

复杂地质条件下基坑支护方案优化研究

葛晓斐 高建军 王中宝

北京航天地基工程有限责任公司, 北京 102600

[摘要]复杂地质条件下深基坑工程面临软土、富水砂层、复合地层等多重技术挑战, 支护方案的合理优化对工程安全与环境保护至关重要。文中系统分析了基坑变形沉降、支护结构稳定性、地下水渗流以及施工安全与环境等突出问题, 从支护结构优化设计、降水止水方案优化、基坑变形控制措施及信息化监测与风险预警四个维度提出了优化策略。研究表明, 因地制宜选型支护结构、科学构建止水体系、遵循时空效应规律组织施工并建立智能化监测预警系统, 可显著提升复杂地质基坑工程的安全性及经济性, 为类似工程的设计与施工提供有益参考。

[关键词]复杂地质; 基坑支护; 优化设计; 方案优化

DOI: 10.33142/ucp.v3i2.19987

中图分类号: TU476.9

文献标识码: A

Research on Optimization of Foundation Pit Support Scheme under Complex Geological Conditions

GE Xiaofei, GAO Jianjun, WANG Zhongbao

Beijing Aerospace Foundation Engineering Co., Ltd., Beijing, 102600, China

Abstract: Under complex geological conditions, deep foundation pit engineering faces multiple technical challenges such as soft soil, water rich sand layers, and composite strata. Reasonable optimization of support schemes is crucial for engineering safety and environmental protection. The article systematically analyzes prominent issues such as deformation and settlement of foundation pits, stability of support structures, groundwater seepage, and construction safety and environment. Optimization strategies are proposed from four dimensions: optimization design of support structures, optimization of dewatering and waterproofing schemes, control measures for foundation pit deformation, and information monitoring and risk warning. Research has shown that selecting support structures according to local conditions, scientifically constructing waterproofing systems, organizing construction according to the laws of temporal and spatial effects, and establishing intelligent monitoring and early warning systems can significantly improve the safety and economy of complex geological foundation pit engineering, providing useful references for the design and construction of similar projects.

Keywords: complex geology; excavation support; optimization design; solution optimization

引言

随着城市化进程不断加快以及地下空间开发规模不断扩大, 深基坑工程越来越穿越到复杂的地质条件中去, 即穿越软土、富水砂层、上软下硬复合地层等, 支护设计和施工也面临着前所未有的技术难题。深基坑工程在复杂的地质条件下面临着地质结构复杂、水文地质条件严格、施工环境恶劣等一系列问题, 支护技术的好坏直接影响到工程的整体安全性以及经济性。传统的单支护形式很难同时满足安全、经济和环保等各方面的要求, 在进行地质条件和工程需求的系统分析之后, 需要对具体的方案进行有针对性的优化。本文在系统分析复杂地质条件下的基坑支

护主要问题的基础上, 从结构选型、止水降水、变形控制和监测预警四个方面提出优化措施, 希望给类似工程的设计和施工提供一些参考。

1 基坑支护的重要性

基坑支护是地下工程施工中保证坑壁稳定、控制地层变形、隔绝地下水的重要技术措施, 基坑支护设计及施工质量直接影响到基坑工程安全和成败。在复杂的地质条件下, 基坑支护显得更加重要, 软土地层自稳能力差、蠕变明显, 容易造成坑壁坍塌、坑底隆起, 富水砂层渗透破坏风险大, 容易引起流砂、管涌等灾害, 城市基坑周边常常有密集的既有建筑和地下管线, 任何过大变形都会给周边

环境带来不可逆的损害。桩基及基坑支护在土木工程建设中占有非常重要的地位,设计与施工时必须考虑基础稳定、施工安全、周边环境、工程质量、经济效益等各方面因素。科学合理的支护方案可以保证施工的安全,也可以有效地控制工程的成本和工期,是统筹基坑工程质量、进度和安全的重要环节。另外,科学合理地设计并严格控制施工质量,可使工程质量得以提高,工程造价得以降低,从而达到经济效益和社会效益的双增。

