

施工单位在地质条件变化时调整深基坑支护方案的技术可行性与成本控制研究

文 / 陈东军 中国能源建设集团天津电力建设有限公司

摘要：深基坑施工中，地质条件变化常对支护方案形成挑战，本研究关注施工单位遭遇地质条件改变时，深基坑支护方案调整的技术可行性与成本控制，剖析不同地质变化场景，土层性质改变、地下水位波动均在列，探讨适配的支护方案调整策略，桩型选择、支撑结构优化、止水措施改进等技术手段均涵盖在内。数值模拟与实际案例分析相结合，验证调整方案在保障基坑稳定性、控制变形方面的技术可行性，材料选用、施工工艺简化等角度切入，评估方案调整对成本的影响，寻求技术与成本的最佳平衡点，研究结果显示，依据地质条件变化调整深基坑支护方案，既能保障施工安全与质量，又能实现有效成本控制，为工程实践提供科学技术参考。

关键词：深基坑支护；地质条件变化；技术可行性；成本控制

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.22.093

引言

深基坑施工中，地质条件的复杂性与变异性始终是影响支护效果的关键因素，土层力学性能突变、地下水赋存状态改变，常让预设支护方案难与现场实际完全适配，依据实时揭示的地质特征，对支护结构形式、参数及施工工艺做动态调整，实现结构与地质条件的精准匹配，是亟待破解的技术难题。此前研究已初步涉及方案调整的可行性与成本关联，进一步探究地质变化与支护技术调整的内在耦合机制，明晰不同调整策略的适用边界与技术效能，能为优化深基坑支护体系提供更具针对性的技术支撑，衔接理论分析与工程实践的关键环节。

一、地质条件变化对深基坑支护结构的技术影响分析

（一）土层物理力学参数变异的技术作用机制

土层物理力学参数非预期变异会直接改变支护结构受力平衡状态，黏聚力实际值与设计值存在偏差，围护结构所受土压力的分布模式会显著改变，黏聚力实测值低于设计值时，墙后土体抗剪能力下降，主动土压力影响范围向深层扩展，导致排桩最大弯矩位置下移，桩身配筋应力储备被过度消耗，内摩擦角波动会改变土压力计算系数，其数值减小会使土压力合力增大，促使锚杆或内支撑受力点偏移，原本处于弹性工作阶段的构件可能进入弹塑性状态^[1]。压缩模量变化对支护结构变形形态影响显著，该参数降低会加快围护结构侧向位移增长速率，减小位移曲线曲率半径，在开挖面附近形成明显变形拐点，进而改变支护体系整体刚度分布。

（二）地下水赋存状态波动的技术影响路径

地下水赋存状态的动态变化，会经过渗流场与应力场的耦合作用直接影响支护结构性能，地下水位上升过程中，围护结构两侧的水头差值逐步增大，渗透压力沿墙体深度方向形成明显的非线性分布形态，在砂性土地

层这类透水性较强的区域，极易引发管涌风险，进而导致墙后土体颗粒持续流失，最终使围护结构失去原本有效的侧向支撑力，水位下降阶段，土层内部的孔隙水压力消散速率与有效应力增长速率难以同步，这种不匹配特性会在黏性土层中产生显著的滞后变形，该变形会使围护结构被动区土体的抗力系数明显降低，进一步加大支护结构的变形控制难度。承压水水头的动态变化对坑底稳定性影响尤为显著，水头升高会直接减小坑底土体的有效自重应力，当水头压力上升至超过临界数值时，坑底土体就可能发生流土现象，流土会导致支护桩桩端产生额外的附加沉降，使桩身弯矩出现异常峰值，最终破坏支护结构原有的受力平衡状态。

