

Study on the Design and Construction Technology of Artificial Ground Freezing for Cross Passage Adjacent to Confined Water in Silty Soil

Weiwei Wei LeiHan ChaoWang PoYang Lijian Zhang

China Construction International Construction Co., Ltd., Suzhou ,Jiangsu, 215004, China

Abstract

In the development and construction of urban rail transit, the geological conditions for cross passage construction are often complex. For water-rich silty strata, artificial ground freezing has become one of the main construction methods. This paper, based on a cross passage project in Hangzhou, summarizes the freezing design and construction constraints of artificial ground freezing applied in strata adjacent to confined aquifers. Common construction risks are identified, and corresponding preventive measures are proposed. The aim is to provide design and construction references for similar future cross passage projects employing ground freezing methods.

Keywords

Cross Passage; Artificial Ground Freezing ; Silty Sand ; Adjacent to Confined Water

邻承压水的联络通道冻结设计及施工技术研究

魏伟伟 胡磊 汪超 杨坡 章李坚

中建国际建设有限公司, 中国·江苏 苏州 215004

摘 要

在城市轨道开发与建设中, 联络通道施工的地层具备复杂性, 对于富水粉砂地层, 主要的施工方法为人工冻结法。本文以杭州某联络通道工程为背景, 通过对毗邻承压含水层中冷冻法施工联络通道的冻结设计及施工约束进行总结, 且指出了常见的施工风险, 并给出具体的防范措施, 旨在为相同类似条件下的联络通道冻结法施工提供设计与施工借鉴。

关键词

联络通道; 人工冻结法; 粉砂地层; 毗邻承压水

1 引言

我国轨道交通建设发展步伐的快速迈进, 富水软弱复杂地质条件力学性能较差, 因此联络通道等轨道交通附属结构施工风险大^[1-2], 已成为建设一大重难点。冻结法因加固强度高且能形成止水帷幕等优势, 成为富水砂层联络通道施工主要技术^[3]。

基于富水粉砂地层联络通道冻结法施工, 李晓超^[4]依托于苏州地铁现场实测, 得到了粉土地层联络通道及泵站冻结设计以及冻结施工控制要点。张书旺对某地铁区间赋隧道存微承压水层中联络通道冻结法施工参数进行研究及实施, 表明此地层中联络通道帷幕冻结法施工效果较好。魏元博指出加强现场技术管理能够保障冻结法施工安全。

虽然目前针对联络通道富水粉砂地层中的施工技术有

较多研究, 在近距离承压水层中的联络通道施工案例较少, 为总结毗邻承压含水层中冷冻法施工联络通道的施工技术, 本文以杭州某冷冻法施工联络通道为背景, 阐述了粉砂地层中且毗邻承压水的冻结设计及施工做法, 以及列出了常见的施工风险与对应的防范措施, 旨在为类似的联络通道冻结法工程提供设计与施工借鉴。

2 工程概况

2.1 工程简介

某地铁项目位于杭州市, 区间隧道区间起止里程 YDK4+747.755~YDK5+582.662, 区间线间距约为 17.2~39.2m。联络通道及泵房设置在区间 YDK5+264.955 处, 冻结法施工联络通道及泵房。联络通道处隧道中心距约 19.782m, 顶部覆土约 23.9m。

联络通道结构形式由初期支护、防水层及二次衬砌组成, 衬砌结构厚 450mm, 为钢筋混凝土。初期支护采用 20 号工字钢拱架结合 C25 喷射混凝土, 支护总厚度为

【作者简介】魏伟伟 (1994-), 男, 中国江苏宿迁人, 硕士, 工程师, 从事地下工程施工技术研究。

300mm。

2.2 地质条件

拟建联络通道土层主要为 6-2 淤泥质粉质黏土夹粉土、9-4 圆砾、9-2 粉质黏土。

2.3 水文条件

联络通道勘察工作范围内的地下水为浅部潜水和承压水。潜水主要蕴含于浅(中)部填土、粉(砂)性土中,水位稳定在地面下 0.7~4.2m。承压水主要分布在(12)层和(14)层砂砾层中,水位埋深为 10.15m。

2.4 周边环境

拟建联络通道位于解放东路下方,通道结构上部主要是各种市政类管线,埋深约 0.6~3.5m。

3 冻结设计

3.1 冻结加固设计参数

表 1 联络通道主要冻结设计参数表

序号	参数名称	单位	数量	备注
1	冻结帷幕设计厚度	m	2.4	喇叭口两侧 2.1m
2	冻结帷幕平均温度	℃	≤-10	/
3	冻结帷幕交圈时间	d	23~27	/
4	积极冻结时间	d	50~55	视冻结效果判断是否延长冻结时间
5	冻结孔个数	个	123	/
6	冻结孔允许偏斜	mm	150	/
7	设计最低盐水温度	℃	-28~-30	积极冻结 7d 冷源温度 ≤-18℃
8	维护冻结盐水温度	℃	≤-28	
9	单孔盐水流量	m ³ /h	5~7	
10	冻结管规格	mm	φ89×8	透孔:低碳钢无缝钢管 φ108×10;
11	测温孔	个	9	φ89×8(或 φ32×3)
12	泄压孔	个	4	φ45×3

