

Research on Construction Technology of Frozen Linkage Channel in Deep Water-rich Soft Soil Layer of Land-sea Interaction

Yuzhang Cui

Guangzhou Metro Construction Management Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510000, Chin

Abstract

The advancement of socio-economic development and the growing transportation demands have driven the refinement of underground rail transit networks. The safe and efficient construction of inter-tunnel connection passages has become a critical focus in the construction industry. Under complex geological conditions such as saturated soft soil and sandy soil, the construction of these passages presents significant challenges. The application of the horizontal freezing method can enhance construction quality and efficiency while ensuring safety. This approach emphasizes four key phases: preparatory stage, freezing system installation and active freezing, excavation and permanent structure construction, and maintenance of freezing and settlement control. This paper analyzes the key aspects of the freezing method in connection passage construction, strengthens technical oversight, and improves construction quality.

Keywords

freezing method; connection passage; construction technology; construction quality

海陆交互深厚富水软土砂层冷冻法联络通道施工技术研究

崔玉章

广州地铁建设管理有限公司，中国·广东广州 510000

摘要

经济社会的发展以及人们交通需求的不断上升推动地下轨道交通网络完善。盾构隧道间联络通道的安全、高效施工也成为了施工界十分关注的焦点问题。而饱和软土、砂土等相应复杂地质条件下，联络通道施工难度是相对较高的，这时则可通过水平冻结法的应用提高联络通道施工质量和效率，保障施工安全，可紧抓施工前期准备阶段、冻结系统施工与积极冻结阶段、开挖与永久结构构筑阶段、维护冻结与融沉控制阶段四个关键阶段，分析冷冻法在联络通道施工中的应用要点，加强技术控制，提高施工质量。

关键词

冷冻法；联络通道；施工技术；施工质量

1 引言

随着城市轨道交通向沿海、沿江地区延伸，隧道联络通道常需穿越典型的“海陆交互富水砂层”地质。该类地层具有高渗透性、高含水率、地层不均匀、受潮汐或地下水活动影响大等特点，传统工法风险极高。人工地层冻结法作为一种“绿色”的临时加固工法，通过将地层中的水冻结成冰，形成高强度、不透水的冻土帷幕，是解决此类富水软土工程难题的最有效方法之一。海陆交互环境的特殊性和富水砂层的高流动性，使得冻结过程、冻土墙形成与维护、施工风险与传统内陆环境有显著差异，亟需进行针对性研究。

水平冻结法又称冷冻法，是通过人工制冷的方式将隧

道周边含水地层冻结成强度高、渗透性低的冻结壁，为开挖构筑作业的开展提供良好的基础，是一种“以冻代撑、以冻代堵”的临时支护与止水方法。合理应用冷冻法可更好地提高联络通道施工的施工质量和施工效率，保障施工安全。尤其在海陆交互富水砂层中，该工法能有效解决传统施工面临的高渗、高流、含盐等难题。相关单位需紧抓以下关键阶段，加强技术控制和技术管理。

2 施工前期准备阶段

需全面查明地层及水文关键参数，不仅包括地下水位、水流速度、方向、含水率、孔隙比、导热系数、土层分布，还需重点明确地下水流动流向、水力联系、盐度分布及潮汐影响规律，同时排查地下障碍物、空洞、透镜体、承压水层等特殊情况，为冻结方案设计提供精准依据。为确保勘查结果准确客观，应采用物探与钻探技术联合应用的方式：先通过高密度电法、地质雷达等技术了解地下地层分布及异常体

【作者简介】崔玉章（1981—），男，中国河南汝南人，本科，高级工程师，从事轨道交通建设管理研究。

情况，再借助钻探技术获取样品，通过室内试验获得物理力学参数，尤其需测试含盐地层的冻结特性参数（如冰点、未冻水含量等）。按照《土工试验方法标准》(GB50123-2019) 和《非金属固体材料导热系数的测定热线法》(GB10297-2015) 测定土壤导热系数，采用 ISOMET 热导仪测定土壤导热系数及比热按照《土工试验方法标准》(GB50123-2019)，采用 XT5201FST 冻土冻结温度测定仪测定土壤的结冰温度试验。

