

复杂地质条件下地铁深基坑风险分析与控制对策

刘松

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450000

【摘要】：深基坑工程作为地铁施工中的关键环节，随着城市化建设进程的逐步推进，地铁工程建设规模持续扩大，深基坑施工面临着各种复杂地质条件带来的挑战。复杂地质环境易引发基底隆起、支护失稳、坍塌等多种风险，严重威胁着工程进度与施工安全。本文立足于复杂地质条件类型，围绕复杂地质条件下地铁深基坑风险分析与控制对策展开探讨。首先系统梳理了不同类型复杂地质条件及特点，分析其对深基坑工程的具体影响。通过地质勘察、数值模拟、历史案例类比等方法完成风险识别，明确地质灾害、结构安全、施工管理三大类核心风险的特征及耦合效应。采用定性定量相结合的综合评估方法，确定支护结构安全系数、变形控制标准等关键量化指标，并结合工程实例验证评估方法的实用性。最终从地质灾害防控、结构安全保障、施工管理强化及应急响应四个维度，提出针对性的风险控制技术措施与管理策略，旨在为复杂地质条件下地铁深基坑施工风险管控提供技术支持，助力提升工程施工安全水平。

【关键词】：复杂地质；地铁深基坑；风险识别；风险评估；控制对策

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.046

引言

地铁以其大运量、低污染及高速度等优势，在解决城市交通拥堵问题方面发挥了非常关键的作用，是缓解交通压力的核心基础设施。在地铁工程建设中，深基坑工程作为衔接地面与地下结构的关键节点，其施工质量与整个工程安全及地铁的后期稳定运营息息相关。随着地铁线路不断向地质条件复杂区域延伸，使深基坑支护设计、地下水控制、施工组织等环节面临着一定的挑战，可能导致风险事故发生。由此可见，深入分析复杂地质条件对地铁深基坑工程的影响，精准识别不同类型的施工风险，建立科学合理的风险评估体系，并做好风险控制工作，是确保地铁工程顺利推进的重要举措。

1 复杂地质条件分类与工程影响

1.1 地质条件分类与特征

复杂地质条件即受物质组成、地层成因及地质构造差异等方面因素影响，导致工程性质复杂、施工难度大的地质环境。根据地铁工程实际建设情况，可将复杂地质主要分为以下四类：（1）软土地层以黏粒、粉粒为主要成分，具有高压缩性和低强度特征，受外力作用时易产生较大沉降，进而引发基底隆起和支护结构变形。（2）岩溶地层因地下水长期溶蚀形成大量溶洞与溶蚀裂隙，导致地层完整性差，局部应力集中现象明显，大幅增加支护结构失稳风险。（3）膨胀土地层含有大量亲水性矿物，遇水膨胀、失水收缩的特性显著，这种反复的胀缩变形会破坏基坑边坡稳定性，导致边坡滑移和支护结构开裂。（4）复合地层则是多种地质条件的共存形态，典型如软土与岩层交界区域，不同地层的工程性质差异极大，使得支护设计、开挖工艺需兼顾多种需求，施工难度呈指数级增长。

1.2 地质条件对深基坑工程的影响

复杂地质环境对于深基坑工程支护结构安全性能、水位控

制以及施工进度等方面均具有一定的影响性，多维度影响深基坑工程项目顺利开展。支护结构安全性上，不同地质土层对于支护结构受力需求存在较大差异，弱质土层承重能力较低并且易出现较大的沉降形变，应采取两道支撑或者加密锚杆来增加支护体系强度；岩溶区域需采取灌浆措施处理溶洞，并填充土体中的空隙确保围护体系稳定受力。水文条件也是影响复杂环境深基坑开挖的重要因素，在膨胀性土中，水文情况的变化会引起很大的影响，因此必须要做好降水工作，防止土体由于干湿交替作用而产生膨胀收缩现象，进而破坏支护结构。施工效率与成本方面，针对复杂地质地层须进行针对性选用机械设备与技术方法，相比常规地质地层，其施工工序更加繁杂，工期延长更为明显，同时还会产生地质勘探以及预防措施等附加支出，增加整体工程造价。

