

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0048

DUAN Yin, RONG Chuanxin, CHENG Hua, et al. Model test of freezing temperature field of the freeze-sealing pipe roof method under different pipe arrangements[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2):479-490. [段寅, 荣传新, 程桦, 等. 不同顶管组合方式的管幕冻结温度场模型试验[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2):479-490.]

不同顶管组合方式的管幕冻结温度场模型试验

段 寅^{1,2}, 荣传新¹, 程 桦¹, 蔡海兵¹, 解德柱¹, 丁杨龙³

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 淮南联合大学 建筑工程系, 安徽 淮南 232038;

3. 中煤特殊凿井有限责任公司, 安徽 合肥 230000)

摘 要: 拱北隧道作为港珠澳大桥珠海连接线的关键性工程, 在国内外首次成功运用了管幕冻结技术。以此为背景, 为更加全面地掌握饱和软土地层中管幕冻结温度场的分布特点, 开展了不同顶管组合方式下的管幕冻结温度场模型试验研究。试验结果表明: 各测点温度曲线在积极冻结期前4 h急剧下降, 随后逐渐减缓, 降至砂土冰点后趋于平稳, 三种布管方式均满足冻结设计要求; 冻结管中低温盐水提供的冷量首先传递给顶管管壁, 再以“面”的形式均匀地传递给周围土体; 积极冻结21 h后, 采用四根空顶管组合的C区冻结壁竖向范围最大, 空管管壁正上方冻结壁平均厚度约为105 mm, 在满足管幕刚度设计要求的前提下, 可采此布管方式以达到快速形成冻结帷幕的目的。限位管开启后的4 h内, 实顶管中线垂直距离100 mm范围内测点温度曲线虽有明显回升但仍维持在冻土冰点以下, 超出此范围后温度变化影响逐渐减弱, 且顶管间冻结壁稳定存在, 表明限位管在满足管间有效封水的条件下, 能在一定范围内起到定向限制地层冻胀的作用。优化后的双圆形冻结管在满足冻结设计要求的同时, 更加便于安装且经济环保。

关键词: 管幕冻结法; 相似模型试验; 温度场; 顶管组合方式; 拱北隧道; 港珠澳大桥

中图分类号: U455.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)02-0479-12

0 引言

随着我国城市交通建设的持续推进, 地下空间的开发与利用越来越受到工程人员的重视^[1]。其中, 地下交通隧道工程结构可以有效缓解城市地面交通的压力^[2], 目前各大城市地区的地下隧道建设都进入了一个高峰期^[3]。隧道施工众多加固工法中, 以人工冻结(AGF)加固较为常见, 且适用于南方地区软弱富含水砂层止水加固^[4], 并在富水地层的隧道开挖施工中已具有广泛的应用背景和成熟经验^[5], 现已成为一种可行的和极具竞争力的软土及不稳定含水地层加固、隔水的有效施工方法^[6-7]。但学术界也发现该方法存在着“冻胀融沉”效应^[8-9], 对施工环境影响较大。申艳军等^[10]开展了

缺陷空间岩土体内部冻胀力发生机制及演化规律分析, 并指出目前该领域研究相对薄弱。Lü等^[11]推导了隧道冻胀力的弹塑性解析解并通过实测数据进行了验证, 使理论计算更符合实际工程。

管幕法(PRM)在控制地面沉降、减少对周围环境影响方面更有效, 在软土层中优势更加明显^[12]。然而在饱和软土地区, 顶管之间的封水技术仍不够完善, 多数隧道工程均将管间封水效果不佳列为管幕法施工主要风险源之一^[13]。由于地下工程施工条件与技术的复杂性, 使得单一的隧道围岩预加固施工技术往往难以实现工程设计要求, 需要创新方法, 使用多种工程施工技术组合, 解决难题, 满足实际需求。德国柏林U55地铁隧道曾采用“管棚+冻结”的工法, 在钢管内布置冻结管

收稿日期: 2019-07-26; 修订日期: 2020-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878005); 安徽省重点研究与开发计划项目(1704a0802127)资助

作者简介: 段寅(1986-), 男, 安徽合肥人, 讲师, 2013年在合肥工业大学获硕士学位, 现为安徽理工大学博士研究生, 从事岩土工程研究. E-mail: 2905444675@qq.com

通信作者: 荣传新, 教授, 从事岩土工程研究. E-mail: chxrong@aust.edu.cn.

并填充混凝土,对隧道围岩进行冻结,取得良好的施工效果^[14]。周晓敏等^[15]开展了关于“冻土+管棚”复合结构的承载性能研究综述,指出两者结合的工法既能确保承载力和刚度,又能减少冻土工程量并降低成本,是一种值得探索应用的方法。森内浩史等^[16]针对“钢管+止水冻土”梁的力学性质问题进行了试验研究,考察了冻土与顶管复合结构间的黏聚力。上述研究仅将冻土作为结构体考虑,顶管只是为了提高冻土结构的整体承载性能而存在,管间距离远大于直径,且实际工程案例极少。

目前国内学者提出将“管幕”与“冻结”进行互补,在由大直径钢管组合的管幕间利用冻土进行密封止水,充分结合管幕承载力高和冻土水密性好的特点,形成新型“管幕冻结法”。目前该方法的研究和实施在国内尚处于起步阶段,科研人员从理论计算^[17]、相似模型试验^[18-19]以及数值模拟^[20]三个方面对管幕冻结法的冻结效果与应用等问题进行了研究,验证了该方法的理论可靠性;李志宏等^[21]对由于施工热扰动(开挖施工、衬砌混凝土浇筑)导致的冻结止水帷幕弱化作用进行了研究;李剑等^[22]利用数值模拟手段对积极冻结期不同土层的冻结效果及圆形冻结管、异形冻结管开启时间进行了研究;胡俊等^[23]和张军等^[24]通过数值计算方法对管幕冻结法温度场和限位管作用效果进行了模拟分析,并

且对比了不同管幕填充形式^[25]。“管幕冻结法”首次应用于港珠澳大桥珠海连接线拱北隧道工程中,本文以此为背景,根据已有的研究基础^[26],提出了多种形式的顶管组合方式,设计模型试验来研究不同顶管组合形式下的管幕冻结温度场变化特点,为类似工法的推广应用提供参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

拱北隧道是港珠澳大桥珠海连接线的控制性工程,其暗挖段施工地点位于拱北口岸限定区域,长度为255 m,平面线型曲率半径 R 为885.852~906.298 m,开挖断面面积为337 m²,如图1所示。隧道顶部覆土最小厚度约为4~5 m,其余部位多为不均匀发育的饱和软弱土层,具有高压缩性和高渗透性,强度低且易导致基础不均匀沉降,地质条件较为复杂^[27]。对此研究人员提出了“管幕冻结法”的支护方案,即“管幕”+“冻结”的联合工法,利用顶管组成的管幕作为支护结构承受荷载,通过顶管内置冻结管,利用人工冻结技术形成顶管间的封水结构。管幕冻结法将“管幕法”和“人工冻结法”的优势充分结合起来,既保留了管幕法在大断面隧道暗挖施工中的优点,也结合了人工冻结法针对隧道周围饱和软弱地层止水效果好的特点,是地下隧道建设的新方法,如图2所示。

