

深基坑支护施工技术在复杂地质条件下的应用

杨梦轩

中国建筑第八工程局有限公司上海分公司 上海 200120

【摘要】：深基坑工程在城市地下空间开发中广泛存在，复杂地质条件下常出现土层差异大、地下水丰富及基坑变形控制困难等情况，易引发支护结构受力不均与安全隐患，施工风险增大。针对上述情况，采用复合支护体系结合分层开挖控制策略，并引入实时监测与反馈调控机制，对围护结构、锚固体系及降水方案进行协同优化。工程实践表明，该方法可有效降低围护位移与地表沉降，提高基坑整体稳定性与施工安全水平，满足复杂地层施工要求。

【关键词】：深基坑支护；复杂地质；复合支护体系；变形控制；监测技术

DOI:10.12417/2705-0998.26.09.033

引言

城市地下空间开发强度持续提升，深基坑工程规模不断扩大，复杂地质环境下软弱夹层、地下水扰动及土体不均匀性使支护体系受力状态复杂化，变形控制难度明显提高。工程实践中围护结构开挖过程易出现位移累积与局部失稳现象，对施工安全与进度形成制约。针对不同地层条件的适配性支护设计、开挖过程控制及监测反馈机制逐步成为关键技术路径，通过多参数协同调控及分区施工优化，实现基坑稳定性提升及变形精细控制。

1 地层条件识别及支护适配路径构建

1.1 复杂地质识别方法

复杂地质条件识别以多源勘察数据融合为基础，通过钻探取样、原位测试与地球物理探测形成空间地层结构模型，重点刻画软弱夹层、透土层分布及基岩起伏特征。基于三维地质建模技术对土体分区进行精细化划分，结合土体物理力学指标的统计分析，构建非均质地层参数数据库。在数据处理层面引入不确定性分析方法，对土层变异性进行概率区间描述，使地质模型具备更高适配性。地下水系统识别同步纳入渗流场分布特征，通过水头梯度与渗透系数反演实现水土耦合关系表达。多尺度信息叠加后形成地层敏感区判别体系，为后续支护体系适配提供基础约束条件，同时提高对局部异常地质体的识别精度与响应能力。

1.2 支护体系选型逻辑

支护体系选型以地层结构差异性与开挖深度耦合作为核心约束条件，通过建立多工况受力分析模型，对桩、墙、锚、内支撑等构件组合方式进行适配筛选。体系选择过程中重点考虑侧向土压力分布特征、地下水作用强度及周边荷载传递路径，使支护结构具备整体受力连续性与局部刚度匹配性。不同支护形式通过刚度梯度控制实现变形协调，避免局部应力集中引发结构失稳^[1]。选型逻辑中引入结构冗余度与安全储备系数控制机制，使体系在复杂扰动条件下仍保持稳定响应能力。结合施工可达性与空间约束条件，对支护构件布置方式进行拓扑

优化，使结构体系在满足承载要求的同时具备更高施工适应性与空间利用效率。

1.3 参数匹配控制机制

参数匹配控制机制围绕地层力学参数与支护结构刚度之间的动态耦合关系展开，通过建立土体模量、内摩擦角、渗透系数与支护桩刚度、锚索预应力之间的对应关系，实现多参数协同调控。施工阶段依据开挖深度变化对支护体系进行分阶段参数修正，使结构响应始终处于受控区间。采用反演分析方法对监测数据进行实时修正，形成参数反馈更新链条，使模型预测值与实际变形状态逐步趋于一致。针对软弱土层与高渗透区域，强化局部刚度补偿机制，通过调整支护密度与预应力水平实现差异化控制。参数体系设计强调空间连续性与时间递进性，使支护结构在开挖全过程中保持稳定的力学适配状态，从而降低变形累积效应并提升整体协调性。

2 围护结构受力特征及变形来源解析

2.1 土体侧向压力分布特征

土体侧向压力在空间分布上呈现非线性梯度变化特征，与土层结构密度及含水状态密切相关。浅层区域受自重应力主导，压力增长速率较低，而随埋深增加进入主动土压力与静止土压力过渡区，侧向应力逐步增强并出现局部集中现象。不同土层界面处因刚度突变形成应力重分布带，使围护结构局部受力峰值明显上移或下移。软硬互层结构中剪切带发展加速侧向应力传递路径偏移，导致围护墙体弯矩分布不均。结构响应呈现明显的分段性特征，高应力区与低应力区交替出现，对整体变形模式形成主导影响。

2.2 地下水作用影响路径

地下水作用通过渗流场与孔隙水压力传递对围护结构形成双重影响路径，渗透力改变土体有效应力状态，使抗剪强度发生衰减。水头差驱动下形成定向渗流通道，在围护结构背水侧产生附加水压力，导致侧向荷载显著增加^[2]。细颗粒迁移引发土体结构松散化，使局部渗透系数进一步增大，形成正反馈效应。承压水层条件下，上浮力作用改变基底应力分布，引起

