

复杂环境下浅埋暗挖隧道穿越 薄富含水层冻结温度场研究

袁云辉¹, 杨 平¹, 江天堃²

(1. 南京林业大学 土木工程学院, 南京 210037; 2. 中铁隧道集团公司二处, 北京 102200)

摘 要: 提出了南京地铁 2 号线新街口—上海路隧道穿越薄富含水层冻结法止水加固方案, 利用 ADINA 有限元软件对该浅埋暗挖隧道涌水段建立冻结温度场数值模型, 分析了冻结管间距、冻结盐水温度、冻结管直径对冻结壁发展速率、冻结壁厚、平均温度的影响, 以此为基础对冻结参数开展优化设计, 并获得成功应用。研究表明: 利用人工冻结技术能够有效解决这一特殊岩土工程难题。为了在支护段获得有效地止水冻土帷幕, 冻结管间距应小于等于 1 m; 冻结工程中采取 -30℃ 的盐水温度既能满足需冷量, 又能符合经济性要求; 采取大直径的冻结管对增加冻土墙厚度与降低冻土壁平均温度的影响并不显著。

关 键 词: 隧道内人工冻结; 浅埋暗挖; 薄含水层; 温度场; 数值模拟

中图分类号: U 452

文献标识码: A

Study of thermal field of soil freezing in shallow covered tunnel with subsurface excavation passing through ground with thin aquifer under complex conduction

YUAN Yun-hui¹, YANG Ping¹, JUANG Tian-qian²

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. Second Department of China Railway Tunneling Group Corporation, Beijing 102200, China)

Abstract: Artificial freezing water sealing reinforcement method for water-enriching layers of Shang—Xin tunnel of Nanjing metro Line No.2 is proposed. Numerical model of freezing temperature field is built for the water inflowing tunnel by ADINA software. The effects of distance of freezing pipes, brine temperature and diameter of freezing pipes on development of freezing walls, thickness of freezing wall and average temperature are studied. On the basis of this study optimization design is implemented. And the freezing method is successfully applied to the construction. The study demonstrates that the application of artificial freezing can solve this special geotechnical problem. The distance of freezing pipes should less than 1 meter so as to get effective freezing wall. Using brine temperature of -30℃ may not only meet the need of cooling capacity but also meet the economical requirement. There is no significant effect on the thickness of freezing wall and the average temperature by using freezing pipes of large diameter.

Key words: artificial freezing in tunnel; shallow covered tunnel with subsurface excavation; thin aquifer; temperature field; numerical simulation

1 引 言

浅埋暗挖是地铁隧道开挖的一种重要施工方法。由于其隧道埋深较浅, 一旦在开挖过程中遇到事先没有探明的薄透水性强的富含水层, 这种薄富含水层难以降水, 如果没有采取止水措施, 大断面开挖必将引起开挖后水土大量涌入隧道, 不但对已经形成的隧道结构构成重大威胁, 而且很容易引起

地表大量沉降, 附近建筑物、管线遭到破坏。冻结法作为一种形式灵活、适应性强、施工无污染、对环境影响小的土体加固方式在地铁隧道工程中具有广阔的发展前景。目前, 有关人工冻结法在城市隧道建设中的应用已经获得了许多有益的施工经验^[1-6]。

本文通过数值模拟分析, 为南京地铁 2 号线上海—新街口区间浅埋暗挖涌水段人工冻结止水支护工程设计进行优化设计, 将计算值与现场实测结果

收稿日期: 2010-04-23

基金项目: 江苏省六大人才高峰项目资助 (No. 2004—建 11); 江苏省普通高校研究生科研创新计划 (No. CX09S_015Z)。

第一作者简介: 袁云辉, 男, 1984 年生, 硕士研究生, 主要从事岩土与地下工程研究工作。E-mail: njfuyuanhui@sina.com

通讯作者: 杨平, 男, 1964 年生, 硕士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土与地下工程的教学与研究工作。E-mail: yangping@njfu.edu.cn