（三）不良地质体与地层形态变异的技术干扰效应

不良地质体存在会破坏支护结构与地层间的协同工作机制，断层破碎带内松散碎屑物质无法提供有效侧向约束，导致相邻围护桩水平位移出现显著差异，进而让内支撑体系产生偏心受力，节点连接处应力集中现象随之加剧，岩溶发育区的溶洞会造成支护桩桩端持力层不连续，使桩身轴向受力状态发生突变，在竖向荷载作用下桩端易产生不均匀沉降，最终引发围护结构整体倾斜。地层形态变异同样需重视，倾斜岩层的层面摩擦角会改变土压力传递方向，使地下连续墙弯矩分布呈现不对称特征，墙身可能出现局部受拉破坏情况，透镜体夹层存在会改变开挖过程中的应力释放路径，导致围护结构在夹层位置产生剪切变形，进一步削弱支护体系整体抗变形能力。

二、基于地质变异特征的深基坑支护方案调整技术路径

（一）围护结构选型的动态适配技术

针对土层物理力学参数变异，需采用围护结构动态选型技术，黏聚力与内摩擦角实测值低于设计值时，可将原排桩支护调整为咬合桩结构，借助桩间相互嵌合形

成连续防渗帷幕，进一步提升对松散土层的约束能力。压缩模量显著降低的区域，宜选用刚度更大的地下连续墙替代原钢板桩，依靠墙体自身整体刚度抑制侧向位移的加速增长趋势，倾斜岩层分布区，可采用嵌岩桩支护形式，合理调整桩端嵌入岩层的深度与角度，让桩体轴向受力方向与岩层层面保持良好适配，避免因应力集中引发桩身破坏问题。

(二) 支撑体系参数的协同优化技术

依据地质变异引发的受力状态改变，实施支撑体系参数协同优化，地下水位上升导致围护结构侧向压力增大时，可加密内支撑布设间距，采用钢支撑与混凝土支撑组合形式，钢支撑的即时承载能力能抵抗短期荷载增长，混凝土支撑则提供长期稳定的刚度支撑，断层破碎带影响区域，需调整支撑节点连接形式，用球铰节点替代刚性节点，节点的微量转动可释放不均匀位移产生的附加应力，增大支撑截面尺寸以提升节点抗剪能力^[2]。坑底存在流土风险的区域，可增设逆作栈桥作为临时支撑，栈桥的整体刚度能分散坑底土压力，减少支护结构的竖向荷载扰动。

(三) 止水防渗体系的针对性强化技术

针对地下水赋存状态波动及不良地质体渗透特性，采取止水防渗体系针对性强化技术，砂性土地层出现管涌风险时，可在原止水帷幕外侧增设高压旋喷桩，借助浆液渗透胶结作用改善土体渗透性，形成复合防渗屏障。岩溶发育区，采用袖阀管注浆技术填充溶洞，注浆材料选用速凝型水泥浆与超细水泥混合液，分层注浆控制浆液扩散范围，确保溶洞填充密实性，地层存在透镜体夹层时，可沿夹层分布范围布设水平向注浆管，以低压慢注方式让浆液沿夹层裂隙扩散，形成水平防渗帷幕，阻断地下水横向渗透路径。

三、不同调整方案的支护效能与地质适配性验证

(一) 基于数值模拟的支护效能验证

采用有限元分析方法量化评估调整方案的支护效能，针对黏聚力降低的砂黏交互地层，分别建立排桩支护与咬合桩支护的三维计算模型，模拟开挖过程中围护结构的力学响应，结果显示，咬合桩支护体系最大水平位移为 32mm，较原排桩方案减少 41mm，桩身最大弯矩降低至

890kN·m，其对松散土层的约束能力显著提升。岩溶发育区，对嵌岩桩方案开展数值模拟，桩端嵌入中风化岩层 5m 时，桩顶沉降量控制在 15mm 以内，桩身轴力分布均匀，无明显应力突变点，验证该方案对复杂岩土地层的适应性，改变模型中地下水水头参数，模拟不同水位条件下止水防渗体系的工作状态，高压旋喷桩复合帷幕的渗透系数可降至 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 以下，渗流量较单一帷幕减少 $68 \text{m}^3/\text{d}$ ，防渗效果满足设计要求。