2 复杂地质条件下基坑支护存在的问题分析

2.1 基坑变形与沉降问题

复杂地质条件下基坑开挖引起的变形和沉降,是支护工程中最常见、最棘手的问题。软土地层中由于土体压缩性大、蠕变明显,卸荷后坑底回弹、坑周土体下沉现象比较明显。通过直剪、固结试验得到残积土在干湿循环、施工振动作用下强度、变形的规律后发现,黏聚力 c 随着干湿循环次数 n 、振动时间 t 的增加呈非线性衰减^[1]。富水粉土粉砂地层中基坑降水开挖引起周边渗流场、位移场的变化较大,坑外地下水位、基坑周边地表沉降、围护结构侧向位移三者之间存在密切的耦合关系。在复合地层中,变形特征更为复杂且难以准确预判。如果对变形规律认识不够或者控制措施不到位,过大变形就会造成邻近建筑物开裂、管线损坏、基坑整体失稳等严重后果。

2.2 支护结构稳定性问题

支护结构稳定性是基坑安全的保证,复杂的地质条件中影响因素很多并且互相耦合。软土地区土体抗剪强度低,容易产生踢脚破坏或者坑底隆起,在砂层地区渗透破坏的风险大,容易出现流砂、管涌等现象,降低支护结构的基底承载力,在土岩二元地层中,软硬界面使得支护结构的受力模式发生突变,稳定性分析的难度明显增大。依托国家重点研发计划项目,武汉岩土所边坡工程组研制出一种人字形排桩新型支护结构,由直立桩、斜桩、冠梁、腰梁和止水帷幕组成,直立桩挡土,斜桩限制基坑水平位移并减小直立桩最大弯矩,冠梁提高支护结构的刚度和整体性,腰梁把直立桩的荷载传给倾斜桩,该结构结构简单、受力合理、稳定性好,可以解决受环境影响不能设置外锚、宽大基坑内撑成本高且容易整体失稳的深基坑支护技术难题。

2.3 地下水渗流问题

地下水属于复杂地质基坑工程所面对的持久的技术隐患。在富水砂层、高水位软土区和临江临海地区,如果止水措施不到位,渗流会造成坑内积水、边坡渗漏甚至流砂、管涌等渗透破坏,严重时会导致基坑坍塌。对于复杂地质条件下深基坑支护施工中成孔质量控制、地下水处理

和结构稳定性等各方面的问題,可以采用井管降水与双排搅拌桩止水帷幕相结合的方式,提高支护结构的稳定性。在富水粉细砂地层中,创建起“侧隔+底堵+水头调节”的多维协同空间立体封闭止水体系,可以很好地控制住高水压、高渗透性水体,减少基坑涌砂、涌水的风险。过量的降水会造成坑外土体固结沉降,给周围建筑物带来不良影响。使用时需要配套智能水位监测装置和降水井回灌系统,可以有效地调节坑内外水位,防止蓄水外涨,准确控制周边房屋沉降在 5mm 之内,解决砂质基坑下传统降水的隐患。所以科学地平衡堵和疏的关系就成了地下水处理的主要问题。

2.4 施工安全与环境影响问题

复杂地质基坑施工一方面存在着地质不确定造成的安全风险,另一方面又受到了越来越严格的环境保护要求。地层突变、局部软弱夹层、不明地下障碍物等不可预知的地质条件会突然引发支护结构失稳或者坑壁塌方,给施工安全带来直接的危险。为了克服复杂地质条件下深基坑支护技术的安全性和周围环境保护问题,工程实践采用钢筋混凝土钻孔灌注桩加水平内支撑的复合支护方式,配合高压旋喷止水帷幕和排水系统,改进基坑支护设计,现场监测数据证明此方案可以很好地控制基坑变形,减小环境扰动,保证施工安全和周边环境稳定^[2]。从环境保护的角度来说,基坑开挖所造成的噪声、振动、泥浆排放和渣土运输都会对周围环境产生影响,在市中心或者居民密集区施工时,这些环境问题常常是制约工程进度的主要因素。