进行对比。对比结果与冻结后开挖结果表明, 只要各项参数设计合理, 冻结法作为一种解决隧道穿越薄富含水层的新工法是切实可行的, 这对今后类似工程问题提供了新的解决办法。

2 工程背景

2.1 工程地质概况

南京地铁二号线新街口—上海路隧道里程范围为 K13+062.5~K13+502.65, 为分离式单线隧道。区间拱顶覆土厚度只有 8.4~9.1 m, 属浅埋暗挖隧道, 左右线线间距为 16.2~17.2 m。

2008 年 4 月 19 日新街口—上海路区间右线 YK13+277 处仰拱出现大量不明涌水, 夹带少量泥砂, 出水量约为 150~180 m³/h。对该段地层进行重新补充勘测, 揭示资料显示, 从掌子面 YK13+277 至 YK13+243 里程段隧道下断面存在③-3c2 粉土、③-3d2 粉砂夹层, 在仰拱以下 1.07 m 至仰拱以上 1.89 m 范围内水平分布, 考虑到涌水量和涌水水质等因素判断这层粉土、粉砂层并非为局部透镜土, 向南存在一定外部的水力联系。补勘获得的右线涌水段隧道工程地质剖面见图 1。

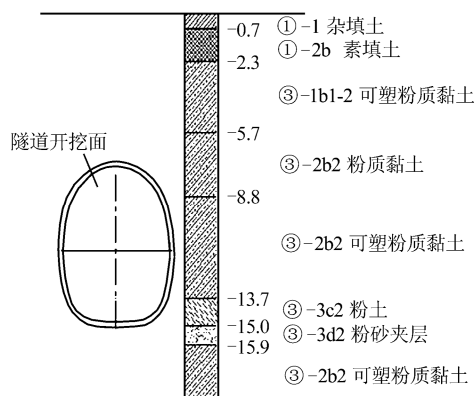


图 1 补充勘察后涌水段隧道地质剖面图 (单位: m)

Fig.1 Geologic profile after supplementary investigation on water inflowing tunnel (unit: m)

2.2 人工冻结方案

在隧道内利用已经贯通的上台阶空间进行冻结孔施工。根据隧道的埋深、开挖走向、形式以及该区间粉土、粉砂层的分布形态, 设计选择冻结壁的形式为以上台阶开挖边界位置向隧道轴线两侧布置倾斜的竖向冻结管。

人工冻结法虽然造价较高, 且在隧道穿越薄富含水层开挖施工无先例可循, 但由于其本身的施工工艺较为成熟、灵活且后期开挖过程中风险最小, 被确定为最终的开挖方案。

3 冻结温度场数值模型

3.1 几何模型

根据新街口—上海路区间右线涌水段初步冻结设计方案, 数值计算取 3 个典型剖面建立二维模型, 即垂直于开挖方向的剖面 1、沿隧道开挖方向的剖面 2 和平行于下台阶开挖面的剖面 3, 如图 2 所示。根据对称性, 2D 模型取 1/2 尺寸 (剖面 3 取支护端头 1/2 尺寸) 进行计算。上边界取至上台阶目前已开挖隧道拱顶, 下边界取 3 倍冻结深度, 即 18.795 m, 左边界取隧道中心至最大冻结宽度的 5 倍^[6], 即 36.78 m, 这样足以消除边界影响。对粉质黏土层中所夹粉土层按最大分布厚度 2.4 m 计。

