

基于数值模拟的穿越湖底地铁区间冷冻法联络通道施工过程分析与优化

杨帆 王鹏

(中交中南工程局有限公司, 湖南 长沙 410004)

【摘要】文章围绕武东站至鼓架山站区间 2# 联络通道的施工项目, 采用数值模拟方法分析了冷冻法施工过程。研究首先对工程概况和地质条件进行了详细分析, 然后通过数值模拟了冻结过程, 并对施工影响进行了评估。通过实际施工案例的详细对比分析, 验证了数值模拟结果的准确性, 并基于此提出了针对性的优化措施。这些措施在实际施工中得到了应用, 显著提高了施工效率和安全性。文章展示了数值模拟技术在复杂地铁工程中的应用价值, 对未来类似工程的安全施工和风险管理提供了重要的理论和实践参考。

【关键词】冷冻法施工; 数值模拟; 地铁工程; 风险管理; 施工优化

引言

随着城市化进程的加速, 地铁作为城市公共交通的重要组成部分, 在缓解城市交通压力、提高城市运行效率方面发挥着至关重要的作用。穿越复杂地质条件, 特别是湖底区间的地铁施工, 不仅技术难度大, 而且风险高, 尤其是在采用传统开挖方法难以实施的情况下。冷冻法作为一种有效的地下土体加固方法, 在此类工程中得到了广泛应用。然而, 冷冻法在施工过程中需要精确控制冻结参数, 以保证结构安全和施工效率。

文章在通过数值模拟方法, 深入分析和优化穿越湖底地铁区间采用冷冻法施工的过程。针对地铁联络通道在特殊地质条件下的施工挑战, 本文将运用先进的数值模拟技术, 模拟冻结过程中的热力学行为及其对周围环境的影响, 以期找出更为科学合理的施工参数和方法。

一、文献综述

(一) 国内外冷冻法施工技术发展概述

冷冻法作为一种历史悠久的地下工程施工技术, 其原理是利用低温介质降低土体温度, 从而提高其强度和稳定性。自 19 世纪末首次应用以来, 该技术已在全球范围内得到广泛应用。早期, 冷冻法主要用于矿山和地下水源控制, 在 20 世纪中后期开始广泛应用于城市地下空间开发。近年来, 随着城市地铁建设的快速发展, 特别是在复杂地质和敏感环境下, 如穿越湖底或河底区段, 冷冻法的应用越来越普遍。

(二) 数值模拟在地铁施工中的应用研究

数值模拟技术在地铁工程中的应用已逐渐成为工程设计和施工的重要组成部分。通过对施工过程中的地质条件、工程材料特性以及施工方法的模拟,

工程师能够预测并优化施工策略, 有效控制风险。特别是在冷冻法施工中, 通过数值模拟可以更加准确地预测冻结帷幕的形成和冻结效果, 为施工提供了重要的技术支持。例如, 在武东站至鼓架山站区间 2# 联络通道的工程中, 数值模拟在设计和施工阶段均发挥了关键作用。

(三) 穿越湖底地铁区间施工技术挑战与对策

穿越湖底地铁区间的施工面临着众多挑战, 如不稳定的地质条件、水压力的影响、环境保护要求等。在这种情况下, 采用冷冻法进行施工是一种有效的解决方案。该方法能够在不干扰水体的前提下, 稳定地下土体, 为隧道开挖提供安全的工作环境。如在鼓架山站至武东站区间 2# 联络通道的实例中, 工程团队通过冷冻法成功克服了多种技术难题。同时, 应对此类工程的挑战还需要综合考虑环境保护、施工成本和工期等因素, 确保工程的顺利进行。

二、工程概况与现场实际情况分析

(一) 工程概述(武东站~鼓架山站区间 2# 联络通道特点)

武东站至鼓架山站区间 2# 联络通道是武汉市轨道交通 19 号线工程的重要组成部分。该区间的左线长度为 3179.887 米, 右线长度为 3167.3 米, 设有四处联络通道。2# 联络通道特别采用了冷冻法与矿山法暗挖相结合的施工技术, 覆盖在严西湖湖底, 水深约 2.91 米, 联络通道覆土厚度在 14.0 至 17.1 米之间。此联络通道具有较高的技术难度和安全风险, 是一个技术上具有挑战性的项目。

(二) 地质条件分析

2# 联络通道所处的地层主要由强风化泥质粉砂

岩、中风化泥质粉砂岩构成，顶部有粉黏土混合粉砂。这些地层在风化程度、坚硬程度和水文地质条件上存在较大差异，对施工造成了一定的困难。强风化泥质粉砂岩表现为极软岩，节理发育，岩体破碎，属于V级基本质量等级，而中风化泥质粉砂岩则表现为硬塑至坚硬状态，表明地质条件复杂，对施工安全和效率提出了更高的要求。

