

Key Technologies and Risk Control for Subway Tunnel Construction under Complex Geological Conditions

Liguo Tian

China Railway 11th Bureau Group Urban Rail Engineering Co., Ltd., Dongguan, Guangdong, 523867, China

Abstract

In the construction process of subway tunnels, facing severe challenges posed by complex geological conditions, especially in soft soil layers in the East China region, their characteristics are characterized by loose structure, weak bearing capacity, and high compressibility, which directly leads to many problems such as deformation, subsidence, and infiltration of the tunnel. Therefore, adopting a series of core technologies has become inevitable, including advanced geological prediction, shield tunneling technology, and geological reinforcement technology, aimed at overcoming such geological difficulties. At the same time, strict risk control and scientific management in the construction process are indispensable. More careful and targeted strategies need to be implemented in civil engineering, track layout, and tunnel structure durability to ensure smooth construction and long-term stability and safety of the project. This study explores the core technical means and risk control strategies for subway tunnel construction in complex geological environments through multidimensional analysis, aiming to propose efficient response plans to geological challenges and contribute theoretical support and practical guidance to subway tunnel construction practice.

Keywords

complex geological conditions; subway tunnel; key technologies; risk management

复杂地质条件下地铁隧道施工关键技术及风险控制

田立国

中铁十一局集团城市轨道交通工程有限公司, 中国·广东 东莞 523867

摘要

在地铁隧道的建设进程中, 面对复杂地质状况构成的严峻考验, 尤其在华东区域的软土层地层, 其特性表现为地层结构疏松、强度低, 且压缩性较高, 直接导致隧道易发生形变、下沉与渗透等诸多问题。因此, 应用一系列核心技术成为必然, 涵盖超前地质预测、盾构掘进工艺及地层强化技术等, 旨在克服此类地质难点。同时, 施工环节中风险的严格管控与科学管理不可或缺, 需在构建筑物、轨道布局及隧道结构耐久性等方面实施更为周密且具有针对性的策略, 确保施工流畅性与项目长期稳固安全。本研究通过多维度分析, 探讨了在复杂地质环境下地铁隧道建造的核心技术手段与风险调控策略, 旨在提出应对地质风险的高效解决方案, 为地铁隧道建设实践贡献理论支撑与实操导向。

关键词

复杂地质条件; 地铁隧道; 关键技术; 风险控制

1 引言

地铁隧道建设作为城市基础设施的关键要素, 尤其在华东区域显得尤为重要, 该地区的地质环境复杂多变, 软土层的普遍存在给隧道修建带来了重大的技术挑战。因此, 探索并实施有效的策略以确保在如此复杂的地质条件下隧道施工进程的顺畅, 成为当前亟须应对的课题。施工实体需在技术革新与风险管理上双管齐下, 不仅要强化内部管理, 还要勇于创新, 以此来确保地铁隧道建设的安全性 with 工程质量能够达标。

【作者简介】田立国 (1989-), 男, 中国湖北潜江人, 本科, 工程师, 从事城市轨道交通、地下工程研究。

2 隧道施工经常出现的地质情况

2.1 软土地层的松散性和高强度压缩性

华东地区的软土地带主要集中于长江三角洲区域, 土体构成主要为淤泥质土、黏土、砂层, 其基本特性体现为土质疏松、孔隙度高及水分饱和。在这样的地质环境下, 土体承受力极为有限, 施工环节中易发生地层形变甚至地面下沉情况, 尤其在隧道挖掘施工期间。采用盾构法施工时, 软弱的土体易在压力作用下发生坍塌, 从而影响隧道周围土体的稳定性。另外, 软土地层的高强度压缩性进一步增加了地面沉降的风险, 这一问题在地下水状态受到干扰时更为严峻, 对隧道建设的安全稳定构成了重大考验^[1]。

2.2 软土层中的地下水丰富

华东地区的软土地带蕴含了丰富的地下水资源, 尤其

是在沿海区域及河网密布地带，地下水位表现得尤为突出。这一地质特点不仅加剧了隧道挖掘过程中水分渗透的风险，还致使土体强度的减损，施工挑战显著增加。当软土层达到饱和状态，土体颗粒间的黏聚力下降，导致隧道周边的土体更易发生形变乃至塌陷。因此，隧道施工对于防水性能的要求被提升到了新的高度，要求隧道衬砌材料必须具有卓越的防水特性。另外，地下水的渗入还可能诱发电化学腐蚀、土体软化等一系列问题，施工环节中必须强化排水及防水策略，以应对这些潜在威胁。

