

复杂地质条件下基坑防护策略与监测技术研究

周术春

四川驰昌建设工程有限公司 四川 成都 611330

摘要: 复杂地质条件对基坑工程影响显著,包括软土地基、岩溶地层、砂层与卵石层及高地下水位区等,它们通过多重耦合作用影响基坑稳定性,引发侧向位移、不均匀沉降等问题。防护策略需遵循地质适配等原则,创新复合支护技术,并实施动态调控。智能监测技术涵盖多参数体系构建、多源数据融合与智能分析,以及预警与应急响应机制,可有效保障基坑施工安全,降低事故风险。

关键词: 杂地质; 基坑工程; 支护策略

1 复杂地质条件分类及工程影响分析

1.1 典型地质条件类型

1.1.1 软土地基

软土地基主要由淤泥、淤泥质土及高压缩性黏土构成,具有天然含水量高、孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低等特征。在沿海地区及河流三角洲区域广泛分布,其工程特性表现为显著的蠕变性和触变性。当基坑开挖深度超过3米时,软土层易产生侧向位移和竖向沉降,导致支护结构变形量超出设计容许值的200%-300%。典型案例显示,上海某深基坑工程因未充分考虑软土流变性,导致围护墙最大水平位移达152mm,引发周边道路开裂。

1.1.2 岩溶地层

岩溶发育区呈现溶洞、溶沟、石芽等复杂形态,其空间分布具有极强的非均质性。根据地质调查,我国西南地区岩溶洞隙率可达15%-25%,溶洞规模从数厘米至数十米不等。这种地质条件对基坑工程的影响主要体现在三个方面:一是突水突泥风险,广州某地铁站施工中曾发生每小时300m³的突涌事故;二是地基不均匀沉降,贵阳某高层建筑因岩溶处理不当导致倾斜率达0.7%;三是支护结构失效,重庆某基坑因溶洞顶板坍塌引发连续墙折断。

1.1.3 砂层与卵石层

砂层(包括粉砂、细砂、中粗砂)和卵石层具有渗透系数大(10⁻³-10⁻¹cm/s)、颗粒级配不连续等特点^[1]。北京地区卵石含量可达40%-60%,粒径普遍在20-100mm之间。这类地质条件下,基坑工程面临两大挑战:一是管涌流砂问题,南京某工程在砂层中采用普通井点降水时,单井涌水量达80m³/d;二是成槽困难,武汉某地下连续墙施工因卵石层导致成槽效率下降60%,并引发3次槽壁坍塌。

1.1.4 高地下水位区

高地下水位区通常指地下水位埋深小于基坑开挖深度的区域,其水文地质条件复杂多变。统计显示,长三角地区年水位变幅可达3-5米,且存在多层含水层交互现象。这种条件下,基坑工程需重点应对:一是承压水突涌,杭州某工程因未进行抗突涌验算,导致底板隆起1.2米;二是降水引起的地面沉降,天津某区域因集中降水造成周边建筑物沉降量达85mm;三是渗流破坏,深圳某工程因渗流力超过土体有效应力导致流土破坏。

1.2 地质条件对基坑工程的影响机制

复杂地质条件通过多重耦合作用影响基坑稳定性。从力学机制看,软土的蠕变特性会导致支护结构内力随时间增长15%-30%;岩溶地层的非均质性使应力传递路径发生突变,造成局部应力集中达3-5倍;砂层中的渗流可降低土体有效应力20%-40%,显著削弱抗剪强度。从变形特征分析,高地下水位区基坑的变形模式呈现明显的空间效应,长边方向最大位移可达短边的1.8-2.5倍。时间效应方面,软土基坑的变形发展具有三阶段特征:开挖后7天内完成50%-60%的最终变形,30天内达到80%-90%,剩余变形持续数月甚至数年。这种时间-空间耦合效应要求监测系统必须具备实时性和长期稳定性。环境影响层面,基坑降水引发的地面沉降影响范围可达开挖深度的3-5倍,对周边管线的影响距离甚至超过10倍开挖深度。

2 复杂地质条件下基坑防护策略优化

2.1 支护结构选型原则

支护结构选型需遵循“地质适配性、环境协调性、经济合理性”三原则。在软土地区,地下连续墙结合内支撑体系表现最优,其刚度可达钻孔灌注桩的3-5倍,能有效控制变形在0.1%-0.3%开挖深度内^[2]。岩溶地层宜采用桩锚复合支护,锚索长度应穿透溶洞进入稳定岩层不小于3米,预应力损失率控制在15%以内。砂层中建议采

