

# 复杂地质条件下深基坑支护施工工艺的选择与变形控制研究

张进生

中电建市政建设集团北方国际工程有限公司 山西 晋中 030600

**【摘要】**：复杂地质条件下深基坑支护施工的安全性与稳定性难题，可依托广州花都区岩溶活跃区某房建深基坑项目解决。该项目基坑开挖深度4.4-8.0m，安全等级二级，周边环境复杂，据此分析刚性支护（灌注桩/排桩）与柔性支护（锚杆/锚索）的选型要点，阐述分区分层开挖、灌注桩成孔、锚索张拉等关键工艺控制措施，介绍变形监测方案、动态控制方法及异常应急处置策略。刚性与柔性结合、分区适配的支护体系，搭配全过程工艺管控与动态监测，能有效控制基坑变形，桩顶水平位移最大值12.8mm、竖向沉降最大值5.8mm，远低于规范预警值20mm，保障施工安全与周边环境稳定，为同类复杂地质深基坑支护施工提供参考。

**【关键词】**：复杂地质；深基坑支护；灌注桩；锚索；变形监测

DOI:10.12417/2811-0528.26.13.017

城市建设向地下空间延伸，深基坑工程数量逐年增多，岩溶、富水、软土等复杂地质条件对支护施工要求愈发严苛。基坑开挖易引发边坡失稳、渗漏、变形过大等安全隐患，威胁周边建构筑物、道路及地下管线安全。广州花都区某房建项目地处岩溶活跃区，地下水类型多样且波动显著，周边环境复杂，给支护施工带来极大挑战。结合该工程实例，分析深基坑支护工艺选型思路，优化关键施工工艺控制措施，完善变形监测与应急处置方案，为复杂地质条件下深基坑支护施工提供技术支撑，保障工程施工安全高效推进。

## 1 复杂地质条件下深基坑支护施工工艺选型分析

(1) 深基坑支护工艺适用条件与选型原则：深基坑支护工艺选型核心依据为地质条件、水文特征、开挖深度、周边环境及安全等级，遵循安全可控、经济合理、技术可行、施工便捷原则。岩溶发育、富水、软土、破碎地层等复杂工况下，优先选择刚度匹配、止水可靠、变形可控且适应动态扰动的组合体系<sup>[1]</sup>。

(2) 刚性支护工艺选型要点：灌注桩作为刚性主体支护，深段与地质薄弱区优先采用。选型结合地层强度、溶洞分布及侧向土压力特征确定桩径、桩距、嵌岩深度与配筋率。广州花都项目D-1区基坑深度较大，选用Φ800-Φ1000灌注桩，桩距1.2~1.5m，桩身强度可传递侧向荷载，桩顶设置冠梁分散荷载，降低侧壁集中变形风险。岩溶区成孔采用旋挖工艺配合泥浆护壁，跳打施工避免邻孔塌孔，预设耳环筋控制保护层厚度，提升桩基耐久性与承载稳定性。隐伏溶洞处，结合超前探测调整桩长，必要时用旋喷桩与灌注桩组合封堵渗漏通道，保障刚性支护连续性与止水效果。

(3) 柔性支护工艺选型要点：锚杆与锚索作为柔性拉固体系，与刚性支护协同提升整体稳定性。选型围绕锚固地层、

锚固长度、张拉荷载、注浆工艺与布置间距进行。广州花都项目采用预应力锚杆并实施全长注浆，提升锚固体与土体的粘结强度及抗拔承载力。锚固段避开岩溶裂隙与富水带，确保拉力传递至稳定地层。按开挖深度与土压力分布确定竖向间距与倾角，锚索孔径150mm、倾角15°-25°、张拉荷载120-180kN，定荷载为设计值的90%，实现分层分段锚固、同步控制变形。岩溶富水地层采用二次高压注浆工艺，注浆压力0.8~1.2MPa，封堵孔壁裂隙、防止浆液流失，保证锚固效果不受地下水扰动，让柔性拉固与刚性挡护形成受力闭环，提升基坑整体抗变形能力（见表1）。

表1 支护结构关键设计参数表

项目	数值
灌注桩桩径 (mm)	800~1000
灌注桩桩距 (m)	1.2~1.5
桩身垂直度	≤1/200
孔底沉渣厚度 (mm)	≤50
锚索孔径 (mm)	150
锚索倾角 (°)	15~25
锚索张拉荷载 (kN)	120~180
注浆压力 (MPa)	0.8~1.2

## 2 复杂地质深基坑支护施工关键工艺控制

(1) 分区分层开挖与坡面修整工艺控制：开挖扰动是支护变形与失稳的主要诱因，复杂地质需执行分区分层、同步交替开挖工艺。广州花都项目将基坑划分为若干作业单元，每层开挖深度控制在1.5m以内，单段开挖长度不超过15m，避免大范围卸荷与应力集中。坡面预留20-30cm土层人工精修，

保证坡面平顺且贴合设计线型，坡顶预留 10cm 刷坡层增强表面抗水蚀能力。严控坡顶堆载高度与重量，防止附加荷载引发边坡失稳，该工艺可降低地层扰动幅度，使开挖与支护工序衔接紧密，维持基坑受力状态稳定。