3 复杂地质条件下基坑支护方案优化

3.1 支护结构优化设计

支护结构优化设计的核心就是根据具体的地质条件和工程要求,合理选择支护结构的形式,并对支护结构的参数进行精细化的设计。不同的支护结构各有适用条件和优缺点,排桩支护适应性强、结构刚度大,地下连续墙适用于基坑侧壁安全等级较高的工程,土钉墙在黏性土中经济性好,SMW 工法具有支护和止水双重作用。地质情况复杂的工程、环境比较敏感的工程,优化设计、智能监测属于提高施工安全性的手段。在沿海软土地区,分区段支护方案效果较好,根据不同的深度分别使用放坡开挖、SMW 工法桩和“钻孔灌注桩+高压旋喷桩+三轴搅拌桩”组合结构,在施工过程中设置了多道“混凝土+钢管”内支撑,经过数值模拟验证,最大水平位移只有 10.81mm,远低于规范的预警值。在空间效应明显的地区,根据空间效应下的深基坑支护结构出现不均匀变形的特点,考虑阴角对变形的抑制作用,对桩长、桩径进行优化后取得了明

显的效果，高影响区桩径可以优化为 600mm，影响范围缩小到 0~6m；高影响区桩长可以优化为 17.0m，影响范围缩小到 0~8m。表 1 对常用的支护结构形式进行了比较。

3.2 降水与止水方案优化

降水和止水方案优化的关键就是形成有效的止水屏障，合理控制坑内水位，坚持“疏堵结合”。止水帷幕形式选择、深度确定和施工质量控制十分重要。深大基坑在软土、富水砂层和多层承压含水层地区施工时，需要将开挖面以下的地下水位控制到目标标高，同时考虑坑外水位波动对周边环境和结构的影响；降水方案实际上同时约束着安全目标和经济目标，安全侧关注坑底隆起、管涌、基底稳定、围护墙水平位移和邻近建（构）筑物沉降等，经济侧关注一次性建设费用。富水深厚砂层地区，单纯竖向帷幕不能完全隔断地下水，可以采用竖向和水平相结合的封闭式防渗体系。国外设计分包提出降水方案没有考虑不透水层空间不均匀分布，造成基坑中部降水深度不能满足现场施工水位要求；通过进一步分析单井流量、降水井排布、滤管埋深等因素对降水效果的影响，给出优化改进建议，在增大降水深度的同时减小了基坑两端与中部的水头差，有利于基坑开挖和节省成本^[3]。分层降水、动态控制相结合的方式可以防止过度降水造成的环境沉降，在帷幕外侧设置回灌井按需回灌来抑制坑外水位下降。

3.3 基坑变形控制措施

基坑变形控制要采取主动预防和被动纠偏相结合的方式。主动预防的主要方法就是按照时空效应规律组织施工，采用分区开挖、改善施工顺序、缩短基坑暴露时间等手段来控制变形的发展。邻近地铁等敏感环境的基坑，可以将大坑分成若干个小坑分别开挖，有效地减少了时空效应对本工程变形的影响；临铁区域用地下连续墙做围护桩，加装搅拌桩槽壁加固，双重隔水措施，有效防止地下水渗流和坑内降水对地铁轨道交通的影响。支撑体系的设计要合理设置支撑，并且及时施加预加轴力。装配式型钢

组合支撑技术可以依据监测数据实时调节支撑轴力，达到主动控制支护结构变形的目的，并且施工速度快、绿色环保可回收，在保证基坑变形有效控制的基础上，节约工期 80 天左右，节省混凝土 15000m³，降低施工成本 1000 万元，减少噪音、振动、粉尘污染。施工时根据现场监测数据及时调整开挖参数及支撑轴力，达到变形的实时控制。

