

复杂地质条件下深基坑施工安全风险及动态管控方案

马金龙

青龙满族自治县国控建设发展集团有限公司，河北 秦皇岛 066500

[摘要]本次研究对复杂地质条件深基坑施工安全风险进行了系统的分析,目的是为深基坑施工过程中动态管控提供一种科学可行的方案。通过多类型地层组合,地下水条件和施工工序相互交叉作用下风险特征识别和演化机理分析,确定了围护结构破坏,坑底管涌和基坑变形的重点风险点。在风险分级的基础上,建立动态监测和实时预警体系,并结合施工参数调整,专业协同和应急预案建设等措施,对风险进行全程可控管理。研究表明:管控模式可显著提升施工安全性、减少事故发生几率、强化应急响应效率。

[关键词]复杂地质; 深基坑; 施工安全; 风险动态管控; 应急预案

DOI: 10.33142/aem.v7i11.18405 中图分类号: TU431 文献标识码: A

Safety Risks and Dynamic Control Schemes for Deep Foundation Pit Construction under Complex Geological Conditions

MA Jinlong

Qinglong Manchu Autonomous County State-owned Construction and Development Group Co., Ltd., Qinhuangdao, Hebei, 066500, China

Abstract: This study systematically analyzed the safety risks of deep excavation construction under complex geological conditions, with the aim of providing a scientifically feasible solution for dynamic control during deep excavation construction. Through the identification and evolution mechanism analysis of risk characteristics under the interaction of multiple types of stratigraphic combinations, groundwater conditions, and construction processes, the key risk points of enclosure structure failure, pit bottom piping, and foundation pit deformation have been determined. On the basis of risk classification, establish a dynamic monitoring and real-time warning system, and combine measures such as adjusting construction parameters, professional collaboration, and emergency plan construction to manage risks in a fully controllable manner throughout the process. Research has shown that the control mode can significantly improve construction safety, reduce the probability of accidents, and strengthen emergency response efficiency.

Keywords: complex geology; deep foundation pit; construction safety; risk dynamic control; emergency response plan

深基坑工程被广泛应用于城市地下空间的开发,然而复杂的地质条件下的建设却面临着许多安全挑战。多类地层的组合,地下水的不均匀分布以及周围环境的敏感性使得基坑的稳定性受多重因素的影响,其风险表现出突发性,复杂性以及动态演化的特点。传统静态管理模式已很难适应复杂工况安全需要,迫切需要构建以实时监测与动态管控为核心的安全生产管理系统。通过辨识风险特征,分析演化机理和梳理关键控制点,为施工阶段精准控制措施的实施奠定了基础。

1 复杂地质条件深基坑的施工风险特征分析

1.1 多类型地层组合诱发变形失稳危险

复杂地质条件深基坑常跨越填土,软土、砂层以及风化岩等多类地层,各地层的强度,变形模量和渗透性能均有显著差别,容易造成基坑受力和变形响应不均匀。软弱夹层开挖卸荷条件下容易发生过大变形,继而诱导围护结构内力重分布而增大局部失稳的危险性。在砂性土层和软黏土层相间分布的情况下,地层之间的变形协调性差,会诱发水平位移的突增或者沉降的集中^[1]。另外多类型地层组合使得基坑变形发展存在显着的阶段性及突发性,传统

的经验参数很难准确地反映实际工况,如果没有有针对性地进行设计及动态控制措施,容易形成施工期累积变形并最终危及基坑的整体稳定性和周围环境的安全。

1.2 复杂地下水条件引起渗流和突涌风险

复杂地质条件的深基坑往往受到多层含水层,承压水和不均匀隔水层的综合影响,地下水的赋存状态和水力联系表现出明显的复杂性。基坑开挖时,水头差迅速形成容易诱导渗流集中,造成坑底土体有效应力减小,抗剪强度减弱,继而出现流砂,管涌乃至突涌破坏^[2]。特别是砂性土和粉质土相互作用分布地区,渗透系数的不同放大了水流通道中的不确定因素,使得风险突发性强、隐蔽性高。不恰当的降水措施或者止水结构完整性的缺失容易诱发地下水动力条件的不平衡,导致围护结构的变形增大和坑底稳定性的降低。

1.3 周围环境敏感性所产生的额外安全风险

在复杂的地质条件下,深基坑施工通常是在建构筑物密布,地下管线错综复杂以及交通荷载作用频繁等情况下进行,对周围环境的敏感性显著放大了施工过程中的安全风险^[3]。基坑开挖导致的地层应力重分布与变形发展容易

对临近既有建筑物基础造成负面影响并诱发不均匀沉降与结构损伤。同时地下管线对于复杂地质条件的位移及应力变化异常敏感，细微的变形就会造成渗漏，破裂等次生风险的发生，从而进一步影响基坑的稳定性。施工振动，降水与支护结构变形的耦合作用使得环境风险呈现出突发性与隐蔽性的特点。