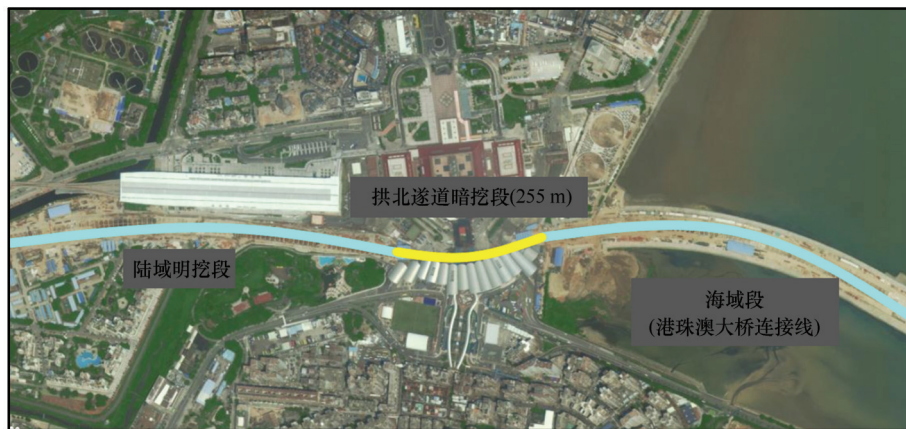


图1 拱北隧道平面图

Fig. 1 Layout plan of the Gongbei Tunnel

1.2 管幕冻结法设计方案

在拱北隧道暗挖工程中,由36根顶管组成“管幕”,如图2所示。其中奇数管为填充了混凝土的实顶管,实管内左右两侧安装有圆形主力冻结管,用于冻结管间土层;在远离开挖面的一侧安装限位

管,在冻结施工后期通过在限位管内进行热盐水循环来控制冻结壁的过度发展,限制地层的冻胀。偶数管为空顶管,管内左右两侧安装异形加强冻结管,用于加强管间冻结;由于空顶管内未填充混凝土,其导热性能略差于混凝土实管,在施工过程中

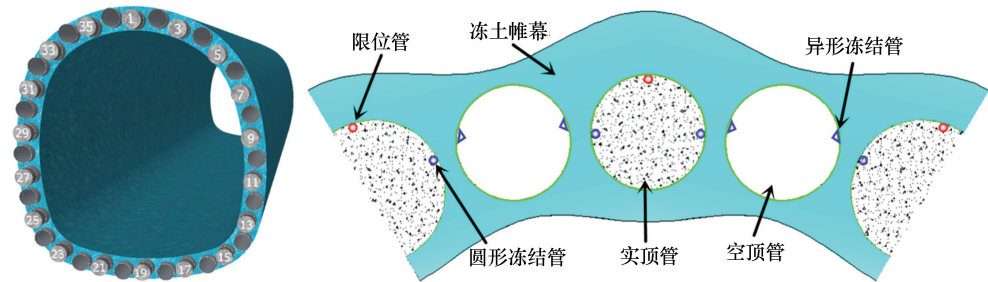


图2 管幕冻结法示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the Freeze-Sealing Pipe Roof Method

主要作为冻结监测和检修的通道。冻结施工期间，施工方发现存在以下几点问题：首先，由于拱北隧道水平线型有一定曲率且异形冻结管采用角钢形式焊接在空顶管内壁上，加工与安装难度较大，焊缝较多且存在大量的仰焊，对焊接工艺要求极高；其次，施工人员长期在通风条件差的封闭环境内进行焊接作业，产生的有害气体严重影响人员健康和环境；最后，焊缝强度低导致冷冻液易泄露，后期的维护成本较大，本文针对这些问题提出了相应的异形管优化方案。

2 模型试验

2.1 相似准则与试验材料

根据试验条件，本次试验的几何相似比取 $C_l=10$ 。由于模型试验的重点是研究管幕冻结法中冻结温度场分布规律，试验土层材料根据工程现场情况，选取其中一种饱和砂土进行重制，确保土体、顶管和混凝土等材料与实际工程保持一致，根据柯索维奇准则和傅里叶准则可以得到^[28-30]：

$$C_c = C_a = C_t = 1 \tag{1}$$

$$C_\tau = C_l^2 \tag{2}$$

式中： C_c 为比热相似比； C_a 为导热系数相似比； C_t

为温度相似比； C_τ 为时间相似比； C_l 为几何相似比。

试验中冻结系统冷媒采用与工程现场相同的盐水溶液，可得：

$$v' = C_l v \tag{3}$$

式中： v' 为模型冻结管内盐水流速， $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ； v 为实际工程中冻结管内盐水流速， $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

根据几何相似比，并结合市售管材型号进行微调，得到顶管与冻结管尺寸如表1所示，流速与流量参数如表2所示，通过室内试验得到主要材料物理参数如表3所示。

表1 顶管及冻结管尺寸

Table1 Dimensions of the pipe and the freezing-tube		
名称	原型尺寸/mm	模型尺寸/mm
顶管(直径)	1 620	159
圆形冻结管(直径)	80	8
限位管(直径)	80	8

表2 流速参数

Table 2 Flow velocity parameters		
名称	工程参数(单管)	试验参数(单管)
管径/mm	80	8
流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	5.0	0.5
流速/ $(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	16.58	165.80

表3 试验材料物理参数

Table 3 Physical parameters of the test materials					
试验材料	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	含水量/%	比热容/ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	导热系数/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	冰点/ $^{\circ}\text{C}$
饱和砂土	1 435	40.29	1 372	1.475	-0.5
C30混凝土	2 450		920	1.950	
钢管	7 850		318	60.000	

2.2 顶管组合与测温点布置

本试验设计了两种形式的顶管：填充C30混凝土的实顶管和未填充混凝土的空顶管。实顶管内水平两侧各布置1根冻结管，上下侧各布置1根限位管，用C30细石混凝土进行填充；空顶管内水平

两侧各布置2根冻结管，用来代替工程原型中的异形冻结管，并用水泥砂浆包裹；所有冻结管和限位管均采用直径为8 mm的紫铜管，如图3所示。

由于实际工程中的管幕形式较为复杂，在试验中进行了适当简化，取部分实顶管和空顶管进行水

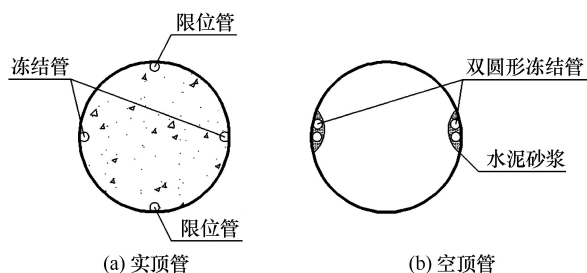


图3 顶管设计示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the concrete pipes and hollow pipes

平布置,共设计了三种顶管组合方式,分别为:

- (1)四根实顶管组合(试验A区);
- (2)两根实顶管和两根空顶管交替布置(试验B区);
- (3)四根空顶管组合(试验C区)。

相邻顶管水平间距为50 mm,为研究管幕上下侧及管间温度场变化规律,每个试验区均在顶管的上下侧及管间中线处布置了测温点。其中试验B区考虑到顶管为交替组合形式,在竖向设置了三列测温点。所有相邻测温点的竖向间距均为50 mm,如图4所示。

