

某地铁工程长距离联络通道水平冻结法加固设计与有限元分析*

王 祥¹ 陈发达¹ 徐文胜² 覃亚伟^{2,3} 吴贤国³ 冯宗宝³

(1. 贵阳市公共交通投资运营集团有限公司, 550091, 贵阳; 2. 武汉华中科大检测科技有限公司, 430074, 武汉;
3. 华中科技大学土木与水利工程学院, 430074, 武汉 // 第一作者, 高级工程师)

摘 要 以武汉轨道交通机场线盘龙城站—宏图大道站区间的长距离联络通道为工程背景, 采用水平冻结法加固地层的施工方法, 对其进行冻结设计。采用 COMSOL Multiphysics 有限元软件对联络通道进行温度场分析, 得到控制截面冻结壁的有效厚度及有效温度, 均满足设计要求。分别采用结构力学方法和有限元方法对冻结壁厚度、强度及稳定性进行分析计算, 结果表明, 上述指标均满足设计要求, 证明了冻结工艺设计的合理性。水平冻结法施工时, 机场线联络通道采用双侧布置冻结孔和防偏技术, 并严格控制温度变化, 有效保证了工程安全顺利进行。

关键词 地铁; 联络通道; 水平冻结法; 加固设计

中图分类号 U455.49

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.10.016

Reinforcement Design of Horizontal Freezing Method Applied to A Long-distance Link Passage of Metro Project, and Finite Element Analysis

WANG Xiang, CHEN Fada, XU Wensheng, QIN Yawei, WU Xianguo, FENG Zongbao

Abstract Taking the long-distance link passage between Panlongcheng Station - Hongtu Boulevard Station interval of Wuhan Rail Transit Airport Line as engineering background, the project adopts horizontal freezing method in construction to reinforce the stratum, and the freezing process is designed. By analyzing temperature field of the link passage with COMSOL Multiphysics finite element software, the effective thickness and effective temperature of the control section frozen wall are obtained, and both meet the design requirements. Structural mechanics method and finite element method are adopted respectively to analyze and calculate the frozen wall thickness, strength and stability. Results show that the above indicators all meet the design requirements, and the rationality of the freez-

ing process design is proven. During horizontal freezing method construction, the airport line link passage adopts double-side freezing hole layout and anti-deviation technology, and temperature changes are strictly controlled, ensuring safe and smooth operation of the project effectively.

Key words metro; link passage; horizontal freezing method; reinforcement design

First-author's address Guiyang Public Transport Investment and Operation Group Co., Ltd., 550091, Guiyang, China

冻结法加固土体的施工方法的主要作用是解决松软土层的封水加固问题, 目前在地铁施工中得到广泛应用。如何保证冻土壁的强度和稳定性是目前冻结法施工中亟待解决的问题。

国内外对冻结法加固土体的理论及其施工方法的研究较多, 如对联络通道冻结帷幕温度场的三维模拟分析。文献[1]对复杂条件下的冻土帷幕进行了数值分析, 指出帷幕中的最薄弱位置, 验证了冻结帷幕的厚度安全性。文献[2]重点阐述了联络通道采用冻结法施工期间, 地层冻胀和融沉防治、冻土帷幕质量控制及开挖和构筑等关键工序的施工技术。文献[3]从数值分析的角度对冻土帷幕的应力与变形进行了分析和安全评价, 详细研究了冻土帷幕的应力与位移分布情况。文献[4]利用有限元方法分析了地铁联络通道在采用冻结法的情况下冻土壁的承载能力。文献[5]基于信息化监测技术实现了对厚黏土层中采用冻结法施工的煤矿井筒外壁的应力、应变及温度等的安全监测。

目前, 研究工作主要集中在对冻结温度场的仿真模拟这一层面, 而针对联络通道在水平冻结加固

* 国家自然科学基金项目(51778262, 71571078, 51378235); 国家重点研发项目(2016YFC0800208)