2 对深基坑施工中存在的重大安全风险进行分析

2.1 围护结构的受力异常及破坏风险

复杂地质条件深基坑围护结构受力状态容易受到多重不确定因素的影响而成为施工安全中的重点风险来源。地层性质的明显差异，软硬土层的交替分布及结构嵌固条件的不完善等都会引起围护结构的内力异常分布，并诱发局部应力集中和变形不平衡^[4]。地下水位的涨落和渗流压力的改变进一步增加了结构受力的复杂程度，使围护体系的整体稳定性下降。同时在施工时开挖顺序不尽合理，支撑体系设置滞后或者刚度不足等问题，容易诱发围护结构的位移超限乃至失稳破坏。如果监测和反馈机制反应不够及时，则结构安全隐患会表现出累积放大的效果，显着威胁基坑的整体稳定性和周围环境的安全。

2.2 坑底隆起和管涌的危害

复杂地质条件深基坑开挖时坑底隆起与管涌破坏的风险表现为突发性与隐蔽性。软弱土层的不均匀分布和承压含水层埋深浅的情况下，随着开挖深度的增大，坑底有效应力明显减小，容易诱发土体抗剪强度的不足，从而造成坑底的整体或者局部抬升^[5]。同时地下水水头差的增加使得渗流场重新构建，细颗粒土体受渗透作用产生损失，继而形成管涌通道加剧了基坑失稳的风险。在施工中如果降水措施不尽合理或者围护结构止水性能不完善，都会使不利的水土耦合作用进一步被放大，严重威胁基坑的整体稳定和周边环境安全。

2.3 基坑变形给周围建构筑物带来的危害

复杂地质中深基坑的开挖容易诱发地层应力的重分布及土体结构的破坏，从而造成基坑周围土体水平位移及不均匀沉降。这种变形经地基土转移到相邻的建构筑物上，会导致基础附加应力的增加，结构的倾斜和裂缝的扩展等，严重者会危及基础的正常使用和结构的安全。软弱土层，填土层以及高压地下水环境将基坑的变形效应进一步放大，使得风险呈现隐蔽性与累积性的特点。同时围护结构的刚度不足，支撑体系的设置不合理以及施工节奏的失控等因素都会加剧变形的发展。

3 复杂地质条件的风险演化机理及关键控制点

3.1 地层力学参数的不确定性在风险演化中的作用

复杂地质中深基坑施工过程中涉及到多类地层的叠置分布，其地层力学参数无论在时空尺度上都呈现出明显的不确定性。由于成因差异，风化程度以及扰动等因素，土体的强度，变形模量以及渗透系数这些关键参数在常规

勘察中很难完全反映它们的实际情况，从而造成设计参数偏离实际工况。开挖时局部软弱夹层或者非均匀地层容易诱发应力重分布并加快围护结构的变形和土体失稳的演化。与此同时施工扰动将进一步改变其原有的力学特性，使得风险呈阶段性的放大态势。

3.2 地下水动力变化影响基坑稳定的机理

复杂地质中地下水动力的变化是深基坑稳定的关键之一。基坑开挖打破了原地下水的动力平衡，使水位迅速降低或者局部水力梯度显著增加，进而改变了土体有效应力的分布和结构强度的特征。高渗透性砂层或者软弱夹层条件下，地下水渗流容易诱发管涌，流砂和坑底隆起的破坏形态，显著弱化基坑的整体稳定。同时围护结构内、外水头差的不断增大将引起结构受力的重新分布，加大变形和破坏的危险。伴随着施工阶段的进行，降水范围和强度的动态变化又进一步放大了水土耦合作用的影响，从而使得基坑安全状态表现出显着的时变特征。

3.3 施工阶段转换导致风险放大效应

复杂地质条件下深基坑施工一般表现出显着的阶段性，各施工阶段的相互转化容易诱发风险叠加和放大效应。开挖深度的加大，支护体系受力的重分布以及地下水条件的改变等因素使得基坑的稳定状态在动态调整的过程。如果在阶段转换过程中对施工节奏把控不当，则围护结构内力的突变和土体应力的释放是不同的，容易诱发过大的变形乃至局部失稳。同时支撑拆除，工序衔接不紧以及临时荷载叠加等因素，都将弱化原安全储备并放大可能产生的不利因素影响。

4 深基坑施工安全动态控制技术系统

4.1 以风险分级为依据提出动态管控思路

复杂地质条件深基坑施工过程中面临着多重交叉风险问题，以风险分级为基础进行动态管控可以使安全管理精准化和科学化。通过系统评价地层类型，地下水条件，周边环境敏感性以及施工工序的叠加效应等因素，可以根据严重程度以及发生概率划分风险等级，确定重点控制区域和关键环节。高风险区采用严格监控和施工限制，中低风险区可以进行常规管理和动态调控以优化配置资源和管理精力。分级管控在考虑施工阶段特点的前提下，动态调整施工参数、支护方案、荷载布置等参数，处理好风险随着时间与环境不断演变的特点，由此形成了以防为主，预防与治理相结合的深基坑安全管理模式。

4.2 监测信息的实时反馈和预警机制

在复杂地质条件深基坑施工安全控制中，监测信息实时反馈及预警机制处于核心地位。通过布置高精度的位移、应力、地下水位和倾斜监测点实现了在整个施工过程中连续的数据采集，能够定量分析基坑结构响应。通过数字化平台对实时数据进行处理，可以迅速识别出异常趋势及潜在危险并形成直观的预警信息，从而为施工参数的调整提