2.3 模型箱体设计

模型管幕的水平长度为1.5 m,分三个试验区安装在箱体中。箱体尺寸为1.2 m × 1.5 m × 4.5 m,采用6 mm厚钢板焊接制成;箱体内部铺设保温材料,相邻试验区设有隔断。所有顶管均水平安装在箱体中心,顶管中心离地高度为0.6 m,如图5所示。

2.4 温度采集与冻结系统

本试验设计了两套温度采集系统进行温度数据采集。主采集系统为TDS-630多点数据采集仪,利用热电偶串采集温度;辅助采集系统为CW-500型数字测温仪,在试验过程中进行辅助采集以防止主系统异常。两套系统的测点以对称方式布置于管幕中轴线两侧,如图6所示,以保证试验数据的准确性和可靠度。

试验制冷系统采用在建矿井项目部冻结站设备。顶管内每根冻结管都有独立的开关,并与进、回液总管连接,总管安装SKLD-80F型电磁流量计控制总流量。根据拱北隧道冻结施工现场资料,实际工程中冻结温度控制在-25 ~ -28 ℃范围内,故试验冻结系统温度设定为-25 ℃。同时考虑限位热盐水试验,实顶管内的限位管单独另接专用盐水箱,箱内装有恒温加热器,可以单独进行限位管内

热盐水循环。

2.5 试验过程

(1)冻结开始前,记录测试的时间、环境温度,测定箱体内砂土的初始温度等数据。

(2)开启制冷系统进行制冷,使低温盐水箱内的盐水温度全面下降至设计温度(-25 ℃)。

(3)低温盐水系统开始循环,进行所有试验区的一次性积极冻结,测试系统全面工作,定时监控温度数据,直至试验结束。根据拱北隧道管幕冻结设计文件规定的最小平均冻土帷幕厚度为2.0 ~ 2.6 m,由几何相似比可知试验以顶管上方50 mm处测温点温度降到-0.5 ℃以下为准,此时冻结壁厚度满足设计要求。

(4)根据拱北隧道管幕冻结施工组织设计文件,实际冻结时间约为180天,其中积极冻结期约为90天,根据时间相似比将试验总体冻结时间定为42 h,积极冻结时间为21 h。为研究限位管效果,另做限位管试验,在积极冻结至21 h时,开启恒温加热器,加热温度设置为7 ℃,进行限位管内的热盐水循环。

(5)冻结至规定试验时间后,冷冻机组停止供冷,在圆形冻结管内循环常温盐水,所有试验区进入强制解冻期,直至饱和砂土恢复至常温,根据测点温度数据控制解冻时间。

3 结果分析

3.1 积极冻结期温度场分析

以试验A区实顶管中轴线0#~3#测温点为例,绘制“温度-时间”曲线,如图7所示,图中水平虚线为砂土冰点(-0.5 ℃),各测点温度数据如表4所示。

由图7和表4可以看出,积极冻结期前4 h,各测点温度急剧下降,3#测点距离顶管管壁最近,温度曲线近似于垂直,平均温降速率为5.52 ℃·h⁻¹;其余各点由于逐渐远离顶管,温度曲线依次变缓。冻结至21 h时,实顶管上方50 mm处的2#测点温度为-2.9 ℃,满足试验冻结设计要求。随着冻结的持续进行,各测点温度依次降至砂土冰点(-0.5 ℃)以下,温度曲线逐渐趋于平缓。与冻结管等距测点的温度变化几乎相同,表明温度是随着冻结范围的大小而变化的,即冻结管与测温点的温差与距离成正比关系。试验B区和C区的温度-时间曲线与A区相同,均满足冻结设计要求。

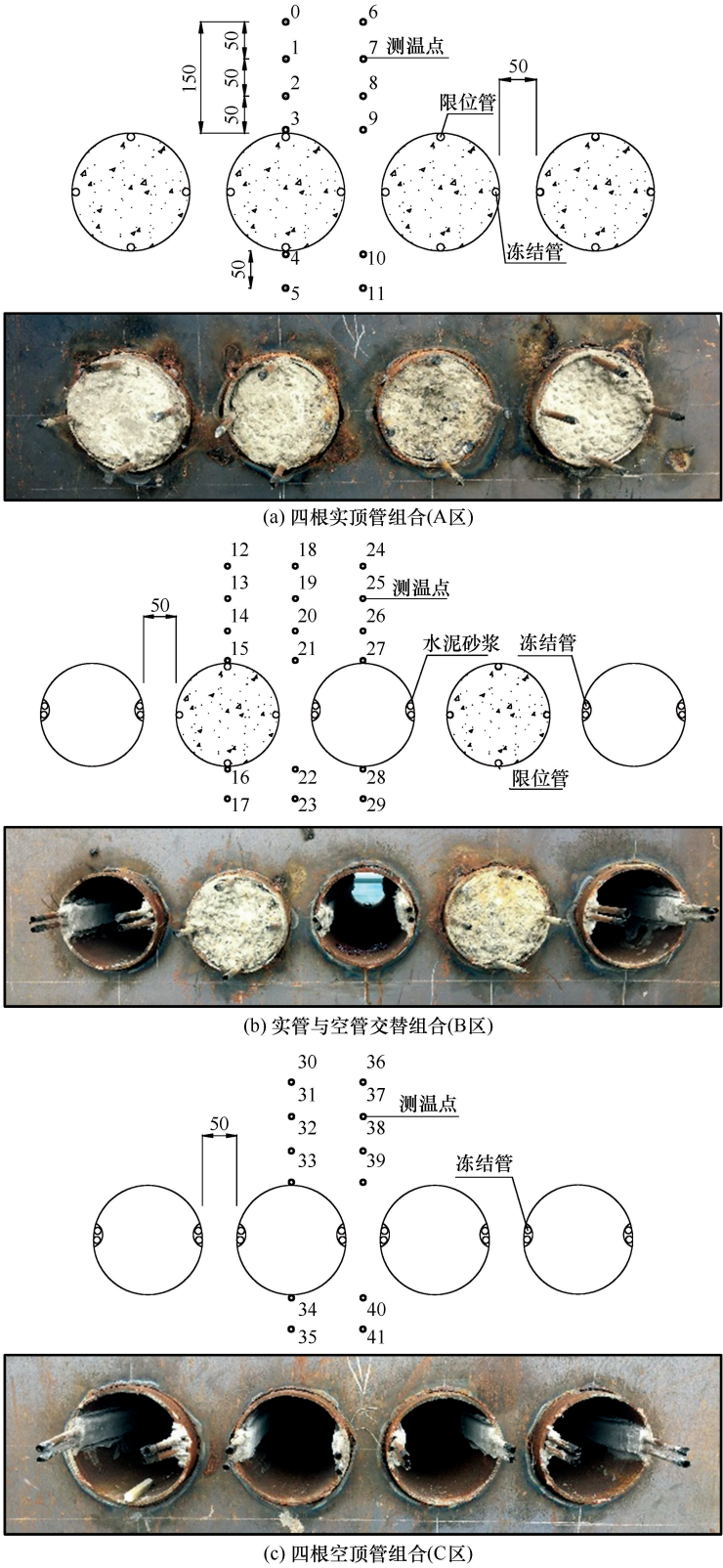


图4 顶管组合和测温点布置(单位: mm)