底部隆起趋势增强。渗流场与应力场耦合作用使围护体系受力路径复杂化,水压力与土压力叠加成为变形扩展的重要驱动因素。

2.3 开挖卸荷效应表现

开挖过程引发原位应力快速释放,围护结构外侧土体由三向受压状态向侧向约束主导状态转化,产生显著卸荷效应。应力释放速率与开挖深度及分层节奏密切相关,局部卸荷不均导致围护结构内外力差扩大。土体弹塑性变形逐步释放储存应变能,使墙体发生向基坑方向的水平位移累积。边界约束削弱区域形成应力重分布区,弯矩峰值随开挖推进逐步向深部转移。卸荷效应在软弱地层中表现更为明显,土体结构松弛加速变形发展,使围护体系进入持续调整状态。

3 复合支护体系构建及施工控制方法

3.1 桩锚体系协同配置

桩锚体系协同配置以围护桩刚度与锚索预应力空间分布耦合为核心,通过分区段差异化布置实现整体受力均衡控制。围护桩截面刚度根据土层侧压力变化进行梯度优化设计,在高应力区增密桩间距并强化嵌固深度,使抗弯性能与抗剪性能同步提升。锚索体系采用多层次空间布置方式,通过分级张拉控制形成反向约束力场,有效抵消侧向土压力增长趋势。桩锚连接节点通过刚性与柔性过渡构造提升应力传递效率,降低局部应力集中风险。预应力施加过程结合土体变形反馈进行分阶段调整,使锚固力始终匹配围护结构变形状态。整体体系通过刚度协同与受力闭合机制形成稳定约束环路,使围护结构在复杂地层条件下保持连续受力与变形可控状态。

3.2 分层开挖控制策略

分层开挖控制策略以应力释放速率调节为核心,通过控制开挖高度与空间推进节奏实现围护结构受力渐进调整。开挖分层厚度依据土体强度参数与支护刚度匹配关系确定,使每一开挖阶段均处于可控变形范围内。开挖面空间推进采用分区交错模式,减少局部卸荷集中效应,降低围护结构单侧受力突变风险。支撑体系安装与开挖过程形成时间耦合关系,通过及时支撑闭合抑制侧向变形扩展。开挖过程中结合监测数据对施工节奏进行动态修正,使应力释放路径保持稳定过渡状态^[3]。对于软弱夹层区域,通过缩短开挖步距与增强临时支撑刚度方式控制局部变形扩散。整体控制逻辑强调时空协同调节,使围护体系在逐级卸荷过程中维持力学平衡与结构稳定性。

3.3 降水及加固联动措施

降水及加固联动措施以地下水渗流控制与土体强度提升同步调节为核心,通过构建水位梯度调控体系降低孔隙水压力对围护结构的不利影响。降水系统布置依据渗透系数分布特征进行分区优化,使水位降深与土体固结过程保持协调推进。降水过程引起的有效应力变化通过预先加固措施进行补偿,通过

注浆改性与土体结构强化提高抗剪强度。加固区域形成空间增强带,对潜在滑移面进行力学约束,抑制渗流通道扩展。水力梯度控制与土体改性形成协同作用机制,使渗透变形与结构变形同步受控。降水节奏与加固强度根据监测反馈进行动态调整,确保地下水作用不引发结构性扰动。整体联动体系通过水土双控路径实现围护结构稳定性提升与变形扩展抑制。

4 施工过程监测及动态调控机制

4.1 多点位移监测布设

多点位移监测布设以围护结构空间变形场全覆盖感知为目标,通过在墙体顶部、中部及深部关键受力区域设置多层监测断面,实现水平位移与竖向沉降的立体化捕捉。监测点布置依据应力集中区分布特征进行密集化设计,在弯矩峰值区域与土层软弱界面处强化布点,提高局部变形识别精度。基坑周边地表同步布设沉降监测网格,对地表变形扩展范围进行连续追踪。监测系统采用多传感器融合方式,将位移、倾角与应变数据进行空间关联处理,构建结构变形演化图谱。数据采集频率依据开挖阶段调整,在应力变化剧烈区域提高采样密度,使变形发展过程具备连续可追溯性。整体布设体系强调空间连续性与关键节点敏感性,使结构变形特征能够完整呈现。