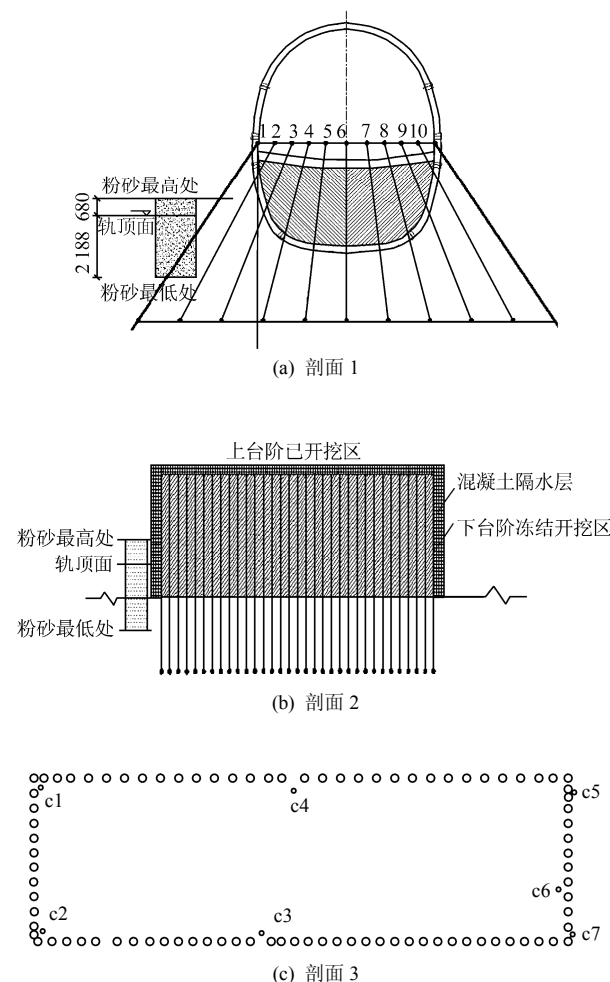


图 2 冻结方案剖面 1~3 示意图 (单位: mm)

Fig.2 Profile 1 to profile 3 of freezing scheme (unit: mm)

3.2 计算参数

冻结范围内所处土层的热物理参数经试验, 其值见表 1。

3.3 荷载处理

(1) 隧道内空气与上台阶开挖后临时混凝土支

护及冻结段混凝土隔水层之间为空气对流边界，热对流换热系数为 $50 \text{ kJ}/(\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{K})$ ；施工期间隧道内平均温度 $T = 15^\circ\text{C}$ 。

(2) 杨志江通过研究表明，直接将冷媒入口温度作为冻结管外壁恒定温度，忽略冷媒循环计算温度场是可行的。

(3) 土层冻结过程中释放的相变潜热量见表 1。

3.4 单值性条件

数值模型的单值性条件分为初始条件和边界条件两类。模型下边界和两侧边界为绝热边界，没有热量传递。根据现场实测，该冻结段原始地温 $T = 20^\circ\text{C}$ 。

表 1 上—新区间涌水段冻结区土层热学物理参数
Table 1 Soil thermal physical parameters of Shang—Xin water inflowing tunnel

土层	导热系数/(W/(m·℃))		容积热容量/(J/(kg·℃))		相变潜热 /(10 ⁸ J/m ³)	密度 /(g/cm ³)	含水率 /%	冻结温度 /℃
	未冻土	冻土	未冻土	冻土				
③-3b1-2	1.16	1.35	1 717	1 321	1.27	1.92	24.2~32.5	-0.6
③-3c2	1.33	1.39	1 499	1 172	1.16	1.70	28.5~35.1	-0.3
③-2b2	1.06	1.17	1 717	1 321	1.27	1.92	24.2~32.5	-0.6

3.5 有限元模型

冻结过程 2D 有限元模型热传导采用 4 节点平面单元，热对流边界采用 2 节点线单元。根据冻结计划，计算设置荷载步为 50 d，每步时间步长 24 h。剖面 1~3 的有限元模型如图 3 所示。