(二) 现场监测数据的适配性分析

依托实际工程案例，借现场监测数据验证调整方案与地质条件的适配情况，地下水位波动频繁的场区，针对钢-混组合支撑体系开展为期 3 个月的应力监测，结果显示钢支撑最大应力 185MPa，混凝土支撑最大压应力 12MPa，两类构件均处于材料弹性工作阶段，支撑体系未产生塑性变形^[3]。断层破碎带区域应用球铰节点支撑方案后，监测所得相邻围护桩差异沉降为 8mm，节点转角位移控制在 0.01rad 以内，地层不均匀变形产生的附加应力得到有效释放，逆作栈桥支撑区域的坑底隆起量监测数据显示，最大隆起量 23mm，较无栈桥区域减少 35mm，栈桥结构对坑底土体的约束作用显著，与流土风险区地质特征适配。

(三) 多方案对比的适配性等级划分

多指标综合对比，构建适配性等级划分体系，精准评估不同调整方案与地质条件的匹配程度，选取围护结构变形量、应力集中系数、防渗效率作为关键评价指标，运用层次分析法明确各指标在不同地质环境中的权重占比，形成系统的等级判定标准^[4]。砂性土地层中，高压旋喷桩复合防渗方案依靠多道防渗结构协同作用，防渗效率达 92%，对砂层渗透特性适应性优异，适配性等级为 I 级；单一止水帷幕方案因结构整体性不足，防渗效率仅 65%，难应对砂层渗透压力，适配性等级为 III 级，倾斜岩层分布区，嵌岩角度与岩层层面夹角一致的方案，桩身应力传递路径顺畅，应力集中系数 1.2，能较好适应岩层倾斜特性，适配性等级为 I 级；角度偏差 30° 时，桩体受力状态显著变化，应力集中系数增至 2.5，对岩层条件的适应性下降，适配性等级降至 II 级。见表 1 所示：

表 1 不同地质条件下支护方案关键技术参数对比

地质条件类型	支护方案类型	最大水平位移 (mm)	桩身最大弯矩 (kN·m)	渗透系数 (cm/s)
砂黏交互地层	咬合桩支护	32	890	5×10^{-8}
岩溶发育区	嵌岩桩支护	15	1200	3×10^{-9}
断层破碎带	球铰节点支撑	28	760	——
高水位砂层	钢-混组合支撑	41	1050	8×10^{-8}

注：表中数据为相同开挖深度条件下的监测与模拟结果，“——”表示该地质条件下无对应技术参数。

四、深基坑支护方案动态调整的技术优化策略总结

(一) 地质信息动态采集与反馈技术策略

建立贯穿施工全过程的地质信息动态采集体系，为支护方案调整提供精准依据，采用超前地质钻探与物探

技术结合的方式，基坑开挖前对围护结构外侧及坑底以下地层开展探测，经过声波反射法识别隐伏断层与溶洞分布，利用地质雷达扫描确定土层界面埋深及地下水赋存范围。开挖过程中，实时采集掌子面地层样品，经室

内试验测定土的黏聚力、内摩擦角等力学参数，结合原位测试结果修正初始地质模型，将采集的地质信息录入三维地质信息系统，借助BIM技术构建数字化地层模型，实现地质条件与支护结构的可视化耦合分析，为方案调整提供直观技术参考，探测到新的地质变异特征时，及时更新模型参数，确保支护方案调整与实际地质条件保持动态适配。

（二）支护参数动态匹配技术策略

基于地质信息的动态更新，形成支护参数的多维度动态匹配机制，针对土层物理力学参数的变异情况，改变围护结构的截面尺寸与材料特性实现力学性能的精准适配，在软土地层这类抗剪能力较弱的区域，可增大排桩直径至合适范围或采用高强度钢材制作构件，以此显著提升结构的抗变形能力；在岩质地层中则重点优化桩端嵌入方式，细致调整嵌岩角度，让桩体受力方向与岩层走向保持良好协调。对于地下水条件的动态变化，需实时调整止水防渗体系的布设参数，在富水地层中加密止水帷幕的搭接长度至设计要求，采用多排注浆工艺形成立体防渗体系；在渗透性差异显著的地层界面处，额外增设水平向止水结构，有效阻断地下水的渗流路径，支撑体系参数的调整必须与

