

浅析地铁车站联络通道冻结暗挖法施工工艺

李 伟

中煤天津设计工程有限责任公司 天津 300000

摘 要：本文全面剖析了地铁车站联络通道冻结暗挖法的施工工艺。首先阐述了冻结法通过人工制冷形成冻土帷幕以隔绝地下水、增强土体强度的原理，并分析了其在高含水量、强渗透性地层中的适用性。接着从施工准备、冻结系统设计、关键施工步骤（如冻结孔施工、积极与维护冻结、暗挖开挖）到监测与风险控制，系统梳理了技术要点。结合工程实践，总结了冻结法在复杂地质条件下的实施策略，为类似工程提供借鉴。

关键词：地铁车站；联络通道；冻结暗挖法；施工工艺

引言：地铁车站联络通道是连接区间隧道的重要结构，其施工需应对高地下水位、复杂地质条件等挑战。冻结暗挖法通过人工制冷形成冻土帷幕，隔绝地下水并提升土体强度，为暗挖施工提供安全环境。本文结合工程实践，总结冻结暗挖法的技术要点及风险控制措施。

1 冻结法原理及适用性分析

1.1 冻结法原理

冻结法是一种通过人工制冷技术，将地层中的水分冻结成冰，形成高强度、封闭性良好的冻土帷幕的施工方法。其核心原理在于利用低温环境使土体中的自由水结冰，冰晶相互胶结形成冻土结构，从而显著提升土体的抗压强度和抗剪强度。冻土帷幕的强度与温度呈负相关关系，温度越低，冰晶的胶结作用越强，冻土的力学性能越优异。冻结法通过制冷系统控制盐水温度（通常为 -25°C 至 -30°C ），并借助盐水循环系统将冷量传递至地层，使冻结范围逐步扩展，最终形成连续、稳定的冻土帷幕。这一过程需动态监测冻土温度、压力及变形，确保冻土帷幕的均匀性和封闭性，为后续暗挖施工提供安全保障。

1.2 适用性分析

（1）地质条件：冻结法适用于含水量高、渗透性强的地层，如粉砂层、粉质黏土层等。此类地层在自然状态下强度较低，且易受地下水影响，传统施工方法难以有效控制变形和涌水风险。冻结法通过冻土帷幕的隔水作用，可将地层中的地下水冻结为冰，形成“人造隔水层”，显著降低地下水的渗透压力，为暗挖施工创造干燥环境。此外，在城市地下管线密集区域，冻结法无需大规模开挖，可减少对既有管线的扰动，适用于空间受限的复杂工况。（2）工程需求：冻结法在控制地层变形方面具有显著优势。冻土帷幕的刚度较高，可有效限制开挖引起的土体位移，减少对周边建构筑物的影响^[1]。

对于邻近地铁隧道、地下管线或高层建筑的联络通道施工，冻结法能够降低施工风险，保障周边环境安全。此外，冻结法施工周期相对可控，可根据工程进度调整冻结参数，适应复杂地质条件下的施工需求。（3）局限性：第一，冻土帷幕退化：供冷不足或外部热源（如地热、邻近施工热影响）可能导致冻土温度升高，强度下降，甚至引发帷幕破裂。因此，需确保制冷系统的稳定运行，并采取隔热措施减少热交换。第二，流水作用：在含水地层中，地下水的流动可能加速冻土消融，影响帷幕稳定性。施工前需进行注浆加固或采取其他止水措施，降低地下水活动性。第三，地层含盐量：高含盐地层可能降低水的冰点，影响冻结效果。需通过试验确定最佳制冷参数，或采取地层改良措施（如注浆置换）。

2 施工准备与冻结系统设计

2.1 施工准备

（1）地质勘察：地质勘察是冻结法施工的基础，需详细分析地层含水量、渗透系数、土质类型等参数。通过钻孔取样、原位测试（如标准贯入试验、静力触探）等手段，获取地层物理力学指标。重点评估地层的冻胀性、融沉性及地下水赋存状态，为冻结孔布置、盐水温度控制等设计提供依据。例如，高含水量地层需加密冻结孔间距，以增强冻土帷幕的连续性；低渗透性地层可适当减少冻结管数量，优化施工成本。（2）设备选型：根据工程规模和需冷量选择制冷设备。常用设备包括螺杆冷冻机组、盐水泵等，需确保盐水温度稳定控制在 -25°C 至 -30°C 之间。螺杆冷冻机组具有制冷效率高、运行稳定的特点，适用于大型联络通道工程；盐水泵需匹配制冷系统流量，确保盐水循环顺畅。此外，需配备备用电源和应急制冷设备，防止因停电或设备故障导致冻土帷幕退化。（3）材料准备：冻结管是冻结系统的核心材料，通常采用 $\Phi 89 \times 8\text{mm}$ 无缝钢管，耐压不低于

0.8MPa。钢管表面需进行防腐处理,延长使用寿命。同时,需准备测温管(如热电偶)、压力表、流量计等监测设备,实时监控冻土温度、盐水压力及流量。测温孔间距一般不超过5m,确保数据准确性。所有材料需经检验合格后方可投入使用。