的方法下地层冻胀对冻结壁厚度、强度及稳定性问题的研究在国内外还较少,缺乏对冻结联络通道从设计到施工全过程的系统性研究。本文以武汉轨道交通机场线(以下简称“机场线”)盘龙城站—宏图大道站区间下穿武汉地铁 3 号线(以下简称“3 号线”)处设置的联络通道为工程背景,对水平冻结法加固土体进行分析。根据实际情况,确定土体中的各类参数取值;利用 COMSOL Multiphysics 有限元软件对钻孔两端产生的温度场进行分析;采用结构力学方法和有限元方法对冻结壁的厚度、强度及稳定性进行计算,提出合理的施工方案,为该工程的实际施工提供指导。

1 工程概况

机场线盘龙城站—宏图大道站区间下穿府河,是该线路最长、最深、最复杂的区间隧道。该隧道分布在地铁线两侧,其联络通道同机场线和 3 号线区间隧道并行。

机场线联络通道主要位于粉质黏土夹粉土、粉细砂层中,采用冻结法进行土体加固。在场区最大勘探深度范围内,通过钻探资料、原位测试及土工试验的成果分析,上部为填土层,下部主要为黏性土、黏性土夹碎石。机场线联络通道土层性质如表 1 所示。

表 1 机场线联络通道土体参数取值
Tab.1 Values of airport line link passage soil parameters

地层编号	土层名称	渗透系数(cm/s)		透水性
		垂直	水平	
1-1	杂填土	6.2×10^{-3}	7.4×10^{-3}	强
1-2	素填土	5.7×10^{-6}	6.3×10^{-6}	微
3-2	黏土	3.0×10^{-6}	3.0×10^{-6}	微
3-3	淤泥质黏土	8.0×10^{-6}	8.0×10^{-6}	微

2 联络通道水平冻结加固设计和分析

2.1 联络通道水平冻结加固设计

2.1.1 冻结帷幕设计

综合考虑冻结孔的布置形式、施工难度及冻结效果,以及冷冻站的布置,采用从机场线区间隧道的两侧对称布置冻结孔(均采用主孔的布局方式),两侧区间隧道内各布置 1 个冷冻站。

参考 2 号线和上海相关冻土试验资料,冻土强度的设计指标取为:轴心抗压强度为 3.5 MPa,抗折

强度为 1.8 MPa,抗剪强度为 1.5 MPa(−10 ℃)。该联络通道的冻结时间约为 45 d。开挖区域外的冻结孔、循环冻结壁和隧道段温度不高于 −5 ℃,其他部分设计的冻结壁平均温度为 −10 ℃。冻结壁厚度一般取 2.2 m,喇叭口处取 1.9 m。联络通道冻结孔为 154 个(左、右线隧道内各布置 77 个冻结孔)。

2.1.2 冷冻机的选择

冻结需冷量 Q 的计算公式为:

$$Q = 1.3 \pi d H K$$

式中:

H ——冻结管道的全长;

d ——冷冻管道的直径;

K ——冷冻管道的散热系数。

经计算, Q 为 15.7×10^4 kJ/h,故在区间隧道左、右两侧各选用 JYSLGF300III 型冷冻机。

2.1.3 冻结系统的辅助设备

在机场线左、右两条线路中布置 2 台 IS200-150-315 型盐水泵,用来给冻结孔加灌盐水。该盐水泵流量为 420 m³/h,电机的功率为 55 kW。在机场线左、右两条线路中另布置 2 台 10SH-19 型盐水泵,用来重复利用管道的冷却水。该盐水泵流量为 360 m³/h,电机的功率为 30 kW。选用 NBL-100 型冷却塔 1 台。

2.2 长距离联络通道温度场分析

2.2.1 联络通道有限元模型的建立

COMSOL Multiphysics 软件的精确、快速的计算性能以及强大的分析能力,可以实现繁杂物理场高精度的数值模拟^[6]。其基本步骤如下:初步建立几何模型→定义物理参数→划分有限元网格并进行求解→对模型进行可视化后处理。