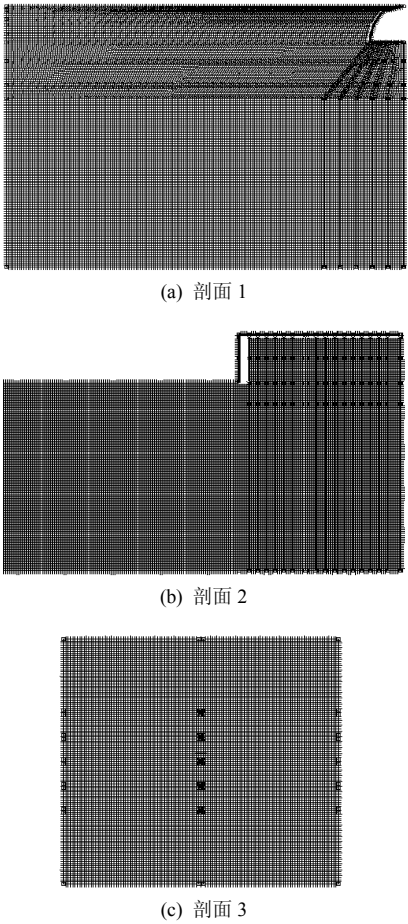


图 3 冻结段隧道剖面 1~3 有限元模型
Fig.3 Finite element model of freezing tunnel from profile 1 to profile 3

4 计算结果分析

4.1 冻结管间距设计的分析

利用图 3 所示有限元数值模型分别计算冻结管中心间距为 60、80、100、120 cm 时对冻土柱交圈时间、冻土发展速率、冻结壁厚度及平均温度的影响。计算结果如图 4~7 所示。交圈后冻土墙界面和主面上的发展速度（冻土发展速度）见表 2。

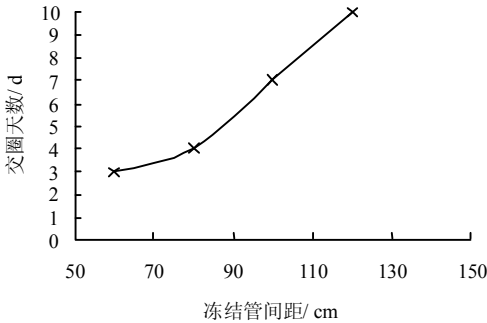


图 4 交圈时间与冻结管间距关系图
Fig.4 Intersection time curve vs. interval of freezing pipes

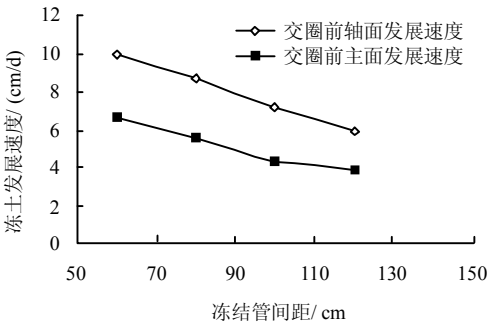


图 5 交圈前冻土发展速度与冻结管间距关系图
Fig.5 Freezing soil development vs. interval of freezing pipes before intersection