2.3 土体流动性和不均匀沉降

华东地区的软土层表现出较高的流变特性，尤其是在地下水充沛的环境下，外力作用易于诱发土层的位移乃至流动现象。隧道挖掘工序中，这种土体质地的流动性问题可触发地表不平衡沉降，使得隧道构造承受非均匀压力分布，进而可能引发衬砌结构的裂纹生成或形态变化。此外，地表构筑物及邻近的地铁线路系统也有可能因基础沉降而遭受损害，表现出裂缝生成、倾斜、沉降甚至塌方等不良后果，此外，还可能导致管线破裂、地基不均匀沉降引发的设备损坏、墙体脱落，以及地下设施渗水等问题^[2]。

3 复杂地质条件下地铁隧道施工关键技术

3.1 超前地质预报技术

地质超前预测技术是地铁隧道施工安全不可或缺的工具，尤其在地质构成复杂的环境中，其重要性更为显著。该技术能够在隧道挖掘作业前实现对即将面临的地质状况的精细勘探，预判诸如软土地层的不稳定性、高水位地带及潜在空腔或断层等风险因素，为施工策略的制定提供坚实的科学基础。通过运用此技术，可以大幅度减少突发地质灾害事件的发生概率，强化施工环节的安全保障与可操作性，同时指导施工技法的选择与工程项目设计。

3.2 盾构施工技术

在复杂地质环境下，隧道挖掘的关键技术之一便是盾构施工技术，它在诸如软土地质的地铁隧道建设中展现出极高的适应性。该技术依托于盾构机（图1）的精密操作，保障了隧道开挖过程的持续稳定状态，同时大幅度降低了周边地层的干扰程度，有效抑制了地层坍塌及不平衡沉降现象的发生风险。盾构机械的前进机制与其支撑体系协同作业，确保了隧道内部与外界压力的均衡，防止土体结构变动及地面沉降问题。此外，该技术还表现出优越的防水特性，即使在渗水环境下也能保证施工的连贯性，并减轻水分侵入对隧道建构的不良影响，从而在软土地质应用中显著增强了隧道建设的安全等级与作业效率^[3]。

3.3 地层加固技术

在进行地铁隧道施工穿越软土地层的情况下，实施地层加固措施是确保施工安全性与隧道结构稳定性的关键策略。该技术致力于提升地层数承载性能，加固土体以稳固其

结构，同时削减地层流动可能性与地面沉降的潜在风险。针对软土地层特有的疏松度高与高压缩性问题，加固技术能大幅度改善土体强度特性，有预防隧道挖掘期间发生土体崩塌或形态变异的效用。此外，它不仅巩固了隧道的结构稳定性，还显著延长了隧道的服务寿命，缩减了未来维修及修复所需的开支。



图1 盾构机——挖掘地铁隧道的“铁蚯蚓”

3.4 隧道衬砌技术

在复杂地质环境下，地铁隧道建设中的隧道衬砌技术扮演着不可或缺的角色。通过精心设计的衬砌结构与严谨的施工工艺，能有效抵挡地层挤压所导致的外部应力，确保隧道挖掘期间及后期运营免受形变困扰。此技术不仅赋予隧道必要的支撑力，还显著提升了其防水效能，尤其在诸如软土层或富含地下水的地质条件下更为关键。选用高水准的衬砌技术，旨在加强隧道结构的稳固性和长久性，缩减渗漏风险^[4]。

4 复杂地质条件下地铁隧道施工的风险控制策略

4.1 地质勘探与评估的精准化

在复杂地质环境下，实现地质勘查与评估的高精度是地铁隧道建设中风险管理的首要步骤。以华东区域为例，其特有的软土层展现出多样化的土质构成与水文特性，因而，在施工筹备阶段，综合运用多种尖端勘查技术，包括钻探、物探、声纳探测及地下水位监控等手段，来收集全面的地质数据显得尤为重要。这些技术手段助力工程师系统分析土体的物理特性和力学行为，辨别土层结构及可能存在的弱点。同时，构建一个地质信息动态更新系统，在施工期间持续监视现场地质状况的变化，保证施工策略能及时调整与完善，显得尤为关键。通过上述高精度的勘查与评估流程，工程团队能预先察觉地质风险，如地面沉降、地下水渗入或土体移位等，为制定既科学又具备操作性的施工规划奠定基础。这种侧重于风险预控的管理模式极大降低了施工期间的不可预见性，并容许在施工前期采取精确的加固措施，保障隧道建设项目平稳推进与安全运维^[5]。