围护结构变形特征紧密匹配，当监测数据显示围护结构侧向位移呈现不均匀分布趋势时，及时改变支撑间距与布置形式，使支撑刚度分布与荷载分布形成高效协同，从根本上避免局部应力集中问题的出现。

（三）技术体系协同优化策略

构建多技术协同作用的支护方案优化体系，提升应对地质变异的综合效能，把超前探测技术与实时监测技术结合起来，凭借探测数据预判地质变化趋势，依托监测数据验证支护方案的实施效果，形成“探测-调整-验证”的闭环技术流程，整合数值模拟与现场试验技术，模拟分析预先设定多种地质变异情景下的支护方案效果，结合现场小规模试验验证不同调整策略的适用性，缩短方案优化周期^[5]。推动支护结构与施工工艺的协同创新，复杂地质条件下采用逆作法与顺作法结合的施工方式，利用逆作结构的刚度提前约束地层变形；不良地质体分布区域，采用注浆加固与支护施工同步进行的工艺，经过土体改良为支护结构提供更稳定的受力环境，多技术的协同应用，实现支护方案从被动调整向主动优化的转变，提升深基坑工程应对地质变异的技术韧性。见图1所示：

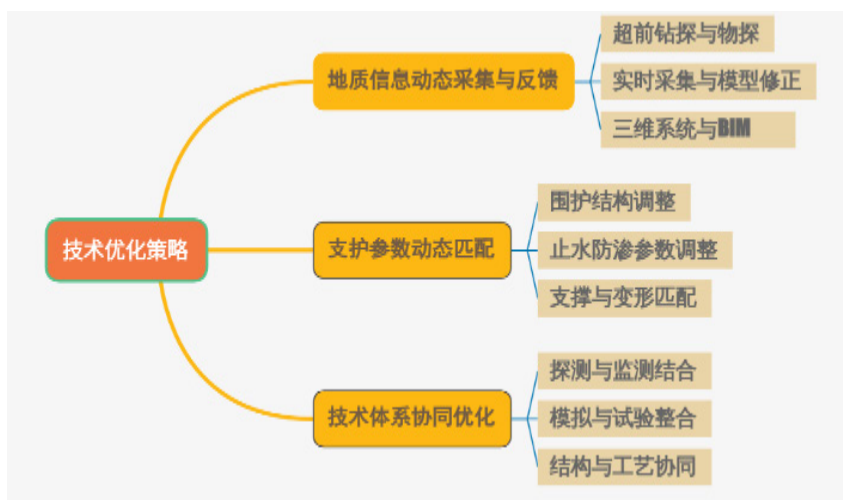


图1 深基坑支护方案动态调整技术优化策略的思维导图

结语

深基坑支护方案的动态调整，需以地质信息的精准捕捉为前提，经过参数匹配与技术协同实现与地质变异的动态适配，地质信息动态采集技术为方案调整提供数据支撑，支护参数的多维度匹配机制确保结构性能与地层特征适配，多技术协同体系则提升应对复杂地质条件的技术效能。未来，需进一步深化地质探测与支护技术的融合，发展更精准动态响应算法，推动支护方案优化向智能化、自适应方向演进，为复杂地质条件下的深基坑工程提供更可靠的技术保障。

参考文献

[1] 王作成，蒋吉财. 高层建筑深基坑支护施工技术研究[J]. 中国建筑装饰装修，2025，(14):166-168.

[2] 王朝兴. 房建项目深基坑支护技术施工问题深度研究及实践优化[J]. 工程机械与维修，2025，(07):53-55.

[3] 孔令伟. 深基坑支护技术在水利工程施工中的应用[J]. 城市建设理论研究(电子版)，2025，(19):125-127.

[4] 马永生. 高层房屋建筑工程中深基坑支护的施工技术研究[J]. 中国建筑装饰装修，2025，(12):158-160.

[5] 杨晓岚. 高层住宅建筑深基坑支护变形监测与控制策略[J]. 居舍，2025，(17):166-169.

作者简介：陈东军(1986—05)，男，汉族，天津人，本科，研究方向为火电厂项目施工投标报价。