Fig. 4 Arrangement of the pipes and the temperature monitoring points (mm): four hollow jacking pipe combinations (Area A) (a), alternating combination of concrete pipes and hollow pipes (Area B) (b), and four hollow jacking pipe combinations (Area C) (c)

由图8可知, 各区顶管间测点温度随时间变化的趋势是一致的, 温降速率呈现出前期大于后期的

特性。A区和B区温度变化相差很小, 距冻结管越远, 两区对应位置的测点温度差异越小。C区的温

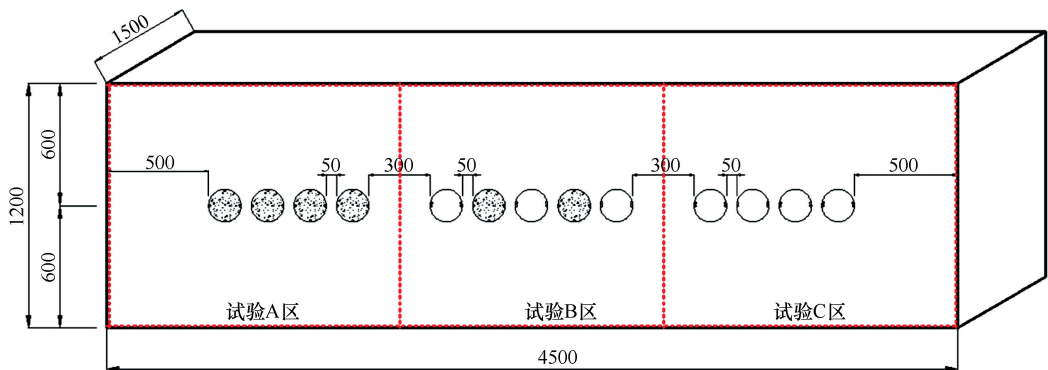


图5 模型箱体(单位: mm)

Fig. 5 Arrangement in the test model box (unit: mm)

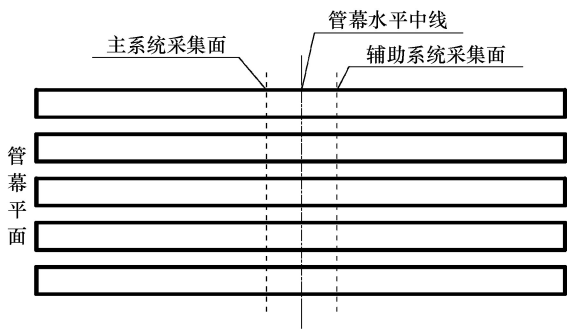


图6 温度采集系统布置

Fig. 6 Layout of the temperature monitoring system

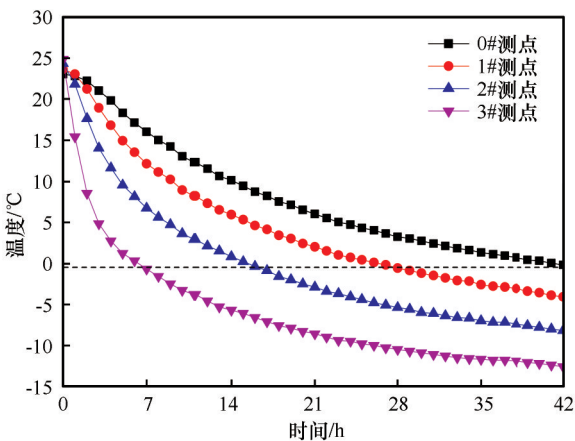


图7 试验A区0#~3#测温点“温度-时间”曲线

Fig. 7 Hourly variations of temperatures at Points 0, 1, 2 and 3 in Area A

表4 积极冻结期试验A区测点温度数据

Table 4 Temperatures at the four monitoring points in Area A during active freezing period

项目	0#	1#	2#	3#
0 h 温度/℃	23.0	23.6	24.3	24.8
21 h 温度/℃	6.0	2.0	-2.9	-6.6
变化速率/(℃·h ⁻¹)	0.8	1.03	1.3	1.5

注: 变化速率值为0 h 温度与21 h 温度的差值与时间之比, 正值代表降温。

度下降幅度明显大于A区和B区, 21 h时, C区与A区、B区相同位置测点温差由远至近分别为1.9℃、2.65℃、3.6℃和4.95℃。从顶管间上方测温点分析可知: C区冻结壁发展最快, A区和B区基本相同。

取三个试验区在冻结21小时的温度数据作温度场等值线图, 红线为-0.5℃等温线, 如图9所示。

由图9可知, 由于顶管与冻结管的水平对称布置, A区和C区的冻结壁发展在水平方向呈现出均匀对称的现象, 而B区冻结壁发展偏向于空顶管。C区冻结壁竖向范围最大, 空管管壁正上方冻结壁平均厚度约为105 mm; 其次是B区, 实管管壁正上方冻结壁厚度约为80 mm, 空管管壁正上方冻结壁厚度约为90 mm; 最小的是A区, 实管管壁正上方冻结壁厚度约为70 mm。因此, 在满足管幕刚度设计要求的前提下, 施工中可采取C区的顶管组合方式, 以达到快速形成冻结帷幕的目的。

3.2 限位管开启后温度场分析

A区和B区的实顶管内安装了限位管, 通过限位管开启后温度随时间的变化曲线来分析其温度变化特点, 如图10所示, 各图中水平虚线为砂土冰点(-0.5℃), 垂直虚线为限位管开启时间(21 h)。

由图10(b)和10(d)可知, 限位管开启后, 在21~25 h时间段, 顶管间0 mm测点和50 mm测点的温度曲线出现明显的跃升现象, 但仍然维持在砂土冰点以下(-0.5℃), 100 mm测点温度曲线仅有轻微变化并在之后趋于平稳, 150 mm测点温度曲线则看不到明显的变化现象。横向对比图10(a)、10(c)和10(e)可知, 管间各测点温度曲线的变化规律与前者相似, 只是测点温度受限位管开