供了科学依据。同时根据阈值和风险等级分级预警机制可以将潜在风险划分为不同的响应等级，从而达到施工单位、监理和设计单位之间协同联动的目的。

4.3 施工参数的动态调整及过程控制措施

在深基坑施工安全控制过程中，施工参数的动态调整至关重要。根据实时监测资料，对施工期支护结构受力，土体变形和地下水位变化情况要不断评价，从而对开挖深度，支撑布置和排水方案等及时校正。对地层软硬不均，地下水富集或潜在沉降敏感地区，宜采取分区分阶段开挖，优化荷载分配及支护加固，使施工参数高度符合实际地质条件。同时通过数值模拟和现场数据比对可以预测可能的变形趋势，从而为施工调整提供科学依据。全过程动态控制既能降低围护结构失稳的风险，又能有效地减小基坑沉降对周围建筑物的影响，以达到在复杂地质情况下安全经济地进行施工的目的。

5 复杂地质条件深基坑安全管理的优化战略

5.1 风险前移设计施工协同管控

在复杂地质情况下深基坑施工过程中的安全风险表现出多源性和动态性等特点，常规的事后管控模式很难应对可能发生的风险快速演变。通过风险前移设计施工协同管控，可以在工程前期系统分析地质条件，地下水特性以及周围环境敏感性，并将关键风险因素融入到设计优化以及施工方案决策中。在施工阶段与设计参数进行实时对照，动态调整支护结构，降水方案和施工工序，有效减小基坑变形，围护失稳和渗流突涌风险。协同控制机制注重设计单位，施工单位和监测团队之间信息共享和联动响应，构成了风险识别—预警—处置闭环管理体系，本发明对复杂地质情况下深基坑施工安全提供了科学可定量的保障，使安全控制从被动应对变为主动管理。

5.2 将信息化手段运用到动态管控当中

信息化手段对于深基坑施工的动态控制起到了至关重要的作用。通过部署高精度传感器以及物联网监测系统可以实现围护结构位移，基坑沉降，地下水位以及土体应力等参数的实时获取和分析。以大数据和智能算法为核心的风险评估平台能够预测施工中可能存在的安全隐患，并快速地传递预警信息。施工参数可以根据监测结果动态调整以优化支护结构的设计和施工顺序以减小风险演化速度。另外，信息化手段还支撑了施工过程可视化管理和决策记录等功能，为多专业协同发展提供了可靠的数据支撑，有利于建立基坑安全全过程，全方位动态管控体系和提升

复杂地质情况下的施工安全性和可控性。

5.3 应急预案和快速处置能力的建设

应急预案和快速处置能力的构建对于深基坑施工安全管理至关重要，特别是对复杂地质条件有着至关重要的作用。对可能出现的围护结构破坏，坑底管涌，地下水突涌等突发情况，要建立分级响应机制，规范处置流程，使预案科学化，系统化，可操作化。预案设计需要综合考虑地质特征、施工工序、环境敏感性等因素，确定各种突发事件监测指标，报警阈值以及处置措施。与此同时，我们应该加强对应急资源的分配，这包括紧急救援设备、施工所需材料以及专业的技术团队，以确保在潜在风险出现时，能够迅速地进行调度和高效地处理。

6 结论

深基坑在复杂的地质条件下所面临的施工安全风险表现出多因素，多阶段耦合的特点，围护结构的破坏，地下水的突涌和坑底变形为主要的风险来源。通过对风险的识别和演变机制的深入分析，我们可以确定关键的控制点，从而为施工的安全管理提供坚实的科学支撑。动态监测及实时预警机制可实现对施工参数进行适时调整并有效遏制风险积累及突发事件。信息化手段，多专业协同以及应急预案建设等，进一步提高建设过程中响应能力和抗风险水平。整体上看，以系统化风险管理及动态管控为主的施工模式不仅能够显著提高复杂地质条件深基坑的施工安全，而且还能为同类项目提供可以推广的管理经验及技术借鉴，将工程建设及安全管理有效结合起来。

[参考文献]

- [1] 谭诗兵. 复杂地质深基坑施工安全稳定性分析[J]. 陶瓷, 2025(12):162-164.
 - [2] 雷建维. 高层建筑深基坑施工技术难点与解决方案研究[J]. 陶瓷, 2025(9):172-174.
 - [3] 张华男. 复杂地质深基坑施工安全稳定性分析[J]. 建筑, 2025(7):106-108.
 - [4] 李四红. 复杂地质条件下高层住宅地下室深基坑支护施工技术[J]. 建材技术与应用, 2025(2):101-104.
 - [5] 郭中华. 复杂地质条件深基坑支护施工安全风险评估方法[J]. 四川水泥, 2024(7):171-173.
- 作者简介：马金龙（1975.12—），男，毕业院校：中央广播大学，学历：本科，所学专业：法学，当前就职单位：青龙满族自治县国控建设发展集团有限公司，职务：集团副总经理。