用SMW工法桩,其止水帷幕渗透系数可控制在 10^{-7} cm/s以下,较传统排桩方案节约成本20%-30%。高地下水位区应优先选择隔水性能好的支护形式,如冻结法施工的地下连续墙,其抗渗等级可达P12以上。对于空间受限的城区基坑,可采用逆作法施工,将结构梁板作为水平支撑,减少临时支撑用量40%-60%。选型时还需考虑施工可行性,如卵石层中旋挖钻机成孔效率比冲击钻机提高3倍,但需配备专用捞砂斗防止卡钻。

2.2 复合支护技术创新

复合支护技术通过多种结构协同工作实现优势互补。上海中心大厦基坑采用“两墙合一”地下连续墙+环形支撑体系,将支护结构与永久结构结合,减少临时支护用量1.2万吨。广州某地铁车站创新应用“钢管混凝土桩+预应力锚索+微型桩”复合支护,在岩溶发育区成功控制变形在25mm以内。该技术通过微型桩($\Phi 200$ mm,间距1.5m)提高整体稳定性,钢管混凝土桩($\Phi 800$ mm,C60混凝土)提供主要抗弯能力,预应力锚索($T=800$ kN)限制侧向位移。新型材料的应用显著提升支护性能,玻璃纤维筋(GFRP)替代钢筋用于地下连续墙,解决传统钢筋与混凝土粘结力不足问题,抗拉强度提高至500MPa以上。纳米改性水泥浆液在砂层止水中的应用,使帷幕厚度减少30%而抗渗性能提升1个数量级。智能材料方面,形状记忆合金(SMA)锚索可实现预应力自动补偿,在温度变化时维持锚固力波动小于5%。

2.3 动态调控技术

动态调控技术通过实时监测数据反馈优化施工参数。北京大兴机场基坑建立BIM+GIS数字化平台,集成2000余个监测点数据,实现支护结构应力、变形、地下水位等参数的分钟级更新。基于机器学习的预测模型可提前48小时预警变形趋势,准确率达92%。施工参数动态调整方面,深圳平安金融中心基坑根据监测数据实时调整支撑轴力,使长边方向最大位移从85mm控制在50mm以内。降水系统的智能控制是关键环节,杭州某工程采用变频降水技术,根据地下水位实时变化调节水泵功率,较传统定频降水节能40%,同时将水位波动控制在 ± 0.2 m以内。渗流场逆设计方法通过反演分析优化降水井布局,使影响半径减少25%,周边建筑物沉降量控制在15mm以内。应急调控措施包括备用电源系统、快速堵漏材料储备等,确保在突发情况下2小时内恢复支护体系功能。

3 基坑施工全过程智能监测技术

3.1 监测参数体系构建

完整监测参数体系应涵盖变形、应力、水位、环境四大类。变形监测包括围护结构水平位移(测斜精度

± 1 mm)、竖向沉降(静力水准仪精度 ± 0.1 mm)、周边地表沉降(分层沉降仪精度 ± 0.5 mm)等12项指标。应力监测需布置钢筋应力计(量程 ± 500 MPa)、土压力盒(分辨率0.1kPa)、锚索测力计(精度 $\pm 1\%$ FS)等设备,重点监测支撑轴力、围护墙弯矩、锚索拉力等关键参数。水文地质监测应包含地下水位(浮子式水位计精度 ± 5 mm)、孔隙水压力(振弦式渗压计精度 ± 0.1 kPa)、渗流量(电磁流量计精度 $\pm 1\%$)等指标。环境监测需覆盖周边建筑物倾斜(全站仪精度 $\pm 0.5''$)、裂缝宽度(裂缝计精度 ± 0.02 mm)、管线变形(光纤传感精度 ± 1 mm)等内容。监测频率应根据施工阶段动态调整:开挖期每天2次,底板浇筑后每周2次,结构施工期每月1次^[3]。

3.2 多源数据融合与智能分析

多源数据融合采用“传感器层-特征层-决策层”三级架构。传感器层通过物联网技术实现设备互联,支持500+节点同时传输,数据传输延迟小于1秒。特征层运用小波变换、经验模态分解等方法提取变形时程曲线的突变特征,识别精度达95%以上。决策层构建基于深度学习的风险评估模型,输入参数包括当前变形值、变形速率、加速度等18个维度,输出风险等级划分准确率超过90%。智能分析平台集成BIM模型与地理信息系统(GIS),实现监测数据的三维可视化。北京城市副中心某工程通过数字孪生技术,将监测数据与BIM模型实时关联,可直观显示支护结构应力分布云图。机器学习算法在异常检测中表现优异,长短期记忆网络(LSTM)模型对变形突变的识别时间较传统方法缩短70%。知识图谱技术构建的专家系统,已收录2000+典型工程案例,可为风险处置提供智能化决策支持。