表 1：土壤导热、比热及结冰温度实验结果

序号	岩性	导热系数 λ [w/(m · k)]		比热 [kJ/kg · K]		结冰 温度
		20°C	-10°C	20°C	-10°C	
1	4N-2 粉质粘土	1.239	1.913	1.18	0.732	-0.56
2	4-2BG 固结淤泥质土	1.197	1.68	0.806	0.793	-0.65
3	3-1 粉细砂	1.725	2.01	1.035	0.85	-0.79
4	3-2 中粗砂	1.558	1.978	1.058	1.102	-0.58
5	3-3 砂砾	1.221	1.928	0.873	0.977	-0.27

在此之后则需要进行冻结方案设计。在冻结方案设计中，应紧抓冻结壁设计、冻结孔布置、制冷系统选型和监测系统设计四大关键要点来展开分析。冻结壁设计需根据水土压力，具体问题具体分析，对冻结壁的厚度、平均温度、强度要求作出明确规定，这其中需要尤为引起关注和重视的则是分析平均温度，一般多将平均温度设置为 $-10^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ 之间，这可以更好的保障冻结壁的抗压强度和抗渗透性，一般情况下冻结壁的厚度可通过力学计算确定，分析其是否能够有效应对土压力、水压力以及施工过程中的开挖扰动，若底层为饱和软土地层，需确保其厚度在 1.2m 以上。而在冻结孔设计的过程中需从数量、位置、角度来展开分析。一般情况下，可将冻结孔按单排或双排梅花形布置在隧道管片上，在联络通道开挖轮廓线外侧确定具体位置，孔间距可以设置在 $0.8\text{m} \sim 1.2\text{m}$ 之间，为后续冻土柱能够有效搭接奠定良好的基础。在制冷系统选型中，应根据冻结壁的总热负荷，确定制冷量，在此基础之上，对制冷机组进行选择，确定盐水循环泵、冷却塔及配套管道系统的设计。最后需设计实时监控系统，更好地明确冻结过程、地层变形、结构安全等相应信息^[1]。

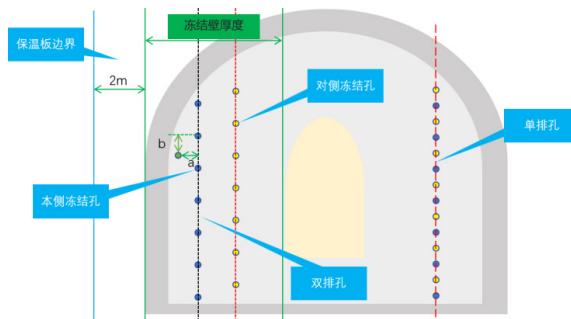


图 1：冻结示意图

在方案设计的过程中，需注意不同地质条件下，冻结

方案中冻结孔间距、冻结管直径、积极冻结时间和冻结壁平均温度都是存在鲜明差异的，必须坚持具体问题具体分析的原则，对方案参数作出适当调节，如表 1 所示。例如砂土的导热系数是相对较高的，因此相较于其他土质，砂土的冻结速度快，但是在使用冷冻法过程中也很有可能会因水分迁移活跃出现冻胀问题。再例如黏土的导热系数较低，因此冻结速度更慢，但是其塑性强，冻胀融沉的变形会更大，因此应根据前期的勘测数据，明确不同地区的地质特点，针对性的分析可能出现的问题，并对冻结方案参数作出科学调整，始终保障冻结方案的可靠性、针对性和适切性，进而有效提升施工质量。