4.2 施工过程中的监控量测

强化即时监控与测量工作致力于实时捕获地层变动及隧道构造的动态信息，为有效实施风险管控提供坚实的数据

支撑。以华东区域的软土地质施工为例,常规采用的监控方法涵盖了沉降观测、隧道内部应力监测及地表形变监测等。通过设置沉降观测点并周期性测定地面高度的微小变化,沉降观测能迅速识别由土体压缩或地下水位波动导致的下沉现象。隧道内部应力监测则可直观反映出隧道结构实际承受的压力负荷,确保结构的稳固性。至于地表形变监测,则运用激光测距仪、全站仪等先进工具,严密监视地表的任何畸变迹象,尽早预警潜在安全隐患。这些第一手监控资料为工程团队提供了宝贵的反馈,使他们在施工作业中得以灵活调整施工参数,优化施工作业流程,从而预先排除地质灾害的突发可能。另外,加大对监控数据分析力度与归纳总结,有助于辨识趋势与规律,进一步细化施工操作的精确度与安全性。同步实施定期地质风险复审,并结合现场监控的实时反馈,可全方位把握施工地带的地质面貌,为施工安全再添一层保障。

4.3 土体加固

在华东区域内的软土地质环境中,提升土体稳定性和管理地下水排放是确保地铁隧道建设安全的关键风险管控策略。这类软土地层通常表现出高孔隙度及高压缩性的特征,由此引发的承载力不足问题易导致地表沉降及坍塌等安全隐患。通过实施注浆加固技术、使用搅拌桩等方式,可以显著增强土体的承载能力。这些加固措施可以在施工前或施工过程中进行,旨在改良土体的物理属性,从而降低由于土体流动性带来的施工风险。在盾构法掘进作业中,土体加固至关重要,能够有效提升土层的稳定性,防止地下水及其他外部因素对土体结构的侵蚀。此外,采用多种加固技术的组合应用,能够进一步提升土体的抗压和抗剪强度,为地铁隧道的施工提供更为坚实的基础。针对不同的土体条件,合理选择加固方案,并进行动态评估与调整,是确保土体加固效果的关键。

4.4 应急预案与安全管理

针对华东区域地铁隧道建造中遭遇的软土层特性及其带来的复杂与不确定性挑战,彻底规避风险实属不易,故此,制定周密的应急计划显得极为关键。该计划需全面涵盖各类可能突发险情,涉及地面下陷、隧道渗透、机械故障及人员伤亡等。透过全面性的风险评估程序,可精准辨识出潜在高发风险类别,并依据风险特质,规划相匹配的紧急应对策略。预案内容应融入快速疏散指引、应急救援程序及资源配置蓝图,确保在不测事件突发之际能迅速且高效地做出响应。此外,应该确保应急救援队人员接受严格的安全教育、培训,使队员熟练掌握安全操作规范及应急流程。定期执行安全演习活动,旨在提升工人的应急反应速度,为实战中的应急处置积累宝贵经验(图2)。同时,施工设备的维护与监管一

样重要,定期实施检查与保养作业,确保持久稳定的机械性能,从而降低因器械故障而触发安全事故的概率。最后,现场管理层需建立健全信息反馈系统,即刻搜集并剖析施工进程中的安全信息,定期复审与更新应急方案,以适配不断变化的施工环境^[6-8]。



图2 应急演练——地铁隧道施工涌水涌砂应急实战

5 结语

面对复杂地质环境下的建设难题,地铁隧道工程在华东区域软土层中遭遇了多重挑战,亟须采取精确有效的技术策略及风险管控办法。通过科学化的施工工艺与前沿技术、工具的融合,并实施严格的安全生产管理体系,可以保障地铁隧道建造的平稳推进与长期安全运维,从而增强城市轨道交通系统的稳固性与信赖度。此举不仅能够有效缓解城市交通的拥堵状况,还促进了区域经济的蓬勃增长。

参考文献

- [1] 王震.西安地铁地裂缝段隧道结构及防水技术研究[J].西北大学学报:自然科学版,2011,41(3):4.
- [2] 门玉明,张结红,刘洪佳,等.西安地铁隧道穿越地裂缝带的计算模型探讨[J].地球科学与环境学报,2011,33(1):6.
- [3] 韩日美,王彦臻.西安地铁二号线降水技术总结与探讨[J].陕西建筑,2008(12):5.
- [4] 洪辉.城市民用建筑岩土工程勘察技术的应用[J].广西质量监督导报,2008(6):2.
- [5] 董天军,赵蓓蕾.深圳地铁某区间暗挖隧道渗漏水治理[J].低温建筑技术,2011(4):2.
- [6] 赵鹏程,周奇林.国内深基坑支护设计中常遇到的问题与解决措施[J].广州中山大学学报,2018(6).
- [7] 侯俊玉,卢海娜.不断创新企业内部会计控制以提高会计信息质量[J].经济技术协作信息,2010(24):1.
- [8] 陈磊.地质勘查单位会计信息质量对资本市场的影响分析[J].财会通讯:综合(中),2019(6).