4.2 数据反馈调整机制

数据反馈调整机制以监测信息与施工参数双向耦合为核心,通过实时数据处理模型对围护结构变形趋势进行动态识别与预测修正。监测数据经过滤波与异常值剔除后进入趋势分析模块,对位移增长速率与加速度变化进行分级判定。基于预测模型输出结果,对支撑轴力、锚索预应力及开挖节奏进行参数修正,使结构受力状态趋于均衡^[4]。反馈调整过程采用分层响应机制,不同风险等级对应不同调控强度,实现施工参数的梯度优化。数据更新周期与开挖进度同步联动,使调整指令具备时效性与连续性。针对局部变形突增区域,通过快速参数重构机制进行局部刚度补偿,使整体结构响应保持稳定演化路径。

4.3 异常响应控制流程

异常响应控制流程以变形突变识别与快速稳定恢复为核心,通过设定多级预警阈值实现风险分级管理。当监测数据突破预设控制范围时,系统自动触发分级响应机制,对异常区域进行定位并锁定影响范围。控制流程首先对施工活动进行局部限速或暂停处理,以降低应力扰动强度,同时同步调整支撑体系受力分布。针对持续增长型异常变形,通过增加临时支撑与局部加固措施强化结构约束能力。渗流异常区域引入水位快速调控与补偿注浆措施,削弱水土耦合失稳效应。异常处置过程结合动态回算模型对结构安全状态进行再评估,使控制措施具备针对性与递进性。整体流程强调快速识别、即时响应与结构恢复能力协同提升。

5 稳定控制成效及工程表现评估

5.1 位移控制指标分析

位移控制指标分析以围护结构水平变形与深层侧移响应为核心评价对象,通过多断面监测数据构建变形曲线分布模型,对不同开挖阶段的位移增长规律进行分级识别。围护墙体顶部位移变化速率与中下部弯曲变形形成耦合关系,反映整体刚度分配合理性。关键控制指标包括最大水平位移、位移梯度变化率及累计变形幅度,通过对比不同施工阶段数据可识别变形发展拐点。位移分布呈现中部集中与端部衰减特征时,结构整体受力状态趋于稳定。局部高位移区域通过支撑体系约束后逐步回归均衡状态,说明刚度匹配与支护协同效果较为稳定。指标体系通过连续数据拟合实现变形趋势量化表达,使结构稳定性具备可控评价依据。

5.2 沉降变化趋势评估

沉降变化趋势评估以基坑周边地表竖向变形演化过程为主要分析路径,通过沉降槽分布特征刻画土体扰动扩展范围。沉降曲线表现为初期缓慢发展、中期加速调整及后期趋稳收敛的阶段性特征,不同阶段反映土体固结与应力重分布过程。沉降峰值位置与地下结构埋深及土层压缩性密切相关,软弱土层区域沉降响应更为敏感。沉降梯度变化率用于判断土体变形扩散强度,当梯度逐步减小时表明地基扰动逐渐稳定^[5]。水土耦合区域沉降变化受地下水位调整影响显著,水位控制与加固措

施共同作用可削弱沉降发展趋势。整体沉降分布趋于平缓时,表明围护体系与地基之间的应力协调状态逐步形成稳定结构关系。

5.3 施工安全表现总结

施工安全表现以围护结构稳定状态与施工过程风险控制能力为核心评价维度,通过变形控制、渗流稳定性及支撑体系受力状态进行综合分析。结构运行过程中未出现突发性失稳特征,围护体系整体受力保持连续传递状态,局部应力集中现象得到有效分散。风险控制机制通过多级监测与动态调控形成闭环,使施工过程偏离设计状态的概率显著降低。地下水作用引发的不稳定因素通过降水与加固协同作用得到抑制,渗流路径趋于稳定。支撑体系受力分配均匀,未出现明显超限应力集中区。整体施工过程呈现渐进式稳定特征,各类变形指标均维持在可控范围内,使工程运行状态保持在连续安全边界内。

6 结语

深基坑支护体系在复杂地质条件下的稳定控制核心体现在地层识别精度、支护协同能力及全过程动态调控水平的统一耦合,围护结构受力与变形控制呈现多因素交互影响特征,系统性技术路径在水土耦合与卸荷效应作用下实现连续优化,结构稳定边界保持相对可控状态,为城市地下空间工程安全推进提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 詹欣强.复杂地质深基坑支护体系优化与变形控制技术[C]//中国智慧工程研究会.2025 工程创新与可持续发展经验交流会议论文集(下).[出版者不详],2025:91-93.
- [2] 陈智海.复杂地质条件下深基坑支护咬合桩工艺改进分析[J].新城建科技,2025,34(11):130-132.
- [3] 魏久坤.水利工程深基坑支护技术在复杂地质条件下的应用研究[J].水上安全,2025,(22):193-195.
- [4] 刘金豹.复杂地质条件下水利工程深基坑开挖与支护技术创新[J].水利技术监督,2025,(12):325-327+340.
- [5] 李自江.复杂地质条件下深基坑支护体系优化设计与施工技术改进[J].四川水泥,2025,(3):161-162+171.