冻结管的间距不同会对温度场带来不同的影响规律,其需按照工期和冻结要求计算。本文冻结管的间距为 500 mm。采用 COMSOL Multiphysics 软件进行建模时,必须根据冻结孔实际开孔位置、测斜资料确定计算深度处的冻结孔、测温孔相对于联络通道中心点的距离和方位。为了准确分析整个温度场的全貌,本文选取了图 1 所示的 A、B 两个控制截面,计算该截面上的冻结壁厚度和平均温度。其中,A 截面在左线隧道与联络通道交界面(喇叭口)处,B 截面在联络通道的中部。图 1 中联络通道 A-A 截面的有限元模型网格划分见图 2。

本工程未进行土体的热物理参数测试,系根据

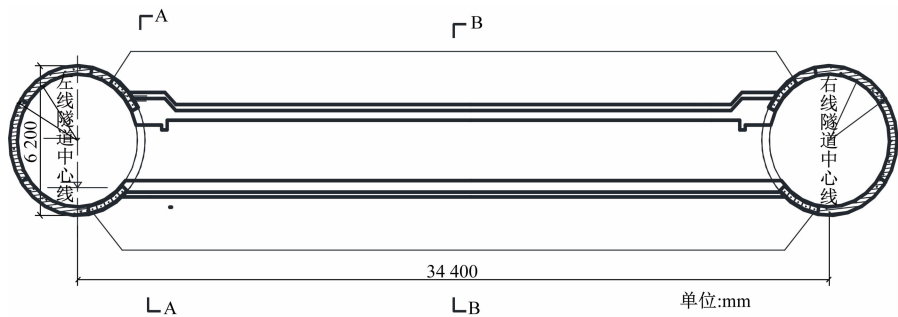


图1 机场线联络通道有限元模型的计算截面位置

Fig.1 Calculation section location of airport line link passage finite element model

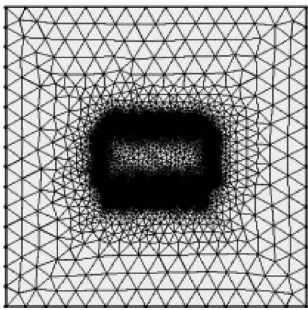


图2 联络通道 A-A 截面有限元模型

Fig.2 Finite element model of link passage section A-A

武汉市相关的工程经验选取,见表2。根据测温资料,土体的原始地温取 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$,结冰温度取 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

表2 联络通道土体热物理参数

Tab.2 Thermophysical parameters of link passage soil				
土体名称	体积质量/ (kg/m^3)	液态水量/ %	导热系数/ ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	比热/ ($\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)
未冻土	1 890	20	1.45	1.370
冻土	1 890	0	1.85	1.108

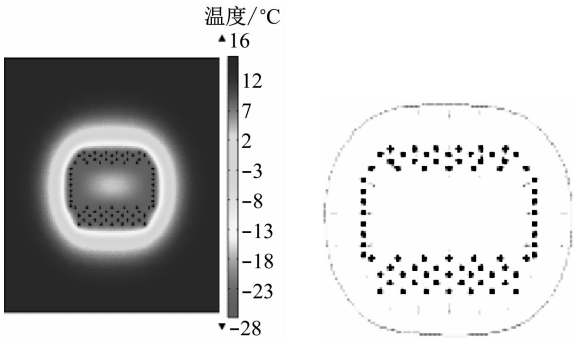
2.2.2 计算结果与分析

提取冻结45 d后机场线联络通道 A-A 和 B-B 截面处的温度场云图和冻土帷幕形状,见图3—图4。

由图3—图4可见,A-A 截面冻结壁的有效厚度为 2.0 m ,且在有效厚度内冻结壁的平均温度为 $-14.2\text{ }^{\circ}\text{C}$;B-B 截面冻结壁的有效厚度为 2.5 m ,且在有效厚度内冻结壁平均温度为 $-13.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由此可见,在未考虑冻结孔偏斜的情况下,A-A、B-B 两个控制截面上的冻结壁厚度和平均温度在冻结45 d时均满足设计要求。