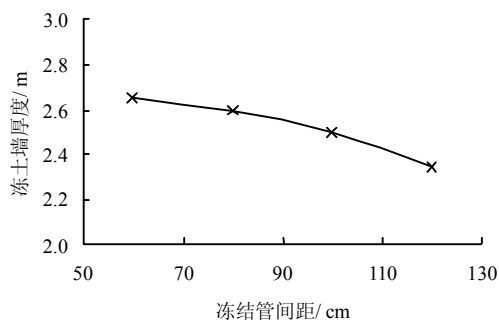


图 6 冻土墙厚度与冻结管间距关系图

Fig.6 Thickness of freezing wall vs. freezing pipes

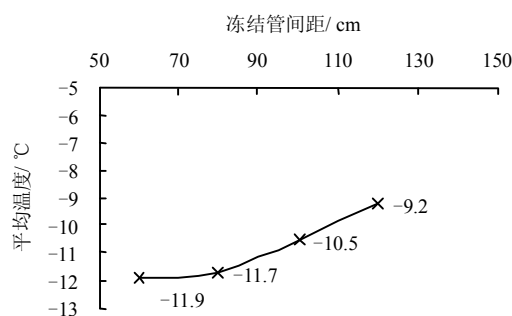


图 7 冻土墙平均温度与冻结管间距关系图

Fig.7 Average temperature of freezing wall vs. interval of freezing pipes

表 2 冻土柱交圈后冻土发展速度表

Table 2 Freezing soil development after intersection

盐水温度 /°C	冻土墙发展速度/(cm/d)		冻土扩展速度/(cm/d)	
	主面	界面	主面	界面
60	5.2	5.9	2.60	2.95
80	5.1	5.7	2.56	2.85
100	4.4	5.1	2.20	2.56
120	3.4	4.4	1.70	2.20

当冻结管间距 ≥ 80 cm 时, 其对冻土交圈时间的影响较冻结管间距 < 80 cm 时大(图 4); 交圈前受相邻冻结管影响轴面方向的冻土发展速度要快于主面方向; 交圈后由于前期界面处冻土发展速度要明显快于主面处的发展速度, 之后冻结锋面很快在界面和主面上趋于一致, 并以平壁状共同向外扩展。根据图 6、7 可知, 在下部粉质黏土层中, 当冻结管间距为 110 cm 时, 虽然冻土墙厚度也能达到设计要求, 但此时冻结壁平均温度大于 -10°C , 将会导致开挖过程中冻土墙力学性能低于设计要求, 而当开孔间距大于等于 60 cm, 根据设计钻孔偏斜倾角计算得到东西端头冻结管终孔间距均大于等于 120 cm, 无法满足平均温度的设计要求。

4.2 盐水温度设计的分析

利用图 3 所示的有限元模型, 将冻结管间距固

定为 100 cm, 对冻结管施加温度荷载, 分别取去路盐水温度为 -26 、 -28 、 -30 、 -32 、 -34°C , 分析不同温度荷载对冻结后平均温度及外侧冻土平均发展速度的影响。结果如图 8~11 所示。