如表1所示，清晰呈现了不同复杂地质条件对应的具体风险：

表1 典型地质问题与风险关联关系

地质问题	风险类型
软土层承载力不足	支护结构失稳、基底隆起
岩溶溶洞发育	支护结构应力集中、坍塌
膨胀土干湿循环	边坡滑移、支护开裂
地下水位波动	管涌、流砂

2 复杂地质条件下深基坑施工风险识别

2.1 风险识别方法

在复杂地质条件下进行深基坑施工风险识别工作，基于多种技术方法能够确保风险识别结果的准确性和完整性。地质勘察技术作为风险识别的基础，借助三维地质雷达可探测地层结

构是否存在裂隙、溶洞等隐蔽地质缺陷；钻孔取芯能够直接获得地层样本，确定土体物理力学指标；原位测试中，标准贯入实验可以迅速判定地基承载力及密实程度，为风险预测提供原始数据支持。数值模拟分析作为风险评估的重要定量分析工具，在实际应用中通过构建土体-围护结构-地下水相互作用模型来对各施工工况下的土体沉降、围护结构应力进行仿真分析，预测可能发生的风险。历史案例类比法则通过梳理国内外类似复杂地质深基坑工程的事案例，总结风险发生规律，为当前工程风险识别提供参考。

2.2 核心风险分类与特征

按照复杂地层影响特征，将深基坑施工风险划分为地质灾害风险、结构安全风险及施工管理风险三类：地质灾害风险是由地层自身特性引起的，软土流变是软土地层的典型风险，主要表现为基底隆起量超限，严重时会引起地下结构上浮；岩溶突水是岩溶地层的主要风险，当溶洞与地下水连通时，就有可能出现突水（涌水）现象从而导致整个基坑失去稳定平衡。结构安全性风险主要包括对支护结构的安全性和周边环境的影响，其中，支护结构不稳定源于锚杆抗拔不够、地下连续墙接头处漏水等等。周边环境风险则体现为施工引发的建筑物沉降超标、地下管线断裂等问题。施工管理风险是由于人为管控疏漏，例如降水控制不当，导致大量降水引起周围土体塌方，或者在进行施工的过程中，开挖和支护不及时造成塌方。

2.3 风险耦合效应分析

复杂地质条件下的施工风险呈多风险耦合叠加特点，导致事故危害程度加剧。成都地铁8号线龙潭寺站暗埋段基坑施工中，遭遇软土与膨胀土复合地层，两种地层的不良特性形成耦合效应。软土的高压缩性导致支护结构承受较大水平推力，膨胀土的胀缩特性则产生垂直方向的胀缩力，两种力共同作用使支护结构受力状态极度复杂。面对这类耦合风险，可采取“桩锚+钢支撑+降水井”组合支护方案，在多结构协同作用下使垂直胀缩力与水平推力处于平衡状态，避免支护失稳风险的产生。该案例表明，风险耦合效应需结合地层特性与施工环节综合研判，才能制定针对性防控措施。

3 风险评估与量化分析

3.1 风险评估方法

采用定性定量相结合的方法评估复杂地质条件下的深基坑施工风险，精准判定风险等级。定性评估常用于初步筛查，风险专家打分法通过组织地质、结构、施工领域专家，结合工程实际对风险发生可能性与危害程度打分；故障树分析则以潜在事故为顶事件，反向梳理风险诱因，明确各风险因子的逻辑关系。定量评估方法可实现风险的量化表征，蒙特卡洛模拟通过随机抽样模拟风险因子变化，预测风险发生概率；概率矩阵法则通过构建风险概率与危害程度矩阵，量化风险等级。综合

评估方法融合定性与定量优势，结合层次分析法与模糊综合评价，先通过层次分析法确定各风险因子权重，再利用模糊综合评价判定风险等级，最终形成高、中、低三级风险划分结果。

3.2 关键风险量化指标

风险评估的核心是确定关键风险量化指标，根据复杂地质深基坑施工特点，从支护结构安全、地下水控制及变形控制等维度设定指标。支护结构安全系数明确了支护体系的承载要求，接缝处应设置可靠的止水措施，满足严格的抗渗要求，确保支护结构兼具承载与抗渗能力。变形控制标准针对基坑本体及周边环境，地面沉降量需控制在15mm以内，支护结构水平位移不得超过基坑深度的0.2%，避免变形过大破坏周边建筑物与管线。地下水控制指标聚焦水位稳定性，降水后地下水位需低于基坑底面1.0m，且24小时内水位波动幅度不超过0.5m，防止水位变化引发管涌、流砂等风险。

3.3 评估案例应用

以成都地铁8号线龙潭寺站深基坑工程为例，应用上述评估方法开展风险量化分析。该工程位于软土与膨胀土复合地层，通过数值模拟构建耦合模型，预测基坑开挖后地面沉降最大值达18mm，超出15mm的控制标准，判定为中度风险。针对这一风险，需优化支护参数提升支护刚度，将第三道钢支撑刚度提升至2000kN/m。优化后再次通过数值模拟验证，地面沉降预测值降至12mm，满足控制标准，风险等级降至低度。这一应用过程表明，通过风险量化评估可精准定位风险点，为支护参数优化提供科学依据，有效提升风险管控的针对性与有效性。