3.2 冻结孔布置

联络通道共设计冻结孔 119 个(主面 58 个、副面 61 个),冻结管长度 1101.68 米;为供对侧隧道冻结孔需冷用,布置 6 个穿透孔。

3.3 测温及泄压孔布置

联络通道共设置 9 处温度监测点(主工作面 5 处、辅助工作面 4 处),旨在监测冻结帷幕各区域的温度变化趋势。

冻结帷幕封闭区域内的通道左右线共布置 4 个卸压孔,通过泄压孔安装压力监测装置,可实时掌握冻结帷幕内部压力演变规律,结合日常监测数据及时判断冻结帷幕形成状态,并实现冻胀压力的可控释放。

3.4 制冷设计

制冷阶段控制标准:初始冻结 7 日内盐水温度降至 -18℃ 以下;持续冻结 15 天达到 -24℃ 以下;开挖阶段冻土-管片界面平均温度需低于 -5℃,盐水最低温度控制于 -28℃ 以下,且供回盐水温差不得超过 2℃。

主冻结周期设定:本区间联络通道冻结周期为 50~55d。

单孔冻结系统流量要求:不低于 5m³/h。

4 施工组织策划

依据现场总体施工方案,合理规划作业场地。在隧道两端邻近井口区域分别设置地面加工区,选定井口作为设备材料运输通道。垂直运输采用 25 吨起重机,制冷机组布置于右线隧道邻近联络通道区域。施工供水系统由指定接驳点引出 2 寸供水管路至作业面,供水能力不低于 10m³/h。现场电力供应需满足 300kW 负荷要求。施工材料、设备及土方运输采用矿用三轮车,行驶速度限制在 5km/h 以内。

5 冻结施工

5.1 冻结孔施工

冻结孔准备施工期间,按冻结孔设计施工图进行孔位放线。

孔口管安装前应检查钻孔格仓的密封性,孔口管安装至管片底部,孔口管与管片应采用 3 根直径不小于 12mm 的钢筋焊接固定。钻孔格仓及相邻格仓内应采用 C30 硫铝酸盐微膨胀混凝土挂网(或井型钢筋)充填,与钢管片内表面齐平。在孔口装置上配置密封性能优良的 DN100 调节阀,将装配 φ96mm 金刚石取芯钻具的开孔设备安装于钻孔导向轨道上。随后开启球阀实施二次开孔作业,完成钻孔后立即撤回钻具并关闭阀门系统。

施工采用 MD-80 型钻探与 BW-250 泥浆泵设备。钻孔前,依据设计角度参数调整钻机姿态,确保成孔精度。常规工况采用稳压钻进工艺,遇地层压力异常时通过旁通阀调控压力。终孔后利用预留注浆通道对管壁环隙实施充填注浆。

冻结管安装后需进行长度复验,在冻结管内安装供液管,然后冻结管端盖和供回路羊角焊接。管路系统安装完毕后需进行耐压力测试。

5.2 冷冻站安装

5.2.1 需冷量计算

联络通道冻结需冷量计算:

$$Q=1.25 \times \pi \times k_1 \times (H_1 \times d_1)$$

式中:Q—为冻结管的需冷量;

H₁—冻结总长度,为 1101.68m;

d₁—冻结管直径,为 Φ89mm;

k₁—冻结管散热系数,取 K=250 Kcal/m²h;

将上述参数代入公式得出该通道需冷量为 9.62×10⁴(Kcal/h)。

5.2.2 冻结设备选型

见表 2。

5.2.3 设备安装、管路连接、保温

冷冻站大约需要占用长度 80m,先在隧道内搭设支撑平台,然后就位设备,设备与平台同时安装,设备完全就位后,将工字钢平台连为一个整体,再设备四脚焊接固定在工

字钢平台上。

冻结管及联络通道两侧管片，采用PEF板保温隔温，厚度为5cm。

表2 冻结站主要设备

序号	设备名称	数量	型号	备注
1	主冷冻机组	1台	TBS700.2J	制冷量： $10.75 \times 10^4 \text{Kcal/h}$
2	备用冷冻机组	1台	TBSD620.1FJ	制冷量 $12.9 \times 10^4 \text{Kcal/h}$
3	盐水泵	2台	SB150-315	每台流量 $200\text{m}^3/\text{h}$
4	清水泵	2台	SB125-200	每台流量 $200\text{m}^3/\text{h}$
5	冷却塔	2台	LCT-80T	/