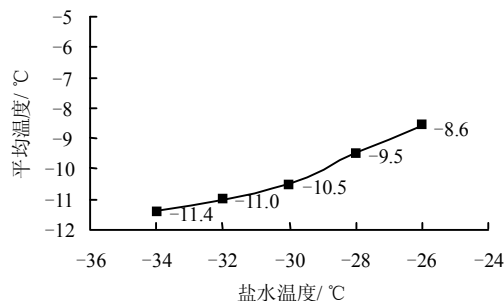


图 8 冻土壁平均温度随盐水温度变化曲线

Fig.8 Average temperature of freezing wall vs. brine temperature

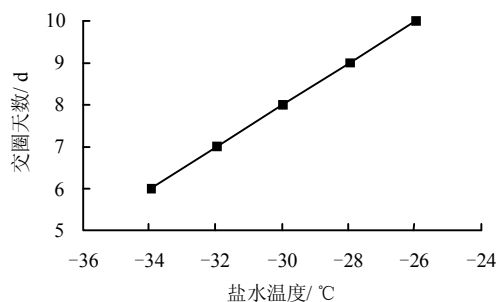


图 9 冻土交圈时间随盐水温度变化曲线

Fig.9 Intersection time curve vs. brine temperature

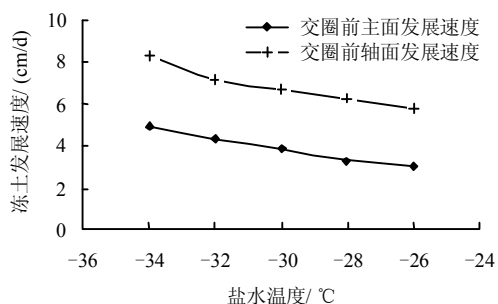


图 10 交圈前冻土发展速度与盐水温度关系图

Fig.10 Freezing soil development vs. brine temperature before intersection

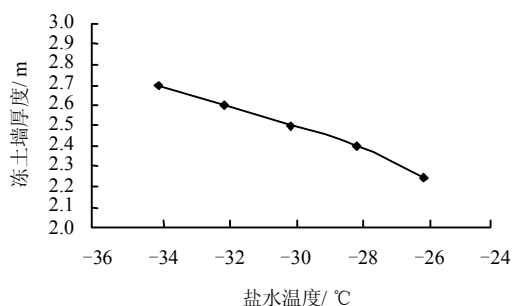


图 11 冻土墙厚度与盐水温度关系图

Fig.11 Thickness of freezing wall vs. brine temperature

图 8 表明: 当盐水温度由 -26°C 分别降至 -28°C 、 -30°C 时, 相应的冻土壁平均温度分别下降了 0.9°C 、 1.0°C ; 而当盐水温度继续下降时, 冻土壁平均温度降幅减缓。可见, 在盐水温度区间 $-30^{\circ}\text{C}\sim-34^{\circ}\text{C}$ 之间单纯依靠降低冷媒温度来获得更低的冻土壁平均温度效率较低。

图 9 表明: 仅依靠降低冷媒温度可以在一定程度上缩短交圈时间。无论冷媒温度如何改变, 在交圈前冻土柱主面上的发展速度与轴面上的发展速度曲线变化趋势基本保持一致 (图 10), 这说明两者具有某种比例关系, 经计算主面冻土发展速度约为轴面发展速度的 0.6 倍。冻土墙厚度与冷媒温度呈线性关系, 盐水温度每下降 2°C , 冻土墙厚度约增厚 10 cm 。表 3 为冻土柱交圈后主面与界面处冻土平均发展速度, 盐水入口温度由 -26°C 降低到 -34°C , 主面上和界面上的冻土发展速度分别增加了 0.3 cm/d 和 0.45 cm/d , 按照冻结 50 d 计算, 降低盐水温度导致的冻土壁厚度增加约为 15 cm 左右, 影响并不十分明显。

表 3 冻土柱交圈后冻土发展速度表

Table 3 Freezing soil development after intersection

盐水温度 / $^{\circ}\text{C}$	冻土墙发展速度/(cm/d)		冻土扩展速度/(cm/d)	
	主面	界面	主面	界面
-26	4.2	4.8	2.1	2.40
-28	4.4	5.2	2.2	2.62
-30	4.4	5.1	2.2	2.56
-32	4.6	5.7	2.3	2.84
-34	4.8	5.5	2.4	2.75

4.3 冻结管直径设计的分析

在人工冻结施工过程中常用的冻结管直径有 89 、 108 、 127 cm 三种, 89 cm 的冻结管一般用于水平冻结工程, 而 127 cm 的冻结管一般用于冻深较深的地面垂直冻结工程, 由于本次垂直冻结是在隧道中进行, 考虑到空间条件有限且为了节约成本, 因此, 有必要讨论小直径冻结管运用的可能性。本节利用数值方法分析采用不同直径的冻结管对冻结效果的影响, 计算结果如图 12~15、表 4。

由计算结果可以看出, 在冻深较浅的情况下, 采用 89 cm 小直径冻结管进行供冷与采用 127 cm 大直径冻结管进行供冷对冻土柱交圈时间、冻土发展速率、冻结壁厚度和平均温度的影响较小。