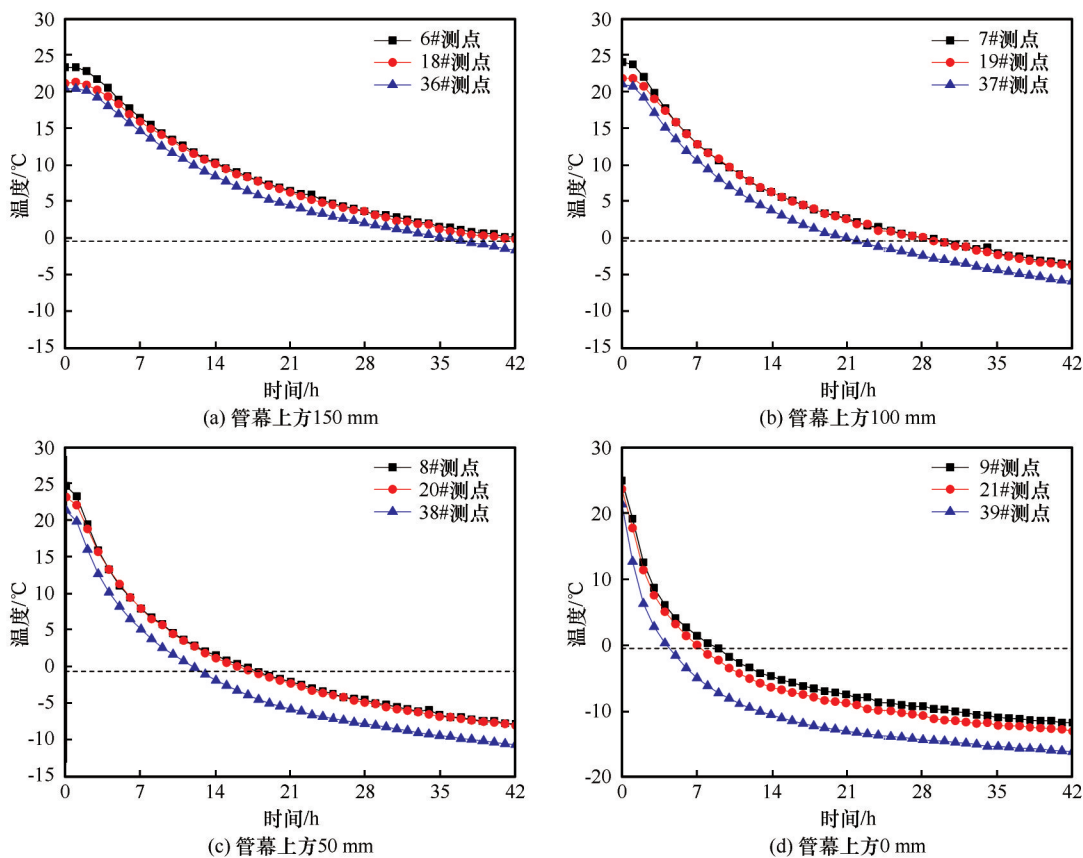
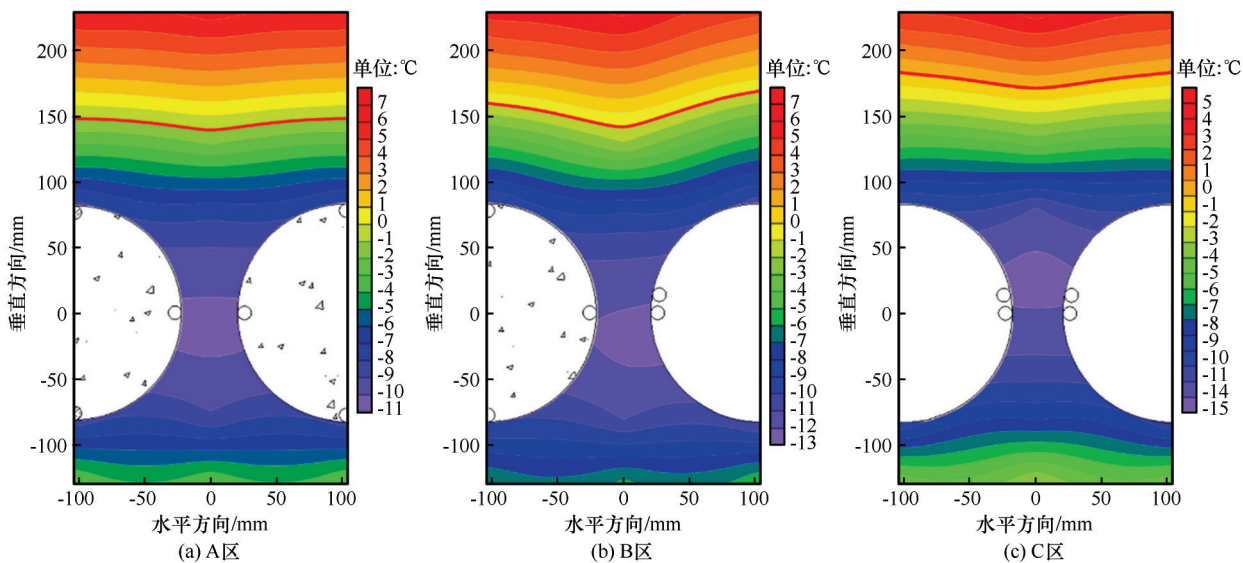


图8 积极冻结期各试验区顶管间测点温度-时间曲线

Fig. 8 The temperature-time curves of the monitoring points between pipes in active freezing period

图9 冻结至21 h时 -0.5°C 以下的温度场等值线图Fig. 9 Contours of the temperature field below -0.5°C after freezing for 21 h

启的影响逐渐减弱。限位管开启后的21~42 h时间段平均温度变化速率为负值(升温)的测点分别为: A区1#~3#, 温度变化速率为 $-0.01^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $-0.15^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $-0.31^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$, 8#~9#测点为 $-0.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $-0.22^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$; B区14#、15#和21#, 温度变化

速率为 $-0.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $-0.46^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $-0.15^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$, 其余测点温度变化速率均为正值(降温), 且距离限位管越近的测点, 升温速率越高, 表明距离限位管100 mm范围以内的区域升温较为明显, 限位管能起到较好的限制冻胀的作用。