3 冻结系统施工与积极冻结阶段

在冻结系统施工与积极冻结阶段，需紧抓冻结孔施工、制冷系统安装与调试、积极冻结与过程监测三大关键要点，加强技术控制。在冻结孔施工的过程中，需关注盾构隧道中作业面狭小的问题，可采用专用仪器设备，定向施工钻好冻结孔，在施工建设的过程中，应严格按照设计图纸，确定钻孔的角度及深度。一般多使用水平定向钻机，保障施工精度达标，符合设计要求。在钻孔结束以后，可下入无缝钢管作为冻结管，同时孔口与管片之间的间隙应采用高压注浆进行密封，避免出现地下水流入或盐水渗漏的问题^[2]。

在制冷系统安装与调试的过程中需要根据设计图纸明确制冷机组、盐水箱、循环泵等相应设施设备的安装位置，并且根据设计图纸布设盐水循环管道，形成闭合回路。在安装结束以后可通过压力测试和全面调试工作的落实，确保所有设备及管道能够正常使用。

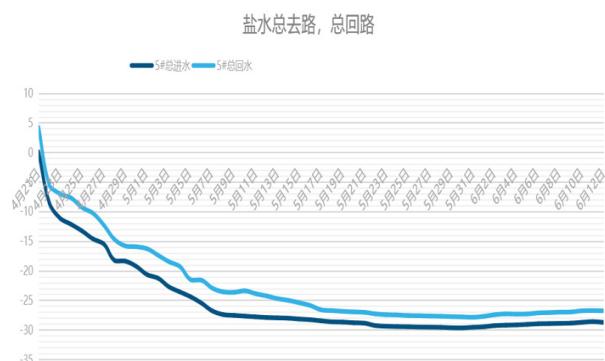


图 2：积极冷冻盐水总去路、总回路

在积极冻结与过程监测的过程中需先启动制冷机组，将氯化钙盐水溶液冷却至 $-25^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$ ，通过循环泵压入冻结管中，形成冻结壁。通过冻结系统监测、冻结壁监测和环境与结构监测，动态调整制冷系统参数。但需要明确监测频率及技术要求，保障监测结果可靠，可应用于运行参数调整当中，如表 2 所示。在冻结系统监测中，应紧抓盐水温度、流量、压力及制冷机组运行参数等相应关键要点进行监测，盐水温度、流量和压力应每小时监测一次，而制冷机组运行参数则

需要持续监测，确保出口温度、压力稳定，流量均匀无堵塞且电压、电流、油温、油压等参数正常。在冻结壁监测中应紧抓温度场和壁厚进行监测，确保冻结壁的温度均匀且达到设计标准，同时保障冻结壁的厚度符合要求。环境与结构监测中可以着重监测地表沉降 / 隆起问题、临近隧道管片位移问题及邻近地下管线变形问题，一般情况下地表沉降 / 隆起的速率应在 3mm/ 天以下，管片收敛值、径向位移值以及邻近地下管线变形量都需要做出特殊规定，明确安全限值^[3]。

4 开挖与永久结构构筑阶段

在正式落实开挖作业之前相关工作人员需要通过钻芯取样的方式展开室内实验，了解冻结壁的实际强度，分析其是否达到了设计标准。与此同时，还需要在开挖面中心位置打一个探查孔，用于分析冻结壁的密闭性是否达到标准和要求。若探查口中并无明显水流，则代表冻结壁隔水效果达标，后续开挖作业可以进行^[4]。

在开挖中需要分步开挖并做好临时支护工作，这可以最大限度地降低对冻结壁产生的扰动和影响。一般情况下，在开挖作业开展的过程中，应坚持“短进尺、多循环”的原则。例如，相关工作人员可以先完成上半断面的开挖作业，在贯通结束以后，落实下半断面的开挖，每次循环的开挖进尺可以控制在 0.5~1m 之间。在开挖作业结束以后，应当立刻通过架设钢拱架、铺设钢筋网、喷射混凝土的方式，完成初期支护，支撑暴露的冻结壁，避免因温度回升导致其强度下降。

