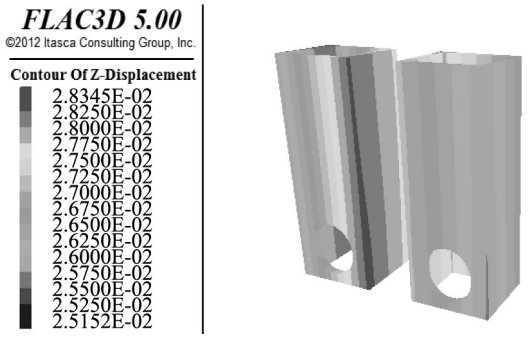
3.3 应力场及位移场分析

图 6(a)、(b) 分别为隧道管片和端头井连续墙竖向位移分布云图，由于两条隧道距离较近，同时开挖会导致地层沉降较大，因此，先开挖右线，待开挖完成并计算平衡后再开挖左线。由图可以看到，管片最大位移位于左线隧道中间区域向上隆起 58 mm，相对应隧顶部位沉降为 31 mm，隧道的开挖过程对端头井连续墙影响导致其整体向上位移 25 mm。

图 7(a)、(b) 为隧道和连续墙最大主应力分布图，主应力最大值发生在左线隧道的初始位置，其值为 3.88 MPa，拉应力极值主要分布在隧道的两侧位置，压应力极值则分布在隧道顶部和底部，这种应力分布主要是土体开挖卸载引起的，开挖引起整个衬砌结构向临空面方向发生位移，在此由于埋深较小，上部土体无法形成足够的拱效应支撑，也没有考虑



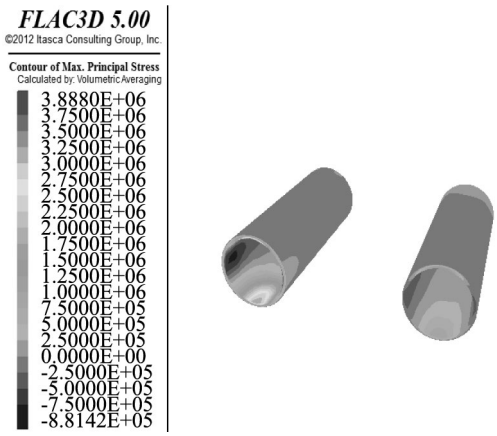
(a) 隧道衬砌管片



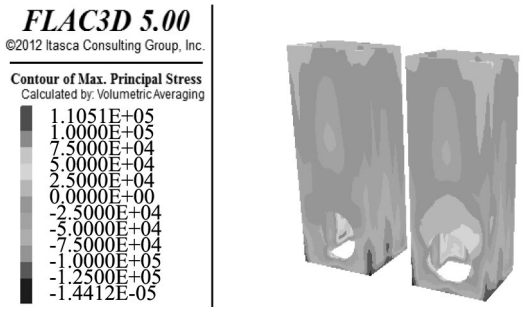
(b) 端头井连续墙

图 6 隧道衬砌与端头井位移场云图

Fig.6 Displacement field cloud map of tunnel lining and end shaft



(a) 隧道衬砌管片



(b) 端头井连续墙

图 7 隧道衬砌与端头井最大主应力场云图

Fig.7 Cloud lining and the maximum principal stress field of the end shaft

水平地应力的影响，故管片两侧主应力均明显小于隧道顶部。连续墙主应力最大值位于隧道与墙体相交处，由于破壁后的应力集中作用所导致，其值为 0.14 MPa。

4 结论

1) 温度场是以隧道中心为中心向四周发展，各相邻冻结孔之间温度场出现交圈之后再向外围扩散，由此在两排冻结管之间形成冻结壁，并且隧道中心温度最低，向外围温度逐渐升高，冻结帷幕有效厚度约为 3 m。

2) 通过对冻结法盾构施工开挖和未经冻结加固的土体盾构施工开挖进行对比，可以看到冻结法对于降低地层沉降有着明显的促进作用，但部分位置沉降值仍然较大，施工时应对冻土帷幕及隧道附近渗透水进行监测，防止渗水对冻结帷幕及隧道安全造成影响。

3) 右线隧道施工完后施工左线隧道，先开挖隧道会造成地层扰动以及应力重分布，当左线隧道开挖后，本趋于稳定的土层再次受到扰动，使得左线隧道地表沉降均大于右线隧道，施工时需注意及时施作衬砌，必要时可采用注浆加固，保证施工安全顺利进行。

参考文献：

[1] 黄齐兵，杨 辉，徐硕硕 . 拱北隧道冻结法施工三维数值模拟分析 [J]. 河南城建学院学报，2018，27(5)：21-27.

[2] 陈湘生 . 冻结法几个关键问题及在地下空间近接工程中最新应用 [J]. 隧道建设，2015，35(12)：1243-1251.

[3] 王晨星，刘远才，刘德稳 . 基于土体冻结理论在地铁施工中的应用 [J]. 森林工程，2018，34(2)：89-86.

[4] 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，2016，39(12)：769-774.

[5] 张 博，杨维好，王宝生 . 考虑大变形特征的超深冻结壁弹塑性设计理论 [J]. 岩土工程学报，2019，41(7)：1288-1296.

[6] 韩灵杰，韩 毅，马 芸，等 . 冻结管引起的周围土体温度场演变规律及参数化分析 [J]. 水利水电技术，2018，49(7)：187-195.

[7] 蔡海兵，彭立敏，郑腾龙 . 隧道水平冻结壁强制解冻期地表沉降的预测方法 [J]. 岩土力学，2015，36(12)：3516-3522.

[8] 张 军，胡向东，王文州 . 拱北隧道超长水平精细化动态控制冻结封水设计 [C]// 水下隧道建设与管理技术论文集. 2013.

[9] 曹雪叶，赵均海，张常光 . 基于统一强度理论的冻结壁弹塑性应力分析 [J]. 岩土力学，2017(3)：2226-2234

[10] 商厚胜，岳丰田 . 浅覆土下矩形冻结加固的模型试验研究 [J]. 岩土力学，2014，35(S2)：149-155.

[11] 石泉彬，杨 平 . 冻土与结构接触面次峰值冻结强度试验研究 [J]. 岩土力学，2018，39(6)：2025-2035.

[12] 胡向东，郭 旺，张洛瑜 . 无限大区域内少量冻结管稳态温度场解析解 [J]. 煤炭学报，2013，38(11)：1953-1960.

[13]COTE J，KONRAD J M.A Generalized Thermal Conductivity Model for Soils and Construction Materials[J].Canadian Geotechnical Journal，2005，42(2)：443-458.

（责任编辑 李新）