(2) 灌注桩成孔与钢筋笼定位工艺控制：灌注桩成孔与钢筋笼定位决定支护结构质量与变形控制水平。成孔采用跳仓法施工，避免邻孔相互干扰造成塌孔。岩溶区严控泥浆比重与护壁效果，渗漏时用泥浆或速凝水泥封堵。钢筋笼定位采用十字吊锤与套管双控技术，竖向定位误差控制在±20mm 以内，预设耳环筋保证保护层厚度均匀，防止钢筋偏位导致桩身受力不均。成孔后及时清孔并灌注混凝土，孔底沉渣厚度≤50mm，桩身垂直度控制≤1/200，避免孔底沉渣过厚降低竖向承载与抗拔性能。全过程工艺管控让桩身完整性、垂直度与承载力满足设计要求，为刚性支护提供可靠基础。

(3) 锚索张拉与全长注浆工艺控制：预应力锚索张拉与注浆是柔性支护发挥作用的核心环节。施工严格遵循分级加载制度，确保预应力均匀传递、稳定锁定，避免荷载骤增损伤结构。采用全长注浆与二次封固工艺，提升锚固体与土体粘结强度，阻断孔道渗水。注浆材料及压力随地层裂隙调整，岩溶破碎区提高注浆压力并采用水泥-水玻璃双液浆强化封堵。张拉后及时锁定并做好防腐，使锚索受力均匀、变形可控，与刚性桩体协同作用，有效控制基坑侧向位移（见图 1）。

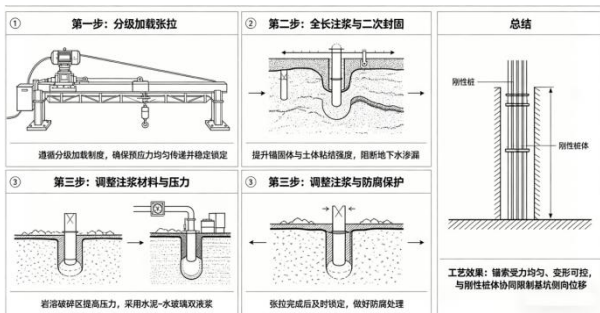


图 1 预应力锚索张拉与注浆流程图

### 3 深基坑支护结构变形监测与控制措施

(1) 支护结构变形监测方案与测点布设：变形监测是动态控制与风险预警的基础。广州花都项目沿坡顶按 20 - 30m 间距布设监测点，覆盖基坑周边与关键区段。监测内容包括桩顶水平位移、竖向沉降、边坡位移、地下水位及周边建构筑物与管线沉降。正常工况每 3 天监测一次，雨季及开挖密集期改

#### 参考文献：

[1] 李瑞军.复杂地质高层建筑工程深基坑开挖支护技术探究[J].建筑技术开发,2025,52(09):162-164.  
 [2] 侯航舰.复杂地质基坑支护设计及安全性研究[J].工程设计与设计,2025,(17):27-30.  
 [3] 姚小波.复杂地质条件下建筑深基坑支护变形响应及支护优化研究[J].工程机械与维修,2025,(09):106-109.

为每日观测，采用高精度仪器保障数据准确。建立监测数据库，实时对比累计变形、变形速率与设计预警值，为施工调整提供量化依据。测点布设兼顾全面性与代表性，实现基坑与周边环境变形全覆盖感知。

(2) 开挖扰动下变形动态控制方法：开挖引发的应力释放与土体卸荷是变形快速发展阶段。需采取动态控制措施，依托监测数据实行开挖与支护联动，变形速率接近 2mm/d 预警阈值时立即暂停开挖，采取局部卸荷、缩短开挖段长度、提前实施锚固等措施稳定地层。严格执行分层分段、先支后挖、限时封闭原则，减少边坡无支护暴露时间<sup>[3]</sup>。通过冠梁整体化、锚杆均匀布设与及时张拉形成空间受力体系，分散土压力、抑制持续变形。同步管控地下水，避免水位骤变加剧软化与沉降，实现变形全过程闭环管控，确保变形处于设计允许范围。

(3) 异常变形应急处置与加固控制：需针对支护异常变形制定专项应急预案。出现快速变形或接近警戒值时，立即采取应急卸荷、回填反压或沙袋临时支护等措施控制变形发展。采用注浆加固对桩间、坡脚及薄弱土体补强，提升地层强度与整体性。施工现场储备抢险材料，实行 24 小时值守，确保突发状况快速响应（见表 2）。

表 2 基坑变形监测成果表

项目	实测最大值(mm)	规范预警值(mm)
桩顶水平位移	12.8	20
桩顶竖向沉降	5.8	20
周边地面沉降	7.1	15
基坑变形速率(mm/d)	1.2	2
地下水位变幅(m)	0.3	0.5

### 4 结语

复杂地质条件下深基坑支护施工需兼顾安全性、经济性与技术可行性，核心是科学选型、精准控工与动态监测。结合广州花都区岩溶区深基坑工程实例，明确刚性与柔性支护体系的选型要点，严格管控分区分层开挖、灌注桩成孔、锚索张拉等关键工艺，降低施工扰动带来的安全风险。依托全面的变形监测与灵活的应急处置措施，实现基坑变形全过程闭环控制，最终桩顶水平位移 12.8mm、竖向沉降 5.8mm、周边地面沉降 7.1mm，均远低于规范允许值，保障基坑及周边环境安全。