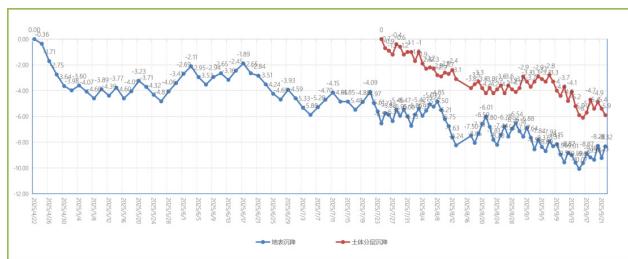


图 3：开挖期间监测数据

在此之后进行永久结构施工，先完成防水层铺设，然后绑扎钢筋、立模，最后完成防水混凝土的浇筑作业。在浇筑作业开展的过程中应当坚持分层对称的原则，同时在混凝土浇筑结束以后应当振捣密实，以此来保障结构的密实度和耐久性。然后落实混凝土养护作业，当混凝土的强度达到设计标准和要求时，则可以拆除临时模板^[5]。

5 维护冻结与融沉控制阶段

在永久结构施工结束以后，还需做好冻土融化问题的

预测、分析和处理。在混凝土养护期间，需做好冻结维护，保障制冷功率达标，进而确保冻结壁的稳定性。只有当混凝土的强度达到设计标准和要求，能够独立承受水土压力以后，才可以停止制冷。

在此之后则需要进行人工解冻和融沉控制。在制冷结束以后，冻结壁会出现自然融化，这时土体体积会收缩，引发地面沉降及融沉风险，影响施工质量。为此，在该环节，相关工作人员应当严格控制融化速度，通过逐步提高盐水温度或分段停止冻结管供冷的方式，缓慢、均匀地解冻。这样融化水则可以被周围土体吸收，也可以通过排水系统排出。然后工作人员则需要跟踪注浆，即在冻结孔施工时，应当预埋注浆管，在解冻的过程中，根据监测数值，了解地表沉降状态，然后向融化区的土体中注入水泥浆或化学浆液，用于填补空隙，补偿土体的体积损失，进而将地面沉降控制在允许范围内^[6]。

6 结束语

在联络通道施工过程中，冷冻法的应用可有效保障施工质量和安全，尤其在海陆交互富水砂层这类极端复杂地质条件下，其优势更为显著。该类工程是“水文地质是基础，冻结设计是核心，过程控制是关键，风险防控是保障”的系统工程，需聚焦水流与盐分两大核心影响因素，通过理论分析、数值模拟、现场试验与智能监控相结合的手段，攻克关键技术难题。相关工作人员需严格把控施工前期准备、冻结系统施工与积极冻结、开挖与永久结构构筑、维护冻结与融沉控制四大阶段，强化精细化勘察、针对性设计、智能化监测、精准化控制，全面提升施工技术水平，为类似极端复杂地层条件下的地下工程建设提供安全、可靠、经济的解决方案。

参考文献

- 陈铭辉. 侧壁式冷冻法联络通道施工技术研究 [J]. 建设监理, 2024, (09): 111-114.
- 高民富. 非对称异性隧道联络通道冷冻法施工技术 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (03): 157-162.
- 赵杰. 地铁运营线路冷冻法施工联络通道沉降后道床结构整治施工技术分析 [J]. 工程技术研究, 2024, 9 (02): 55-57+136.
- 王巍. 钱塘江冲海粉砂地层联络通道冷冻法施工技术研究 [J]. 四川水泥, 2024, (01): 16-18.
- 武相坤, 豆红尧, 张元师, 等. 冷冻法施工技术在盾构区间联络通道施工中的应用研究 [J]. 价值工程, 2023, 42 (34): 93-95.
- 赵王飞. 冷冻法联络通道地面注浆改良地层施工技术 [J]. 中国新技术新产品, 2022, (03): 123-125.