（三）冻结法施工技术要点

针对2#联络通道的特殊地质条件和环境要求，采用冷冻法施工是一种有效的解决方案。冷冻法施工主要包括冻结孔打压试漏、冻结孔测斜、冻结站安装及运行等关键步骤。施工中，冻结孔数量共45个，测温孔7个，泄压孔4个，冷冻机运行期间温度降低明显，满足了设计要求。通过对冻结效果的评估，冻结帷幕厚度、平均土体温度等指标均满足设计要求，显示出冻结效果良好。此外，针对冻结法施工中可能遇到的风险，如冻结壁局部变软、冻胀对隧道的影响等，项目组制定了详细的风险管控和应急处置措施，以确保施工安全和效率。

三、数值模拟方法与模型构建

（一）数值模拟软件的选择与理由

在武东站至鼓架山站区间2#联络通道的工程中，采用了数值模拟软件以精确模拟冷冻法施工过程。选择合适的数值模拟软件是至关重要的，因为它直接影响到模拟的准确性和效率。在此项目中，选择了具有高效处理复杂地质条件和施工过程的软件。这种软件支持多物理场耦合分析，可以准确模拟冷冻过程中的热传递、土体力学行为以及冻胀影响。此外，软件的选择还考虑了其友好的用户界面和强大的后处理功能，以便于分析和解释模拟结果。

（二）模型构建的方法与步骤

模型构建是数值模拟的关键步骤，它决定了模拟的准确性和可靠性。首先，根据工程地质调查资料和现场实测数据，建立了地质模型，包括地层结构、岩土物理力学性质等。接着，模拟中考虑了冻结法施工的各个关键因素，如冻结管布置、冷冻机运行参数等。同时，为模拟真实工况，还加入了湖水的热影响和施工中的动态变化。在模型构建过程中，细致地划分了网格，并对关键区域进行了局部细化，以提高模拟的精度。

（三）模型验证与参数校准

为确保数值模拟的准确性，模型验证和参数校准是不可或缺的步骤。通过与现场试验数据和历史案例进行对比，验证了模型的有效性。在此项目中，特别关注了冻结壁的形成速度、温度分布和冻结效果。通过调整模型中的热物理参数，如热导率、比热容等，

以及施工参数，如冷冻剂流速和温度，确保模型能够准确反映实际冻结过程。此外，还进行了敏感性分析，评估了不同参数变化对模拟结果的影响，以优化模型设置和提高预测的可靠性。

四、施工过程数值模拟分析

（一）冻结过程模拟

武东站至鼓架山站区间2#联络通道的施工特别采用了冷冻法。在数值模拟中，主要关注的是冻结过程的模拟，这包括冻结管布置、冷冻机运行参数等关键因素。模拟结果显示，冻结帷幕在设计的时间范围内成功形成，土体温度有效降低。模拟中特别注意了冻结壁的形成速度和温度分布，以确保冻结效果符合设计要求。

（二）施工影响评估

施工影响评估是数值模拟的重要组成部分，主要目的是评估冷冻法施工对周围环境的影响。这包括对邻近建筑物、地面沉降、水文地质条件等的影响评估。模拟结果表明，冷冻法施工对周围环境的影响处于可控范围内，未对邻近建筑物造成不利影响，地面沉降和水文地质条件均符合安全要求。

（三）风险点识别与安全评估

在冻结过程中，识别潜在的风险点并进行安全评估是至关重要的。数值模拟中关注的风险点包括冻结壁的稳定性、冻胀对结构的影响等。模拟结果用于评估这些风险点，以便采取相应的预防措施。例如，模拟指出，冻结壁在某些区域可能存在不稳定的风险，因此提出了加强监测和加固措施，以保证施工安全。

五、施工过程优化策略

（一）冻结参数优化

武东站至鼓架山站区间2#联络通道的冻结法施工中，冻结参数的优化至关重要。通过数值模拟和现场试验数据，对冻结参数进行优化，包括冻结剂的温度、流速和冻结周期等。优化目标是在确保冻结效果的同时，尽可能减少能耗和施工成本。通过对冻结过程的详细监测，实时调整冻结参数，以适应地下不断变化的地质条件和施工环境。

（二）施工工艺调整建议

为了提高施工效率和安全性，对施工工艺进行适当调整是必要的。在武东站至鼓架山站区间2#联络通道的施工中，建议采用分阶段施工策略，先对关键和风险较高的区域进行冻结处理，然后逐步扩展到其他区域。此外，考虑到冻结法施工的特殊性，建议增加监测点，加强对冻结壁稳定性和土体变形的监测，及时调整施工步骤和方法。