2.3 冻结壁厚度、强度及稳定性分析

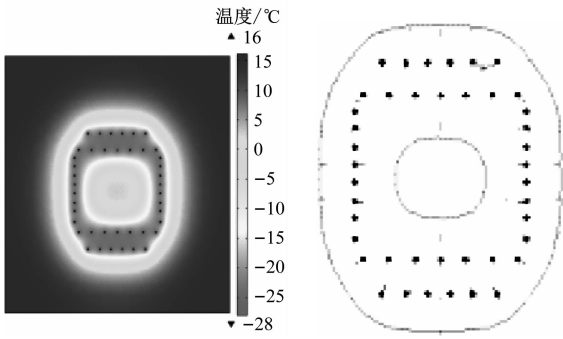
根据提供的联络通道的初步位置和地质资料,隧道中心埋深取 -24.34 m 。



a) 温度场分布 b) 冻土帷幕形状

图3 A-A 截面的计算结果

Fig.3 Calculation results of section A-A



a) 温度场分布 b) 冻土帷幕形状

图4 B-B 截面的计算结果

Fig.4 Calculation results of section B-B

2.3.1 结构力学方法求解

由计算结果可见,联络通道直墙底部出现的最大弯矩为 $-0.8\times10^3\text{ kN}\cdot\text{m}$,其拱脚处出现的最大轴力为 $-0.85\times10^3\text{ kN}$ 。

冻土强度以冻土平均温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的黏土强度为准(即 $\sigma_{\text{压}}$ (压应力) $=3.5\text{ MPa}$ 、 $\sigma_{\text{拉}}$ (拉应力) $=1.8\text{ MPa}$)。当冻结壁厚度为 2.2 m 时,最危险截面的 $\sigma_{\text{压}}$ 为 1.38 MPa ,安全系数为 2.5 ; $\sigma_{\text{拉}}$ 为 0.6 MPa ,安全系数为 3.0 。由此可见,冻结壁厚度、强度和稳定性均满足要求。

2.3.2 有限元计算结果与分析

联络通道侧向受到的水平向土压 P 取 $0.013 H_0$ MPa (H_0 为埋深, 以 m 计), 其拱部受到的竖向均布荷载和梯形荷载分别为 0.30 MPa 和 $(0.30 + 0.013 H_0)$ MPa, 其底部受到的竖向荷载为 0.344 MPa。冻土的弹性模量为 300 MPa, 泊松比为 0.23 , 体积质量为 $1\ 890\text{ kg/m}^3$ 。模型下部按固定边界处理。

基于模型结构和荷载的对称性, 取其一半为研究对象, 建立冻结壁有限元模型, 见图 5。

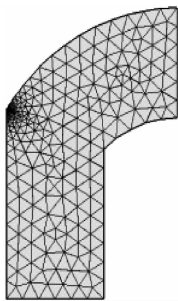


图5 冻结壁有限元模型

Fig. 5 Finite element model of frozen wall

冻结壁的等效应力、第一主应力、第二主应力和第三主应力分布见图 6。由图 6 可见, 冻结壁的最大等效应力出现在靠近立柱支座右侧角点处, 拱顶底部亦是等效应力较大的区域; 冻结壁的最大拉应力(第一主应力)出现在靠近立柱支座左侧角点处; 冻结壁的最大压应力(第三主应力)出现在靠近立柱支座右侧角点处, 拱顶底部亦是等效应力较大的区域。

冻土强度以冻土平均温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的黏土强度 ($\sigma_{\text{压}} = 3.5\text{ MPa}$ 、 $\sigma_{\text{拉}} = 1.8\text{ MPa}$) 为准。最危险截面处冻土的 $\sigma_{\text{压}}$ 为 1.56 MPa , 安全系数 2.2 ; 冻土的 $\sigma_{\text{拉}}$ 为 0.63 MPa , 安全系数为 2.9 。由此可见, 冻结壁厚度、强度和稳定性均满足要求。