4.4 参数优化与合理确定

结合初步设计方案, 根据对冻结参数的敏感性分析, 最终建议冻结方案如下: ①隧道南北侧冻结

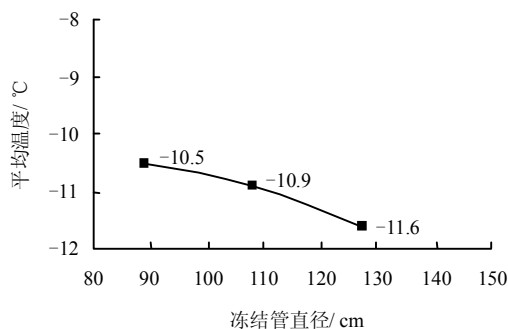


图 12 冻土壁平均温度随管径变化曲线

Fig.12 Average temperature of freezing wall vs. diameter of freezing pipes

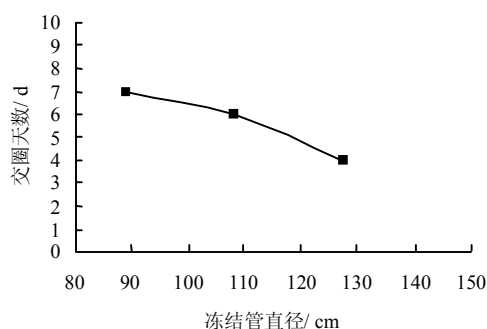


图 13 冻土交圈时间随管径变化曲线

Fig.13 Intersection time curve vs. diameter of freezing pipes

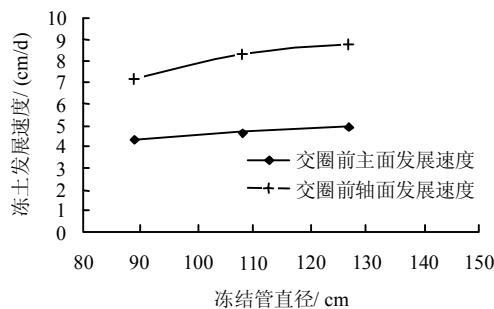


图 14 交圈前冻土发展速度与管径关系图

Fig.10 Freezing soil development vs. diameter of freezing pipes

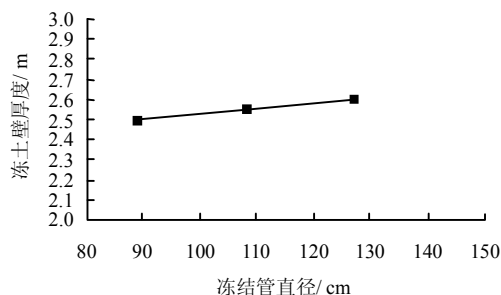


图 15 冻土墙厚度与管径关系图

Fig.15 Thickness of freezing wall vs. diameter of freezing pipes

表 4 冻土柱交圈后冻土发展速度表

Table 4 Freezing soil development after intersection

冻结管直径 / cm	冻土墙发展速度/(cm/d)		冻土扩展速度/(cm/d)	
	主面	界面	主面	界面
89	4.4	5.1	2.20	2.56
108	5.1	5.5	2.55	2.72
127	5.8	6.4	2.90	3.20

管采用 $\phi 89$ mm 直径冻结管, 设计冻结孔间距为 80~100 cm。由于隧道南侧已经产生粉土失稳情况, 为增加冻结加固安全系数南侧冻结孔间距设计为 80 cm, 北侧设计为 100 cm。②隧道东西端采用 $\phi 89$ mm 直径冻结管, 开孔间距应为 60 cm, 仰俯角从 $0^\circ \sim -62^\circ$, 倾斜孔深最大为 8 m, 最浅为 3 m, 终孔间距必须控制在 100 cm 以内。③设计盐水温度不必过低, 积极冻结期为 -30°C 。④由于本工程未冻断面区域较大, 除了按常规设置泄压孔和测温孔外, 还建议在隧道两端各设水文孔 1 个, 共 2 个。

4.5 计算结果与实测对比

在冻结过程中布置了 C1~C8 共 8 个测温孔进行温度监测。选取 C6 测温孔的实测数据与最终设计方案的数值模拟结果进行对比分析, 结果如图 16。实测与数值模拟得到的降温曲线趋势较为一致, 计算值略低于实测值约 $2\sim 3^\circ\text{C}$ 。主要是以下几点原因造成的:

(1) 数值计算采用 2D 模型, 忽略了来自土体其他方向的热量传导。

(2) 土体冻结过程中, 附近地下水的流动时常带走冻结冷量, 使实际土体降温曲线略有波动。因此, 在人工冻结工程中应探明地下动水情况, 当动水流速较快时应慎用人工冻结法施工或者采取相应措施隔绝冻土帷幕与地下水之间的水力联系。

(3) 数值模型把土体视为各向同性均质实体材料, 而实际情况下土体中大大小小的空洞会阻碍冷量的传导。

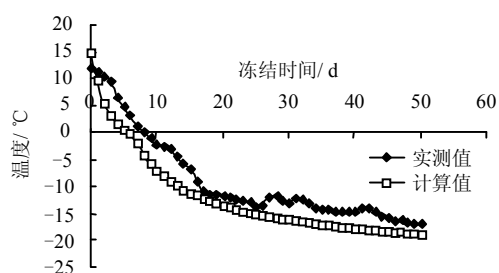


图 16 C6 测温孔实测与计算值对比

Fig.16 Comparison between calculation value with measured values in C6

5 结 论

(1) 隧道浅埋暗挖施工穿越薄富含水层, 采用隧道下台阶人工冻结形成止水支护结构后, 人工开挖作为新工法是安全可靠的。

(2) 在粉质黏土层中当冻结管间距大于 110 cm 时, 冻结壁平均温度达不到 -10°C (设计要求冻结壁平均温度 $\leq 10^\circ\text{C}$)。

(3) 在盐水温度区间 $-30\sim -34^\circ\text{C}$ 之间靠降低冷媒温度来获得更低的冻土壁平均温度, 其效率比较低。当盐水温度高于 -29°C 时, 获得的冻结壁平均温度高于 -10°C 。

(4) 在隧道内施工下台阶垂直冻结孔时, 考虑到空间条件有限和节约能源的要求, 可以采用 89 cm 直径的冻结管作为冻结器。

(5) 通过与现场冻结温度的实测对比表明: 由于冻结工程中影响温度变化的外界条件比较复杂, 因此, 采用数值分析获得的温度预测结果比实测值低 $2\sim 3^\circ\text{C}$, 但两者降温趋势一致, 证明所建立的数值模型基本是可信的。

(6) 实践证明本工法应用很成功, 可在类似工程中推广使用。

参 考 文 献

- [1] YANG Ping, ZHU Feng-bin. Application of freezing method to recover tunnel accident in complex stratum of Nanjing subway[C]//International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation & Rehabilitation. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2005.
- [2] YANG Ping, KE Jie-ming, WANG J G, 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): 330-340.
- [3] 余占奎, 黄宏伟, 王如路, 等. 人工冻结技术在上海地铁施工中的应用[J]. 冰川冻土, 2005, 27(4): 550-556. SHE Zhan-kui, HUANG Hong-wei, WANG Ru-lu, et al. Application of artificial freezing method in Shanghai subway[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(4): 550-556.
- [4] 杨平, 余才高, 董朝文, 等. 人工冻结法在南京地铁张园车站的应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊 2): 388-391. YANG Ping, SHE Cai-gao, DONG Chao-wen, et al. Application of artificial freezing method in Zhang Fuyuan station of Nanjing subway's[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(Supp.2): 388-391.
- [5] 周晓敏, 王梦恕, 陶龙光, 等. 北京地铁隧道水平冻结和暗挖施工模型试验与实测研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 767-779. ZHOU Xiao-min, WANG Meng-shu, TAO Guang-long, et al. Model test and prototype observation on artificial ground freezing and tunneling of Beijing subway[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(6): 767-779.
- [6] SANG SAYLES. Thermal and theoretical computations for artificially frozen ground construction[C]//In Ground Freezing: Developments in Geotechnical Engineering. Amsterdam: Elsevier, 1979: 311-317.