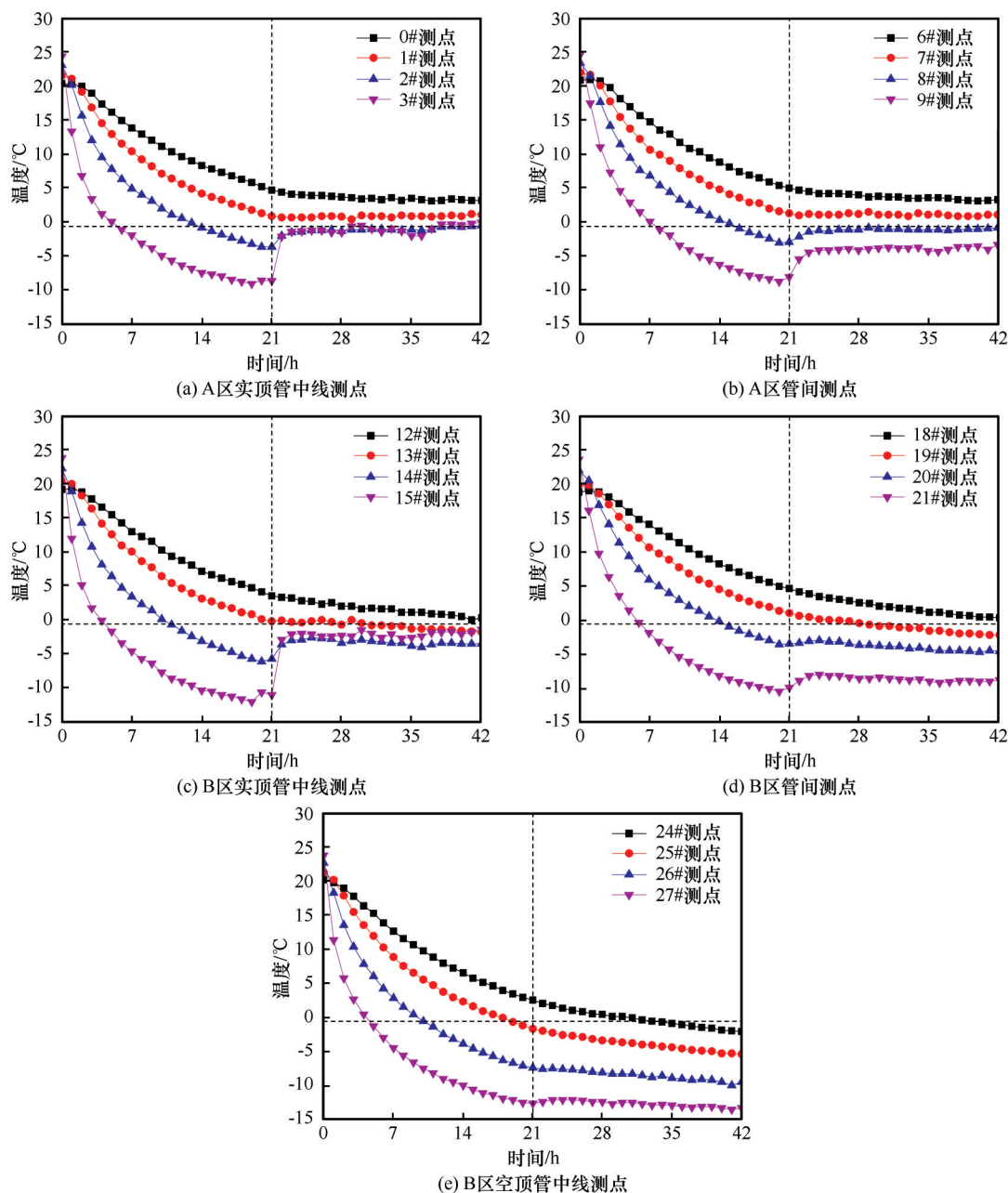


图10 限位管开启后各测点温度时间曲线

Fig. 10 Temperature-time curves of the monitoring points after the opening of limiting tube: at measuring point of center line of real concrete jacking pipe in Area A (a), at midline measuring point in Area A (b), at measuring point of center line of concrete jacking pipe in Area B (c), at midline measuring point in Area B (d), at measuring point of hollow jacking pipe in Area B (e)

由图 11 可知, 在 21 h 限位管开启后, A 区温度相对于 B 区具有明显的上升趋势, 由于 A 区为四根实顶管的组合, 每根顶管内均设有限位管, 因此相比于 B 区, 增加限位管的数量可以明显限制冻结帷幕的扩张; 在 21 ~ 25 h 时间段内, 温度曲线出现明显跃升, 表明限位管开启的早期, 对冻结温度的影响较大, 随着冻结的持续, 温度的变化逐渐趋于稳定。42 h 时, 两试验区管间中线相同位

置测点温差由远至近分别为 3.0 °C、3.3 °C、3.8 °C 和 5.5 °C。

由图 12 可见, 在维护冻结期 A 区温度场仍然保持基本对称和均匀, 限位管的开启使得温度场在同一水平高度上均匀地回升温度, 在保证顶管间冻结壁仍然稳定存在的同时, 较好地限制了实顶管上下侧冻结壁的扩张。而 B 区由于采用实顶管和空顶管交替布置的形式, 温度场的分布呈现出不均匀性,

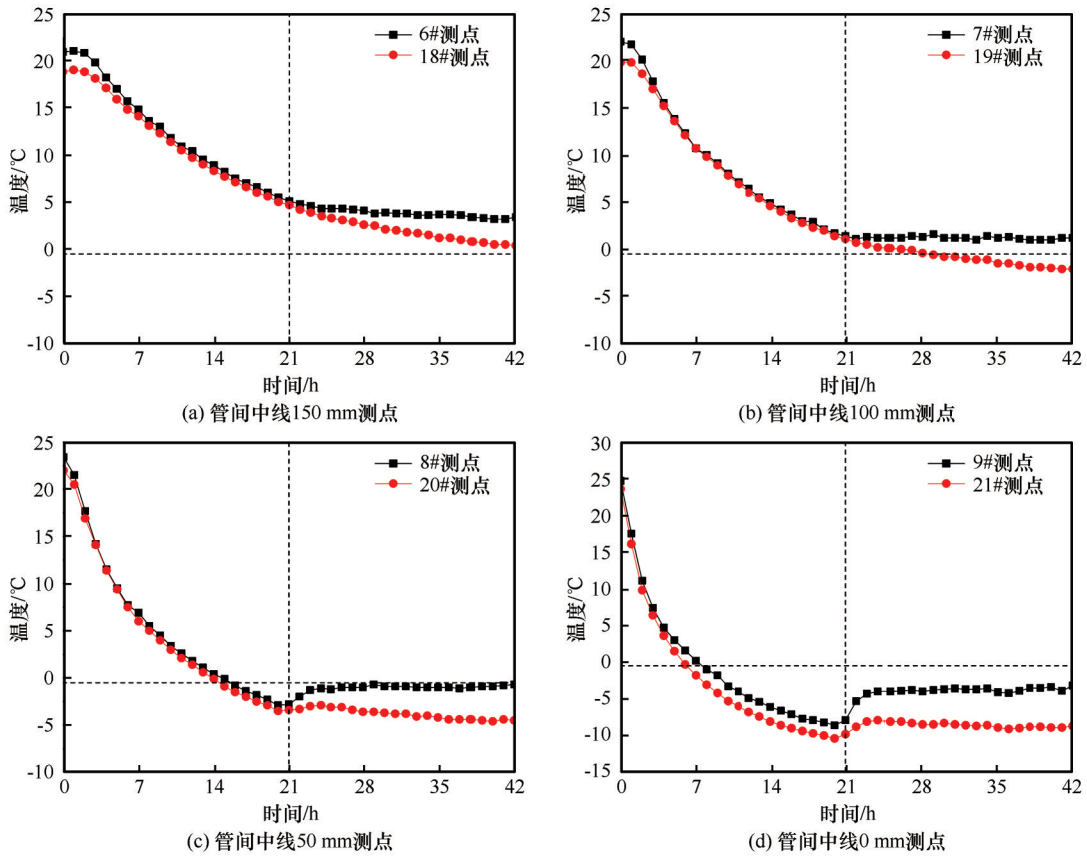


图 11 限位管开启后测点温度横向对比

Fig. 11 Temperature comparison of monitoring points after the opening of limiting tube: between Point 6 and Point 18 (a), Point 7 and Point 19 (b), Point 8 and Point 20 (c), Point 9 and Point 21 (d)