4 风险控制对策与技术措施

4.1 地质灾害防控技术

以不同复杂地质地层特点为依据，选用针对性的地质灾害防控技术。对于软土地层，可使用“SMW工法桩+钢支撑”支护体系，SMW工法桩具备止水与支护的双重功能，钢支撑能够快速提供横向支撑力，同时通过基底注浆加固提升地层承载力，注浆水泥掺量控制在15%。岩溶地层需重点防控突水与坍塌风险，提前采用超前注浆技术加固溶洞，注浆压力控制在0.5至1.0MPa，水泥浆水灰比采用0.8:1，确保注浆体填充密实。膨胀土地层施工需控制地层胀缩变形，采用分层、分段、及时封闭的开挖方式，每层开挖深度不超过3m，开挖完成后及时封闭暴露面，喷射混凝土厚度不低于100mm，减少地层与外界水分交换。复合地层则需结合不同地层特性组合防控技术，兼顾各地层的风险防控需求。

4.2 结构安全保障措施

为确保结构安全，需加强支护结构优化与监测预警。其中，支护结构优化应根据地质条件特点科学调控设计参数，双排桩支护体系中，将桩间距缩小至1.5m，同时增加腰梁刚度，提升

支护体系的整体承载能力。监测预警系统采用自动化监测技术，在基坑周边及支护结构上布设测斜仪、水位计、应力计等监测设备，实时采集支护结构位移、地下水位、结构应力等数据。监测数据通过无线传输至云端平台，系统自动对比预设阈值，设定黄色、橙色、红色三级预警机制。黄色预警提示加强监测频率，橙色预警启动局部防控措施，红色预警则立即停止施工并启动应急响应，确保结构安全隐患及时发现、快速处置。

4.3 施工管理强化策略

施工管理是落实风险防控措施的关键环节，管理工作的开展应将降水控制与工序管理作为重要内容。降水控制采用“管井降水+明沟排水”组合方案，管井降水负责深层地下水控制，降水井间距不超过15m，明沟排水则处理基坑表面积水，形成立体排水体系。为保障降水连续性，配备备用电源，防止突发停电导致降水中断。工序管理严格执行“分层开挖、先撑后挖”的核心原则，明确各开挖层的施工流程与时间要求，每层开挖完成后，需在24小时内完成支撑安装并施加预紧力。施工过程中建立质量追溯体系，对支护施工、注浆加固等关键工序实施全程旁站监督，确保施工质量符合设计要求。

4.4 应急响应机制

面对突发风险，需制定完善的应急响应制度，通过构建应急预案制定、应急物资储备、演练培训三方面的管理体系，有

效应对突发风险。应急预案针对渗漏、坍塌、管线破坏等常见突发风险，制定专项处置流程，明确各部门职责、应急响应流程及处置措施。应急物资储备聚焦快速处置需求，配备双快水泥、聚氨酯注浆料、钢支撑备用件等抢险物资，同时配置抽水设备、应急照明、通讯设备等保障物资，确保突发风险发生时物资供应及时。演练与培训定期开展，每季度组织一次应急演练，重点培训支护结构加固、地下水封堵、人员疏散等关键科目。通过演练检验应急预案的可行性，提升施工人员的应急处置能力。

5 结语

复杂地质条件下地铁深基坑施工面临着众多风险，且风险具有多源并发、交织叠加的特点，做好风险防控工作保障地铁工程安全推进的核心任务。本文通过系统梳理复杂地质条件的分类与特征，明确了各类地质对深基坑工程的具体影响，采用多种技术方法完成风险识别，构建了定性与定量相结合的风险评估体系，提出了涵盖地质灾害防控、结构安全保障、施工管理强化及应急响应的全流程控制对策。研究成果表明，通过精准识别风险、科学评估风险等级、实施差异化防控措施，可有效降低复杂地质条件下深基坑施工风险。后续工程中，可结合智能化监测技术的应用，进一步提升风险防控的精准性与时效性，为地铁建设的安全推进提供更有力的技术支撑。

参考文献：

- [1] 孟文豪.复杂地质条件下地铁深基坑风险分析与控制对策[J].四川建筑,2024,44(03):94-97.
- [2] 蒋琴琴.复杂条件下地铁风井基坑安全施工及风险管控研究[D].武汉大学,2024.
- [3] 丁峰.地铁深基坑施工安全风险识别与系统分析研究[D].广东工业大学,2024.
- [4] 刘孟阳.地铁车站深基坑开挖变形预测及主动控制研究[D].华中科技大学,2024.
- [5] 张锐.地铁深基坑开挖风险分析及控制对策思考[J].大众标准化,2024,(04):49-51.