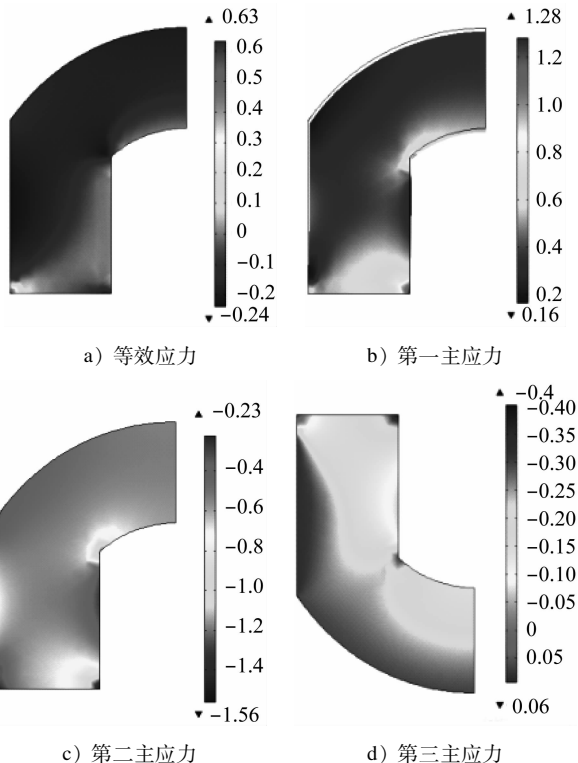
3 联络通道水平冻结法施工技术

3.1 水平冻结孔施工

在左、右线隧道对称布置冻结孔, 两侧冻结孔均为主孔, 这缩短了单根冻结管的长度, 减小了冻结孔的偏斜, 使得施工速度加快, 克服了长距离联络通道水平冻结法施工速度慢、偏斜不易控制的难题。

冻结孔的施工顺序为: 定位、开孔→孔口管的安

装→孔口安装设备→打孔→测量→封闭孔端部→打压试验。



单位: MPa

图6 冻结壁应力图

Fig. 6 Stress diagram of frozen wall

3.2 钻孔防偏技术

运用防偏移技术, 可以为冻结孔的施工带来便利:

1) 为了施工时冻结孔的方向易于检测和校正, 可以预先设置定位孔, 并将其布置在隧道两侧。

2) 在进行联络通道施工时, 需确定各个预设门洞的具体位置。在两侧通道的中心线偏离未超过 200 mm 的情况下, 不需对冻结孔的位置予以相应的调整。

3) 在工程初始阶段, 需注意地层掘进中的参数波动。若发现水文地质条件出现了非正常情况, 则需依照实际情况进行施工应对。

4) 冷冻管是保证工程质量的重要一环, 不仅需要保证冷冻管材料的质量, 还要确保冷冻管以直线的形式进入土层。在施工中, 应采用坚实稳定、性质良好的工作平台。

5) 为了保证冷冻管的顺直, 必须确定好位于孔口段的冷冻管位置, 而且还要在施工的开始阶段多次检测冷冻管的方位, 使得偏差不会影响到工程的

安全进行。

6) 需注意冷冻管连接时的同心度和冷冻管的顺直这两个方面。

3.3 水平冻结法施工

1) 冻结站布置和设备安装。冻结站的覆盖面积约 120 m^2 , 站内的设备主要有冷冻机、盐水箱、盐水泵、箱式变电站、水泵及冷却塔等。这些设备的具体安装方法可以参考相应设备的使用说明书。

2) 管路连接。管路采用法兰连接。为了保证隧道通行顺畅, 将隧道内的盐水管架设在坡道上。集配液管与冻结管之间采用高压胶管来连接。将位于联络通道四周的冻结管每 2 个串联为 1 组, 其他冻结管则是每 3~4 个串联成 1 组, 最后将这些管道与集配液管相连。

3) 溶解 CaCl_2 , 对制冷设备充氟、加油。该工程使用的盐水相对体积质量是 1.26, 将整个冻结系统管道装满水, 在盐水箱内装一半水, 将 CaCl_2 加入到盐水箱中进行分解, 打开盐水泵使水一直溶解 CaCl_2 , 直到溶液的质量浓度满足要求。对制冷设备进行泄漏检测和 N_2 清洗, 确保系统无泄漏, 然后对该设备抽真空后充氟及添加燃油。