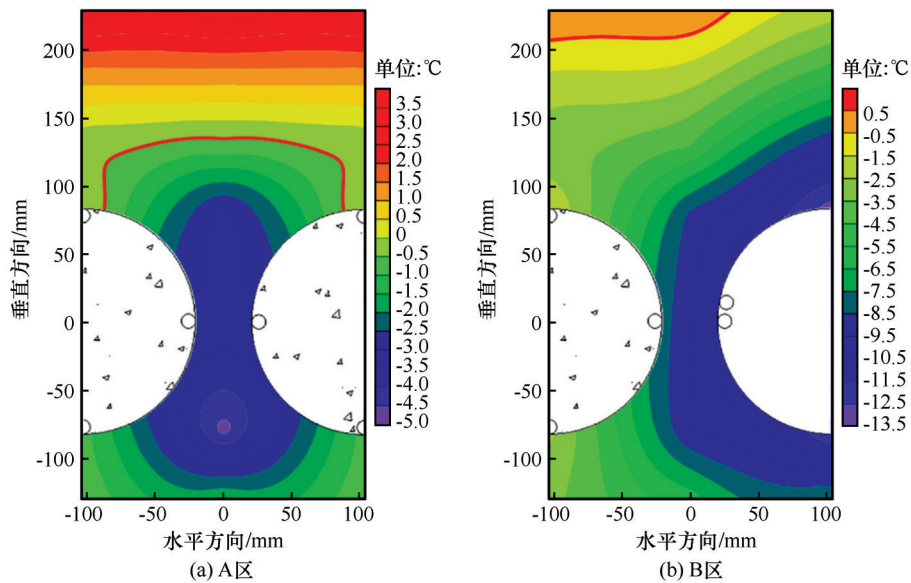


图 12 维护冻结期42小时等温线图

Fig. 12 The isotherm diagram at 42 hour of the freezing maintenance period: Area A (a), Area B (b)

同一水平面, 等温线呈倾斜状, 空顶管周围温度低于实顶管, 验证了限位管的作用范围是有限的, 对空顶管周围温度场发展没有明显的抑制作用。

4 结论

(1) 在积极冻结期, 温降速率前期较大, 随着冻结时间的持续, 温降速率逐渐降低, 温度曲线趋

于平缓。等距测点的温度变化基本相同,表明冻结管与测温点的温差与其之间的距离成正比关系。距离顶管较近的土体温度差异较大,随着测点逐渐远离顶管,各点温度差异逐渐减小,表明冻结冷量首先由冻结管传递给顶管管壁,再由顶管管壁以“面”的形式传递给远处土体。

(2) 由于顶管的对称布置,试验 A 区和 C 区冻结壁的发展和形状也保持对称性,而 B 区冻结壁的发展偏向于空顶管。积极冻结 21 h 后, C 区冻结壁竖向范围最大,空管管壁正上方冻结壁平均厚度约为 105 mm; 其次是 B 区,实管管壁正上方冻结壁厚度约为 80 mm,空管管壁正上方冻结壁厚度约为 90 mm; A 区冻结壁竖向范围最小,实管管壁正上方冻结壁厚度约为 70 mm。在满足管幕刚度设计要求的前提下,施工中可采取 C 区的顶管组合方式,以达到快速形成冻结帷幕的目的。

(3) 限位管在开启后的 4 h 内,距限位管较近的测点温度跃升明显;随着冻结的持续进行,温度变化逐渐趋于稳定。距离限位管大于 100 mm 的区域,温度在限位管开启后无明显回升现象,仅保持水平不变,部分测点温度缓慢下降,表明限位管对冻结壁扩展的抑制范围有限。在不同布管方式下,均可保证管间冻结壁的稳定形成,证明限位管在满足管间有效封水的条件下,能起到控制地层冻胀的效果。

(4) 针对异形管在实际工程中遇到的问题,提出了“由水泥砂浆包裹的双圆形冻结管”的改进方案。从试验结果和施工角度来看,由于采用水泥砂浆包裹,优化后的双圆形冻结管在满足冻结设计要求的同时更加便于安装,并且能够更好地适应类似于拱北隧道这种曲线型隧道水平冻结工程,同时可有效防止冻结过程中冷媒的泄露,更加经济与环保。

参考文献(References):

- [1] Qian Qihu, Rong Xiaoli. State, issues and relevant recommendations for security risk management of China's underground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 649 - 655. [钱七虎,戎晓力. 中国地下工程安全风险管理的现状、问题及相关建议[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 649 - 655.]
- [2] Tong Linxu. The way of development of urban underground space in China [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(1): 1 - 6. [童林旭. 中国城市地下空间的发展道路[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(1): 1 - 6.]
- [3] Wang Mengshu. An overview of development of railways, tunnels and underground works in China [J]. Tunnel Construction, 2010, 30(4): 351 - 364. [王梦恕. 中国铁路、隧道与地下空间发展概况[J]. 隧道建设, 2010, 30(4): 351 - 364.]
- [4] Shi Quanbin, Yang Ping, Zhang Yingming. Adfreezing strength at the interface between frozen soil and structure: research status and prospect [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(6): 1298 - 1306. [石泉彬,杨平,张英明. 冻土与结构接触面冻结强度研究现状与展望[J]. 冰川冻土, 2017, 39(6): 1298 - 1306.]
- [5] Cai Haibing, Cheng Hua, Peng Limin, et al. Model test on displacement field of double-route metro constructed with horizontal freezing method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2088 - 2095. [蔡海兵,程桦,彭立敏,等. 地铁双线隧道水平冻结位移场的模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2088 - 2095.]
- [6] Ma Wei, Wang Dayan. Studies on frozen soil mechanics in China in past 50 years and their prospect [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 625 - 640. [马巍,王大雁. 中国冻土力学研究 50 年回顾与展望[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 625 - 640.]
- [7] Yue Fengtian, Qiu Peiyun, Yang Guoxiang, et al. Numerical calculation of tunnel cross passage construction underneath river [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(6): 710 - 714. [岳丰田,仇培云,杨国祥,等. 越江隧道联络通道冻结法数值计算[J]. 煤炭学报, 2005, 30(6): 710 - 714.]
- [8] Ke Jieming, Yang Ping. The advance of research on the frost heave and thawing settlement of frozen soil [J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2004, 28(4): 105 - 108. [柯洁铭,杨平. 冻土冻胀融沉的研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28(4): 105 - 108.]
- [9] Yan Han, Wang Tianliang, Liu Jiankun. Experimental study of repeated frost heave and thaw settlement properties of silty sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3159 - 3165. [严晗,王天亮,刘建坤. 粉砂土反复冻胀融沉特性试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3159 - 3165.]
- [10] Shen Yanjun, Yang Gengshe, Wang Ting, et al. Evaluation of frost heave force models of pore/fissure in rock and their applicability [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(1): 117 - 128. [申艳军,杨更社,王婷,等. 岩石内孔隙/裂隙冻胀力模型及其适用性评价[J]. 冰川冻土, 2019, 41(1): 117 - 128.]
- [11] Lü Zhitao, Xia Caichu, Wang Yuesong, et al. Analytical elastoplastic solution of frost heaving force in cold region tunnels considering transversely isotropic frost heave of surrounding rock [J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 163: 87 - 97.
- [12] Liu Yingliang. Control and monitoring of ground deformation during jacking of a large-diameter curved tabular roof [J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(6): 210 - 216. [刘应亮. 大直径曲线管幕顶进过程中地层变形控制及监测[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(6): 210 - 216.]
- [13] Zhu Hehua, Yan Zhiguo, Li Xiangyang, et al. Analysis of construction risks for pipe-roofing tunnel in saturated soft soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Suppl 2): 5549 - 5554. [朱合华,闫治国,李向阳,等. 饱和软土地层中管幕法隧道施工风险分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊2): 5549 - 5554.]
- [14] Brun B, Ha H. Underground line U5 'unter den linden' berlin, Germany structural and thermal fe-calculations for ground freezing design [C]// Proc. Int. Conf. Numerical Simulation of Construction Processes in Geotechnical Eng. for Urban Environ-