2.2 冻结系统设计

(1) 冻结孔布置:冻结孔按上仰、水平、下俯三种角度布置,间距控制在1050mm以内。上仰孔可增强冻土帷幕顶部强度,水平孔保证帷幕连续性,下俯孔则加固帷幕底部。冻结孔深度需穿透含水层,并进入隔水层一定距离(如1~2m),防止地下水渗透。孔位偏差应小于100mm,确保冻土帷幕封闭性。(2) 盐水循环系统:盐水循环系统包括制冷机组、盐水泵、集配液圈及冻结管。盐水温度设计为-28℃至-30℃,流量不小于5~7m³/h。为减少热量损失,盐水管需采用聚苯乙烯泡沫塑料保温层,厚度不小于50mm。集配液圈应设置排气阀和泄水阀,定期排除系统内空气和杂质。盐水循环需保持连续性,避免因停泵导致冻土帷幕局部解冻。(3) 监测系统:监测系统是冻结法施工的安全保障,需安装测温孔、泄压孔及变形监测点。测温孔沿冻结孔周边布置,深度与冻结管一致,实时监控冻土温度变化。泄压孔用于释放冻胀压力,防止冻土帷幕破裂^[2]。变形监测点可设置在地表、隧道结构及邻近建筑物上,采用全站仪、水准仪等设备监测位移和沉降。监测数据需实时传输至控制中心,当出现异常时及时采取措施。(4) 应急预案:针对供冷不足、冻土帷幕退化等风险,需制定应急预案。例如,配备备用制冷机组和柴油发电机,确保停电时系统仍能运行;设置盐水加药装置,通过添加氯化钙等防冻剂降低盐水冰点;制定冻土帷幕加固方案,如补充冻结孔或注浆加固。

3 关键施工工艺与操作要点

3.1 冻结孔施工

(1) 钻孔工艺:冻结孔施工是冻结法的基础环节,直接影响冻土帷幕的形成质量。采用强力水平钻机进行钻孔作业,需严格控制开孔位置误差和偏斜误差。开孔位置误差应 $\leq 100\text{mm}$,偏斜误差 $\leq 150\text{mm}$,以确保冻结孔的精准布置。施工过程中,需利用高精度导向仪实时监测钻孔轨迹,避免损伤管片接缝、螺栓等既有结构。对于复杂地质条件(如硬岩层、卵石层),需提前进行地质预处理(如注浆加固),降低钻孔难度。(2) 冻结管安装:冻结管安装后需进行水压试漏,以验证其密封性。试漏压力初设为0.8MPa,经30分钟观察后,若降压 $\leq 0.05\text{MPa}$,则判定为合格。试漏过程中需检查冻

结管接头、焊缝等薄弱环节,发现渗漏需及时修补。试漏合格后,冻结管内应充满盐水,防止锈蚀和堵塞。

3.2 积极冻结与维护冻结

(1) 积极冻结:积极冻结阶段的目标是快速形成连续、稳定的冻土帷幕。利用制冷设备全力运行,将盐水温度控制在-25℃至-28℃之间,持续时间约35天。此阶段需密切监测冻土温度、盐水流量及压力,确保冻结范围按设计要求扩展。当冻土帷幕达到设计厚度(如1.5~2.0m)且温度均匀分布时,可转入维护冻结阶段^[3]。(2) 维护冻结:维护冻结阶段需根据结构施工时间调整盐水温度,一般控制在-22℃至-25℃之间,以维持冻土帷幕的稳定性。此阶段需持续监测冻土温度变化,防止因外部热源(如地热、邻近施工热影响)导致冻土解冻。若发现冻土温度升高,需及时调整制冷参数或采取补救措施(如补充冻结孔)。维护冻结应持续至联络通道结构施工完成并达到设计强度。

3.3 暗挖施工

(1) 开挖方法:暗挖施工采用台阶法,台阶长度控制在2~3m,以减少开挖对冻土帷幕的扰动。上台阶施工时,需设置临时仰拱,采用116工字钢+20cm厚C20混凝土的结构形式,增强支护刚度。下台阶施工时,应及时支撑拱脚,防止拱顶下沉。开挖过程中,需遵循“短进尺、强支护、勤量测”的原则,确保施工安全。(2) 开挖控制:全断面一次开挖步距控制在0.6m,以减少冻土帷幕的暴露时间。挖出土方需经隧道运至提升井,运输过程中需避免碰撞冻结管,防止冻结管被风动工具打穿。开挖面需保持平整,避免出现超挖或欠挖现象。对于局部不稳定区域,可采用注浆加固或钢支撑临时支护。(3) 支护与衬砌:开挖完成后,需及时进行初期支护(如喷射混凝土、钢拱架安装),并设置锁脚锚杆,增强围岩稳定性。初期支护完成后,需进行二次衬砌施工,采用防水混凝土浇筑,确保联络通道的防水性能。衬砌施工时,需预留变形缝,防止因冻胀或融沉导致结构开裂。(4) 施工监测:暗挖施工过程中,需加强监测工作,包括冻土温度、拱顶沉降、周边收敛等。监测数据需实时反馈至控制中心,当出现异常时(如冻土温度升高、变形速率加快),需立即停止施工,分析原因并采取应对措施。