4) 积极冻结。本工程设计的冷冻时间约为一个半月。特别是冷冻孔的单孔流量要超过 $5 \text{ m}^3/\text{h}$; 经过 1 周的积极冻结使盐水温度低于 -18°C ; 经过半个多月的积极冻结使盐水温度低于 -24°C ; 工程初始阶段盐水温度需低于 -28°C 。在盐水温度和盐水流量未达到设计要求的情况下, 需相应延长积极冷冻时间。图 7 为盐水预计温度随时间变化曲线。

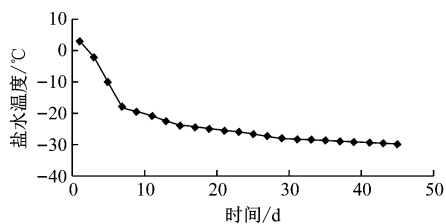


图 7 盐水预计温度随时间变化曲线

Fig. 7 Predicted saline temperature versus time curve

4 结语

1) 通过有限元软件对机场线联络通道温度场进行模拟计算, 在未考虑冻结孔偏斜的情况下, A-A、B-B 两个控制截面上的冻结壁厚度和平均温度在冻结 45 d 时均满足设计要求。仿真分析结果验证了冻结工艺设计的合理性, 并能较好地指导各环节

的施工工艺。

2) 根据结构力学的方法计算得出, 冻结壁厚度、强度和稳定性均满足要求。经过仿真分析证明冻土帷幕和冻结工艺设计合理, 并能指导和调整各环节的施工工艺。

3) 在左、右线隧道对称布置冻结孔, 两侧冻结孔均为主孔, 缩短了单根冻结管的长度, 减小了冻结孔的偏斜, 加快了施工进度。钻孔时应采用防偏技术, 可使温度场得到有效控制, 以取得良好的冻结效果。

参考文献

- [1] 武亚军, 杨建波, 李大勇. 隧道联络通道及泵站冻结法施工数值分析[J]. 土木工程学报, 2011(增刊 2): 144.
WU Yajun, YANG Jianbo, LI Dayong. Numerical analysis of the freezing method for the construction of the connected aisle and pump room in metro[J]. China Civil Engineering Journal, 2011(S2): 144.
- [2] 阮庆松, 吴立, 姚俊东, 等. 地铁联络通道冻结法施工方案研究——以武汉轨道交通 3 号线为例[J]. 人民长江, 2015(7): 22.
RUAN Qingsong, WU Li, YAO Jundong, et al. Research of freezing construction plan of connecting passage in Wuhan Metro Line 3[J]. Yangtze River, 2015(7): 22.
- [3] 李开文, 毛勇, 孙闯, 等. 越江隧道联络通道冻结法施工力学模拟分析[J]. 长江科学院院报, 2011(7): 57.
LI Kaiwen, MAO Yong, SUN Chuang, et al. Mechanical simulation of freezing method applied to the construction of connected aisle in a cross-river tunnel[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011(7): 57.
- [4] 蔡海兵, 黄以春, 庞涛. 地铁联络通道三维冻结温度场有限元分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2015(6): 1436.
CAI Haibing, HUANG Yichun, PANG Tao. Finite element analysis on 3D freezing temperature field in metro connected aisle construction[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015(6): 1436.
- [5] 薛维培, 姚直书, 宋海清, 等. 厚黏土层冻结法施工的煤矿井筒安全监测分析[J]. 中国安全科学学报, 2016(4): 137.
XUE Weipei, YAO Zhishu, SONG Haiqing, et al. Safety monitoring analysis of coal mine shaft built by freezing method in thick clay layer[J]. China Safety Science Journal, 2016(4): 137.
- [6] 张钧祥, 刘彦伟, 任培良, 等. 基于蠕变效应的穿层钻孔封孔参数优化与试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2021(7): 97.
ZHANG Junxiang, LIU Yanwei, REN Peiliang, et al. Optimization and experimental study of sealing parameters of crossing boreholes based on creep effect[J]. China Safety Science Journal, 2021(7): 97.

(收稿日期: 2022-08-01)