- ment, 2006, 225 – 232.
- [15] Zhou Xiaomin, Zhang Guoliang. Bearing capacity research and application analysis on “frozen soil and pipe lodgepole” composite structure [J]. Municipal Engineering Technology (Suppl), 2004, 22: 341 – 344. [周晓敏, 张国亮. “冻土+管棚”复合结构的承载性能研究及其应用分析[J]. 市政技术(增刊), 2004, 22: 341 – 344.]
- [16] Moriuchi K, Ueda Y, Ohrai T. Study on the zdfreeze between frozen soil and steel pipes for cutoff of water[J]. Proceedings of The Japan Society of Civil Engineers, 2008, 64(2): 294 – 306. [森内浩史, 上田保司, 生頼孝博. 鋼管間止水凍土の凍着維持に関する研究[J]. 土木学会論文集, 2008, 64(2): 294 – 306.]
- [17] Hu Xiangdong, Fang Tao. Numerical simulation of temperature field at the active freeze period in tunnel construction using freeze-sealing pipe roof method[C]//Geo-Shanghai 2014, May 26-28, 2014, Shanghai, China. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2014.
- [18] Hu Xiangdong, Ren Hui, Chen Jin, et al. Model test study of the active freezing scheme for the combined pipe-roof and freezing method [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(5): 92 – 98. [胡向东, 任辉, 陈锦, 等. 管幕冻结法积极冻结方案模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 92 – 98.]
- [19] Hu Xiangdong, Fang Tao, Guo Xiaodong, et al. Temperature field research on thawing process of Freeze-Sealing Pipe Roof Method in Gongbei Tunnel by in situ prototype test[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(7): 1700 – 1705. [胡向东, 方涛, 郭晓东, 等. 拱北隧道管幕冻结法现场原型试验解冻温度场实测研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(7): 1700 – 1705.]
- [20] Hu Xiangdong, Hong Zequn. Analytical solution to steady-state temperature field of freeze-sealing pipe-roof with specific freezing pipe arrangement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(8): 113 – 121. [胡向东, 洪泽群. 管幕冻结特殊布管形式稳态温度场解析解[J]. 中国公路学报, 2018, 31(8): 113 – 121.]
- [21] Li Zhihong, Wang Wenzhou, Hu Xiangdong. Research on influence of construction thermal disturbance on the freezing-sealing pipe roof [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48 (Suppl 2): 374 – 379. [李志宏, 王文州, 胡向东. 施工热扰动对管幕冻结止水帷幕影响研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊2): 374 – 379.]
- [22] Li Jian, Li Zhihong, Hu Xiangdong. Analysis on water sealing effect of freezing-sealing pipe roof method [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 751 – 758. [李剑, 李志宏, 胡向东. 管幕冻结暗挖工法冻结止水效果分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 751 – 758.]
- [23] Hu Jun, Wei Hong, Zeng Hui, et al. Numerical analysis of temperature field of new pipe-roof freezing method [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(6): 1165 – 1172. [胡俊, 卫宏, 曾晖, 等. 新型管幕冻结法温度场数值分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(6): 1165 – 1172.]
- [24] Zhang Jun, Hu Xiangdong, Ren Hui. Case study on control of freezing effect by installing limiting tubes in freezing-sealing pipe roof in Gongbei tunnel [J]. Tunnel Construction, 2015, 35(11): 1157 – 1163. [张军, 胡向东, 任辉. 拱北隧道管幕冻结施工中限位管的冻结效果控制研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(11): 1157 – 1163.]
- [25] Hu Jun, Liu Yong, Zeng Hui. Numerical analysis on the temperature field of a new type of pipe-roof freezing method with different fill-in procedures [J]. Forest Engineering, 2015, 31(6): 135 – 141. [胡俊, 刘勇, 曾晖. 新型管幕冻结法不同管幕填充形式的温度场数值对比分析[J]. 森林工程, 2015, 31(6): 135 – 141.]
- [26] Pan Jianli, Gao Haidong, Shi Peixin. A study of combined pipe-roof scheme optimization for the bored section of the Gongbei tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(3): 55 – 62. [潘建立, 高海东, 史培新. 拱北隧道暗挖段管幕组合方案优化研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(3): 55 – 62.]
- [27] Cheng Yong, Liu Jiguo. Scheme designing of gongbei tunnel [J]. Highway Tunnel, 2012(3): 34 – 38. [程勇, 刘继国. 拱北隧道设计方案[J]. 公路隧道, 2012(3): 34 – 38.]
- [28] Cui Guangxin. Similarity theory and model test [M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 1990. [崔广心. 相似理论与模型试验[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.]
- [29] 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. [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.]
- [30] Cheng Hua. Theory and technology of shaft sinking by freezing method for deep alluvium [M]. Beijing: Science Press, 2016. [程桦. 深厚冲积层冻结法凿井理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016.]

Model test of freezing temperature field of the freeze-sealing pipe roof method under different pipe arrangements

DUAN Yin^{1,2}, RONG Chuanxin¹, CHENG Hua¹, CAI Haibing¹,
XIE Dezhu¹, DING Yanglong³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;

2. Department of Architecture and Civil Engineering, Huainan Union University, Huainan 232038, Anhui, China;

3. China Coal Special Drilling Co., Ltd., Hefei 230000, China)

Abstract: As the key project of the Zhuhai connecting line of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge, the Gongbei Tunnel successfully used the Freeze-Sealing Pipe Roof Method (FSPR) for the first time at home and abroad. Based on this background, a model test of FSPR under different pipe arrangements have carried out and the temperature field variation have been studied. The results show that during the active freezing period, the temperature of each measurement point decreased sharply in the first four hours, then slowed down gradually, and finally tended to be stable after falling to the sand freezing point. The three configurations of pipe arrangements all met the freezing design requirements. The freezing tube inside the hollow pipe first cooled the pipe wall and then reduced the temperature of the surrounding soil via the surface area of the pipe. After 21 hours of active freezing, the vertical range of the frozen wall in Configuration C was the largest, and the average thickness of the frozen wall directly above the hollow pipe wall was about 105 mm. On the premise of meeting the design requirements of the rigidity of the pipe roof, this configuration could be adopted to achieve the purpose of forming a frozen curtain quickly. The temperature curve of the measurement point within the vertical distance of 100 mm at the concrete pipe middle line had a distinct rising stage in 4 hours after the opening of the limiting-tube, but it still remained below the freezing point and the frost wall between the pipes was stable. The existence of the frozen wall was stable, indicating that the limiting tube can limit the frost heave of the formation within a certain range under the condition that the water was effectively sealed between the pipes. The proposed optimized double circular freezing-tube can meet the requirements of freezing design, at the same time, it was more convenient to install, economical and environmentally friendly.

Key words: freeze-sealing pipe roof method; similar model test; temperature field; pipe arrangements; Gongbei Tunnel; Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

(责任编辑: 周国庆; 编辑: 庞瑜, 周成林)