3.3 预警机制与应急响应

预警机制采用“四级预警-双色标识”体系:蓝色预警(变形速率0.5-1mm/d)、黄色预警(1-2mm/d)、橙色预警(2-3mm/d)、红色预警(> 3 mm/d)。每个级别对应不同的响应措施,如蓝色预警时加强监测频率,红色预警时立即停止施工并启动应急预案。预警阈值设定需考虑地质条件差异,软土地区取值较硬土地区降低30%-50%。应急响应体系包括组织保障、物资储备、技术措施三方面。建立“项目部-公司-行业专家”三级应急指挥系统,确保30分钟内启动响应程序。物资储备库应配备快速堵漏材料(如水玻璃-水泥双液浆)、应急支撑构件(H型钢、钢板桩)、排水设备(大流量潜水泵)等。技术措施方面,研发了可快速安装的装配式支撑系统,单根构件重量不超过200kg,4人小组可在2小时内完成安装。虚拟现实(VR)技术用于应急演练,使培训效

率提升4倍,操作熟练度提高60%。

4 改进建议与未来发展趋势

4.1 完善基坑工程相关的政策法规与技术标准

现行规范体系存在三方面不足:一是地质分类标准滞后,未充分考虑复合地质条件;二是动态设计要求模糊,缺乏量化指标;三是智能监测技术规范缺失。建议修订《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120),增加“复杂地质条件分类表”,明确各类地质的工程特性参数。制定《基坑工程智能监测标准》,规定数据采集频率、传输协议、分析方法等关键技术要求。建立基坑工程全生命周期管理制度,要求设计文件包含地质风险评估专篇,施工方案体现动态调控措施,验收报告包含长期监测数据。

4.2 加强行业监管与指导力度

为切实保障基坑工程安全,监管体系需全面实现“事前-事中-事后”全流程、无死角覆盖。在事前审查环节,要着重强化地质勘察报告的真实性核查,确保报告数据准确、可靠,为工程设计和施工提供坚实依据。同时,建立勘察单位信用评价制度,将勘察单位的诚信表现与市场准入、业务承接等挂钩,对存在弄虚作假行为的单位实施“黑名单”管理,限制其参与相关项目,形成有效震慑。事中监管推行“双随机、一公开”模式,随机抽取检查对象和执法人员,并及时公开检查结果。重点检查支护结构施工质量是否达标、监测数据是否真实准确、应急预案演练记录是否完整等内容,及时发现并纠正施工过程中的违规行为。事后评估方面,建立基坑工程安全档案,详细记录工程各阶段情况。对发生事故的项目实施“一案双查”,不仅要严肃追究企业的安全主体责任,还要深入查找监管过程中存在的漏洞和不足,完善监管措施。另外,行业协会应充分发挥技术指导作用,定期发布复杂地质条件基坑工程典型案例集,组织专项技术交流活活动,促进企业间的经验分享与技术提升,共同推动基坑工程安全管理水平不断提高。

4.3 人才培养与团队建设

人才培养需构建“学历教育-职业培训-继续教育”三级体系。高校应优化土木工程专业课程设置,增设《复杂地质工程力学》《智能监测技术》等特色课程,建设BIM+GIS综合实验室。职业培训推行“岗位能力标准”,将地质勘察、支护设计、监测分析等岗位技能细化为可量化的考核指标。继续教育建立“学分银行”制度,鼓励从业人员通过在线课程、技术交流等方式积累学分。团队建设方面,推广“地质+结构+监测”多专业协同模式,要求大型基坑项目必须配备注册岩土工程师、一级建造师、监测工程师组成的核心团队^[4]。未来发展趋势呈现三大特征:一是智能化水平持续提升,5G+AI技术将实现监测数据的实时智能分析,数字孪生技术推动基坑工程向“预测性维护”转型;二是绿色化要求日益严格,装配式支护结构应用比例将超过60%,可降解材料在临时支护中的使用成为研究热点;三是标准化建设加速推进,预计5年内将形成覆盖设计、施工、监测全流程的国家标准体系,推动行业技术水平整体跃升。

结束语

复杂地质条件下的基坑工程防护与监测是保障施工安全的关键。通过深入分析地质条件影响机制,优化支护策略,创新复合支护技术,并实施动态调控,可有效提升基坑稳定性。同时,智能监测技术的引入实现了多参数实时监测与智能预警,为应急响应提供了科学依据。未来,随着智能化、绿色化、标准化趋势的推进,基坑工程将迈向更高水平的安全与可持续发展。

参考文献

- [1]赖叶琴.深基坑支护施工技术在建筑工程中的应用探究[J].建筑与预算,2021(12):74-76.
- [2]杨勇波.土木工程施工中深基坑支护的施工技术分析[J].中国设备工程,2021(24):252-253.
- [3]曹红卫.复杂环境及地质条件下深基坑支护施工技术[J].城市建设理论研究(电子版),2023,(21):143-145.
- [4]刘根.复杂地质条件下深基坑支护结构动态可靠度研究[J].建筑技术,2023,54(11):1297-1301.