（三）安全控制与风险管理

施工安全是工程中最重要考虑因素之一。在冻

结法施工中，需要严格执行安全管理措施，包括但不限于定期安全培训、严格遵守操作规程、加强现场监管等。特别是在冻结法施工中，需要特别关注冻结壁的稳定性和冻胀对结构的影响以及可能出现的地下水和泥沙流失等问题。通过建立和实施严格的风险管理体系，及时识别和处理可能出现的风险点，确保施工过程的安全和顺利。

六、案例分析

（一）施工实际案例

在武东站至鼓架山站区间 2# 联络通道的施工项目中，面临了复杂的地质条件和严格的环保要求。项目采用了冷冻法结合矿山法暗挖进行施工。工程位于城市繁华地区，周围环境敏感，对施工过程中的安全性和对周边环境的影响有着严格的控制要求。施工过程中，重点关注了冻结效果的实现、对邻近建筑物的影响以及地面沉降控制。

（二）数值模拟结果与实际施工对比分析

通过数值模拟，预测了冻结壁的形成速度和冻结效果，这对于指导实际施工具有重要意义。数值模拟结果显示，冻结壁在预定时间内能够有效形成，且对邻近建筑物和地面沉降的影响均处于安全控制范围内。在实际施工过程中，这些预测得到了验证。尽管在某些阶段出现了轻微的偏差，但通过调整冻结参数和加强现场监测，这些问题得到了及时的解决。

（三）优化措施的实际应用效果

根据数值模拟的结果，在实际施工中采取了一系列优化措施。这包括调整冻结剂的流速和温度，以及改进施工工艺，如采用分段施工法以减少对周边环境的影响。这些措施显著提高了施工效率，同时确保了工程的安全性。特别是在冻结壁的稳定性和土体变形控制方面，优化措施有效降低了风险，保证了工程顺利进行。

七、结论与建议

（一）研究成果总结

文章针对武东站至鼓架山站区间 2# 联络通道的冷冻法施工项目进行了全面分析，包括工程概况、地质条件、冻结法施工技术要点、数值模拟方法以及施工过程的优化策略。数值模拟的应用在施工过程中证明了其准确性和效率，特别是在冻结过程的模拟、施工影响的评估以及风险点的识别方面。通过与实际施工数据的对比分析，文章验证了数值模拟在优化施工参数和提高工程安全性方面的有效性。

（二）实践意义与应用价值

文章的成果不仅对武东站至鼓架山站区间 2# 联络通道的施工项目具有重要的指导意义，也为类似的复杂地铁工程提供了宝贵的经验和技术支持。数值模拟

的应用可以帮助工程师在施工前有效预测和规划施工过程，减少不确定性和风险。此外，文章中提出的优化策略和风险管理措施对提升复杂地下工程的安全性和效率有着重要的实践意义。

（三）后续研究方向与建议

文章的成果展示了数值模拟在复杂地铁工程中的应用价值，同时也揭示了一些局限性和未来的研究方向。为了进一步提升地铁工程的施工技术，推动城市地下空间开发的安全、高效和可持续发展，建议后续研究集中于以下几个关键领域：首先，技术创新方面，需要进一步探索和发展更先进的数值模拟技术，以提升模拟的准确性和适用性。其次，广泛应用文章方法于多种类型的地铁工程，尤其是在更复杂或不同地质条件下的工程，以验证和完善提出的方法。同时，对冷冻法施工中的风险管理策略进行深入研究，特别是在环境保护和可持续发展方面的应用。此外，加强地质学、工程技术和数据科学等领域的跨学科融合，以优化施工过程并提高工程安全性。最后，进行长期的工程监测和后评估，评价施工优化措施的长效性和可靠性，以确保长远的工程成功和环境的可持续性。通过实施这些建议，未来的研究将为地铁工程的施工技术带来更全面的提升，为城市地下空间的发展贡献重要力量。

参考文献：

- [1] 王开运, 闫旭, 张一卓. 盾构隧道下穿高速公路桥梁力学性能的数值模拟 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2023, 33(05): 718-723.
- [2] 路沙沙, 白晓晓, 张亚楠等. 隧道侧穿箱基框架结构体系振动台试验及数值模拟 [J/OL]. 地震研究, 1-14 [2023-11-18].
- [3] 汤新辉, 雷涛, 刘维正等. 地铁盾构小净距上穿既有有线变形数值模拟及施工控制 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(09): 80-88.
- [4] 李星宇. 用冷冻法施工地铁区间联络通道的控制要点分析 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2022(10): 4.
- [5] 万敏, 宿文德, 邵耳东. 地铁隧道联络通道机械法施工对主隧道受力影响分析 [J]. 建筑科技, 2021, 5(1): 21-23, 31.

作者简介：

杨帆 (1991-), 男, 汉族, 陕西咸阳人, 学士, 工程师, 研究方向: 轨道交通;

王鹏 (1991-), 男, 汉族, 湖北当阳人, 学士, 工程师, 研究方向: 轨道交通, 自动化技术。