3.4 信息化监测与风险预警

信息化监测、风险预警对于复杂地质基坑工程来说，是不能缺少的技术支持。由于地质条件千变万化，施工中出现的各种不确定因素很多，建立一个完整的监测体系，对围护结构的变形、支撑轴力、地下水位、周边建筑物沉降等主要参数进行实时监测，是发现隐患、及时处置的前提。深基坑自动化动态实时监测技术可以解决传统基坑监测模式数据采集慢的问题，也可以摆脱劳动强度大、成果提交慢的痛点；物联网还可以在上面对整个基坑的监测数据进行汇总和可视化共享，在多平台实时访问查询监测数据。风险预警要依照监测数据来确定分级预警阈值，监测值到达预警限值的时候立刻启动应急预案。深基坑自动监测平台由多源智能传感终端、云端智能分析中枢、三维可视化监控平台三部分组成，采用 5G 物联网传输方式，使用 GNSS、倾角计、土压计、微震传感器进行前端感知，用机器学习算法分析数据的相关性来预测滑坡、涌水等风险，根据阈值和速率两个指标来触发预警，预警触发后会自动将预警信息推送给责任人，实现项目、监理、施工三方共同应对^[4]。针对地下水控制，基坑降水数智化管理控制系统可以实时准确地监测、智能联动控制、风险主动预警，很好地克服了传统人工测量的滞后性和人为误差，提高了降水作业的响应速度和控制精度，实现了安全风险的早发现、早处理。随着物联网、大数据、人工智能技术的发展，以实时监测数据、数值模拟、经验判断相结合的方式建立起来的风险预警系统，已经成为保证复杂地质基坑工程安全的技术防线。

表 1 常用基坑支护结构形式对比

支护形式	适用地质条件	优势	局限	造价	止水能力
排桩+内支撑	各类地层，深大基坑	刚度大、变形控制好	支撑密集、影响土方开挖	中高	需配合止水帷幕
排桩+锚索	黏性土、硬塑土、岩层	作业面大、施工方便	不宜用于软土、松散砂层	中等	需配合止水帷幕
地下连续墙	各类地层，超深基坑	整体性好、兼作止水墙	造价高、设备要求高	高	自身可止水
土钉墙	黏性土、硬塑土	经济性好、施工快	不适用于软土、高水位	低	弱
SMW 工法	软土、砂层	速度快、兼作止水	型钢回收受限制	中等	好

4 结语

复杂的地质条件下基坑支护方案的优化是综合考虑结构选型、地下水控制、变形预防、监测预警等诸多因素的一项工作。本文从四个方面对优化策略进行了研究,结果表明不同的支护形式适用于不同的地质情况和环境敏感程度,在地质复杂、环境敏感的时候要根据实际情况综合选择合适的支护方式;采用科学合理的支护设计并加强施工质量控制,可以提高工程质量、降低工程造价,达到经济效益和社会效益的双赢目的。止水帷幕和降水系统科学的设计是控制地下水渗流的关键,要根据水文地质条件合理地采取“堵”和“疏”的措施。按照时空效应规律、合理设置支撑体系、及时调整施工参数,可以有效地控制基坑变形的发展。信息化监测、智能化预警系统创建起来之后,给基坑工程由被动控制向主动防范的转变赋予了技术支撑。未来基坑支护技术会越来越重视智能化和生态化的发展,依靠 BIM 技术、物联网监测、人工智能

预警这些先进的方法,把基坑工程由被动控制转变为主动管控,给城市地下空间安全高效开发赋予更为可靠的技术支撑。

[参考文献]

- [1]麻岩.复杂地质条件下深基坑支护施工技术优化[J].科技与创新,2026(9):126-128.
- [2]王楚鑫.复杂地质条件下深基坑支护施工优化与风险控制[J].建筑工人,2025,46(3):53-56.
- [3]宗长青,宋康南.复杂地质条件下深基坑支护设计与优化分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025(2):115-117.
- [4]游应峰.复杂地质条件下深基坑支护方案研究及稳定性分析[J].江西建材,2023(1):175-176.

作者简介:葛晓斐(1987—),女,山西阳泉人,工程师,中国地质大学(北京)岩土工程专业毕业,现就职于北京航天地基工程有限责任公司,从事基坑支护、地基处理设计、施工工作。