备注：冷媒剂选用氯化钙(CaCl₂)溶液。

5.3 积极冻结与维护冻结

系统调试阶段需对各工况参数进行动态调节，系统稳定后转入主冻结期，该阶段重点监控盐液温度与循环流量指标，若参数未达设计要求则相应延长冻结周期。在积极冻结过程中，测温判断冻结帷幕交圈、冻结帷幕厚度及与隧道胶结状况，满足设计要求后，方可转入维持冻结工序。维持冻结期温度参数设定为-28℃。

5.4 开挖与构筑施工

5.4.1 施工准备

开挖作业实施前，需在隧道左右线通道开口处双侧安装两幅支撑钢架，每幅钢架均匀设置8个支撑点。应急防护门安装在开挖侧隧道预留洞口上，且需在钢管片开启前，完成水密性检测，采用水泵加压，要求在不停空压机时，要求持续保压0.27MPa且无压力衰减。

根据采集联络通道的温度场数据，分析冻结发展速率，得到冻土发展半径，据此判断通道冻结壁最薄厚度是否达到设计厚度。

冻土发展半径： $R=L/d \times D$

R—冻土发展半径；

L—测温孔到临近冻结孔的距离；

d—测温孔达到零度的天数；

D—积极冻结期天数。

5.4.2 开挖与构筑

待土体加固强度达标后，实施暗挖作业，采用风镐实施全断面开挖，开挖中遵循自上而下原则，单循环进尺控制在0.8m以内。

实施二次支护体系，初期支护采用钢架-木背板配钢筋网喷砼复合结构体系，二次永久支护采用现浇钢筋混凝土。施工全程需监测冻结体变形及温度参数。通道衬砌预埋注浆管系统，冻结终止后及时实施壁后注浆，有效填充衬砌与地层间隙，既提升联络通道的防水性能又防止冻融沉降。

5.5 冻结孔封口

封口时要求分组停止冻结，按照从上到下，先冷冻站对侧后冷冻站一侧的顺序进行。用气割沿着管片表面将孔口

管和冻结管割断，再将割枪伸入冻结孔内不小于100mm(冻结管比孔口管多割除10mm)，将冻结管和孔口管继续割除，对冻结管采用M10以上水泥砂浆或C20以上混凝土进行充填，将剩余的100mm区域填满微膨胀水泥，且与混凝土管片内齐平。

5.6 融沉控制

通道施工完毕，进行自然融沉，监测关注土体温度场和位移场的变化。通过注浆管注浆进行融沉控制，据解冻进度实施分区注浆处理。注浆作业分为两个阶段：冻结终止后3-5日进行填充注浆，主要处理冻结体与永久结构间隙；后续实施融沉补偿注浆。注浆过程遵循“多点、微量、多序、均衡”原则，注浆压力严格控制在0.5MPa以内。

6 冻结施工的风险及防范措施

6.1 冻结孔施工中的风险及防范措施

冻结孔钻孔施工过程中存在喷涌、涌水、涌砂等风险。为保障施工安全，需精确放样定位、规范安装孔口装置、严控钻进参数，并设置多级密封结构。应急上制定注浆封堵、聚氨酯或双液注浆等多套应急措施，确保喷涌及时可控。

6.2 开挖中停电、停水、冻结设备故障导致停工的防范措施

为防范停电、停水及冻结设备故障，现场配备应急发电机、备用冷冻机组和充足清水储备。突发故障时，值班人员迅速响应，启用应急设备，通知相关人员停止掘进并进行掌子面支护与保温处理，保障冻结连续性，避免施工中断。

6.3 开挖工作面渗水、土方坍塌风险应急措施

开挖前设置应急安全防护门。施工中如出现渗水，立即停工并封堵漏点，调整冻结参数；若出现土体松冻或掉块，及时保温并加固冻结。若冻结壁破坏引发涌水冒砂和塌方，迅速关闭安全门并注浆封堵，确保联络通道施工安全。

6.4 冻结后的风险及防范措施

冻结后风险主要为融沉。为控制融沉风险，在通道施工完毕后，通过管片注浆孔和通道预埋的注浆管进行注浆加固，且加强监测。

7 结语

本文对杭州某联络通道毗邻承压水层人工冻结法设计及施工技术进行研究，且总结了其常见风险及防范措施。本联络通道在施期间未发生地下涌水等重大风险，验证了毗邻承压水层中人工冻结法施工联络通道的可行性，也可为类似的联络通道冻结工程提供冻结设计和施工参考。

参考文献

- [1] 洪开荣.我国隧道及地下工程近两年的发展与展望[J].隧道建设, 2017(2): 14-25.
- [2] 宋慧军.盾构隧道联络通道冻结法施工地层变形及影响因素研究[J].建筑技术, 2025,56(13): 1622-1627.
- [3] 周佳楠,陈育志,樊晓枫,等.人工冻结法在城市地下空间工程中的应用与发展[J].四川水泥,2024,12(12):218-221.