4 监测与风险控制

4.1 工程监测

(1) 地表沉降监测:地表沉降是反映冻土帷幕稳定性的直观指标。监测点沿联络通道轴线及垂直方向布置,间距10~20m,重点区域加密布点。采用高精度水

准仪或全站仪每日观测,记录沉降量,确保不超过设计允许值(如40mm)。若沉降速率超3mm/d或累计沉降接近预警值,需立即分析原因(如冻胀力、支护不足)并采取补救措施(如加强冻结参数、补充冻结孔或注浆加固)。(2)隧道变形监测:隧道变形监测包括收敛变形和拱顶沉降。收敛变形采用收敛计或激光测距仪,沿隧道拱腰、拱顶等关键部位布置测点,每日监测一次;拱顶沉降通过水准仪或全站仪观测,重点关注冻土帷幕形成前后及开挖过程中的沉降变化。当变形速率超2mm/d或累计变形量超设计值的80%时,需暂停施工,分析原因(如冻胀力过大、支护不及时)并采取措施(如增加钢拱架、缩短开挖步距)。(3)冻土压力监测:冻土压力是评估冻土帷幕稳定性的关键参数,通过压力传感器实时监测,频率不低于1次/2小时。若压力异常升高(超设计值1.2倍)或骤降,需及时调整制冷参数或加固,防止冻胀力过大或冻土退化。(4)盐水温度与流量监测:盐水温度和流量直接影响冻土帷幕形成效果。监测数据需实时传输至控制中心,确保温度 $-25\sim-30^{\circ}\text{C}$ 、流量 \geq 设计值(如 $5\sim 7\text{m}^3/\text{h}$)。若温度波动超 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 或流量低于设计值的90%,需检查设备及管道保温层,及时排除故障。

4.2 风险控制

(1)冻土帷幕退化:冻土帷幕退化是主要风险之一,可能由供冷不足、外部热源或地层含水量变化引发。需确保供冷系统稳定运行,配备备用制冷机组和柴油发电机,定期检查盐水泵、管道及阀门密封性。加强地层监测,若发现冻土温度升高,可采取补充冻结孔、降低盐水温度或缩短冻结时间等措施。在外部热源影响区域(如邻近地铁隧道、热力管道),需设置隔热屏障或调整冻结参数。(2)流水作用:流水地层中施工时,流水可能加速冻土消融,导致帷幕失效^[4]。冻结孔施工前需进行注浆加固,采用水泥-水玻璃双液浆或化学浆液填充地层孔隙,降低渗透性。冻结过程中加强盐水温度和流量监测,确保帷幕厚度满足设计要求。发现流水现象

时,可采取局部冻结、注浆封堵或增加冻结管数量等措施。(3)地层含盐量:高含盐地层可能降低水的冰点,影响冻结效果。施工前需进行地质勘察,测定含盐量及离子组成。若含盐量超设计允许值,可采取地层改良措施(如注水稀释、化学药剂处理)或调整制冷参数(如降低盐水温度、延长冻结时间)。加强冻土温度和强度监测,确保帷幕满足设计要求。(4)冻胀与融沉:冻胀和融沉是固有风险,可能引发地表隆起或沉降。优化冻结孔布置,避免局部冻结强度过高;在冻土帷幕外侧设置排水孔,释放冻胀压力。融沉控制需在结构施工完成后进行,通过注浆加固、设置隔离层等措施减小冻土消融影响。(5)施工设备故障:设备故障(如制冷机组、盐水泵)可能导致供冷中断,引发冻土退化。需定期维护设备,配备易损件和备用设备,制定应急预案。故障发生时,需在1小时内启动备用设备,并采取临时保温措施(如覆盖保温被),防止冻土退化。

结语

地铁车站联络通道冻结暗挖法施工工艺复杂,需从冻结法原理、施工准备、关键工艺、监测与风险控制等方面进行系统把控。通过科学设计冻结系统、严格施工操作和实时监测,可有效确保工程安全、高效实施。未来,随着技术的不断进步,冻结暗挖法将在更多复杂地质条件下得到应用。

参考文献

- [1]王鹏耀.地铁车站区间联络通道冻结法施工技术探讨[J].江西建材,2023(1):288-289,292.
- [2]王涛,李晓龙.试析冷冻法施工联络通道安全作业[J].中华建设,2023(12):166-170.
- [3]缪磊.地铁隧道联络通道工程地层冻结法施工技术[J].工程机械与维修,2022(1):226-227.
- [4]陈金刚,郭强,周海龙,等.地铁区间盾构与联络通道冻结加固同步施工技术方案及应用分析[J].现代隧道技术,2023,60(1):233-241,248.