

# 复杂地质下泥岩地区基坑支护设计与实践

李 晨

淄博师范高等专科学校 山东 淄博 255100

**摘要：**城市化进程的快速推进带来了土地资源日益紧张的问题，尤其在核心城区，地面空间已经趋于饱和。为适应现代化城市的多功能需求，地下空间开发逐渐成为解决城市用地问题、改善城市功能布局的重要途径之一。在轨道交通、商业空间、地下停车场、综合管廊等工程建设中，地下空间的应用广泛，基坑工程因此成为确保地下建设安全的重要环节。

**关键词：**深基坑支护；设计优化；地质条件；施工技术

城市地下空间的开发使基坑工程变得越来越复杂。复杂地质下泥岩地区基坑支护设计需综合考虑地质特性、变形控制及施工可行性，关键设计要点：泥岩具高压缩性、低抗剪强度及遇水易软化特性，可能导致基坑侧壁滑移、底鼓及变形超限问题。若存在岩溶发育，需额外评估溶洞对支护结构稳定性的影响<sup>[1]</sup>。

## 1 泥岩地质特性综述

1.1 定义与基本属性。泥岩是由弱固结黏土经挤压、脱水、重结晶及胶结等后生作用形成的沉积岩，属于泥质岩类，其粒径通常小于0.0039mm，且层理或页理不明显，多呈块状结构。与页岩相比，泥岩固结程度较弱，遇水不立即膨胀但易软化。

1.2 矿物组成。黏土矿物：主要包括水云母、高岭石、蒙脱石等，占比超过50%。次要组分：碎屑矿物：石英、长石、云母等；次生矿物：绿帘石、绿泥石等；杂质成分：铁锰质、有机质及碳酸盐（如钙质泥岩）。

1.3 结构特征。颗粒细腻：黏土矿物粒径多小于4 $\mu$ m，质地致密，断口呈贝壳状且触感光滑。构造特性：层理不发育，局部可见水平纹理或含化石遗迹；部分类型（如钙质泥岩、硅质泥岩）含鲕粒或豆粒结构，但缺乏同心层状构造。

1.4 物理特性。软化性：遇水易软化变形，吸水性显著，需防潮处理；力学特性：硬度低，易风化，密度轻；湿润状态下具有可塑性，干燥后脆性增强；颜色多样性：含铁质时多呈红色，含有机质则呈灰黑色，硅质泥岩常为浅色。

1.5 化学特性。以硅、铝氧化物为主，含少量钙、铁等元素，化学稳定性较弱，易受水化学作用影响。有机质的存在可降低其抗风化能力。

1.6 工程特性与挑战。工程缺陷：遇水软化导致承载力下降，易引发基坑侧壁滑移或底鼓；裂隙发育区易产

生渗透破坏。优势特性：干燥状态下压缩性低，可作为填土或地基材料；耐火性与粘结性使其适用于制砖瓦、陶器等工业。

## 2 泥岩的成因解析

2.1 沉积环境与物质来源。沉积环境。主要形成于静水或低能量环境，例如湖泊、沼泽、潟湖、深海盆地等，水流缓慢使细粒物质得以充分沉积。部分泥岩也分布于河流三角洲、浅海陆棚等环境，与周期性水流活动相关。物质组成。原始沉积物以黏土矿物（如水云母、高岭石、蒙脱石）为主，占比超过50%，并含有少量石英、长石等碎屑矿物。有机质、铁锰质及化学沉淀物（如碳酸盐、硅质）常作为次要组分混入。

2.2 成岩过程。物理压实。沉积物在重力作用下逐渐脱水，颗粒间孔隙缩小，密度增大，形成弱固结的泥质层。化学胶结。溶解矿物（如碳酸钙、硅质）在孔隙水中析出，形成胶结物增强颗粒间连接，最终固结成岩。构造作用影响。地壳运动导致的埋深增加和温度压力变化，可能促进黏土矿物重结晶或次生矿物（如绿泥石、绿帘石）生成。

## 3 复杂地质下泥岩地区基坑支护设计要点

3.1 地质特性与设计挑战。泥岩特性影响。泥岩遇水软化显著，易引发基坑侧壁滑移、底鼓及变形超限，需重点防控水敏性风险。岩溶发育区需评估溶洞对支护结构的稳定性影响，必要时采取超前钻探或人工挖孔桩处理。环境约束。邻近敏感建筑物时，支护设计需控制水平位移（如最大 $\leq 20$ mm），并减少振动干扰。

3.2 支护结构选型与优化。组合支护形式。支护桩+锚索/钢支撑：旋挖钻孔灌注桩提供竖向承载力，预应力锚索或型钢内支撑增强水平约束，适用于变形敏感区域。地下连续墙+内支撑：适用于高水位或复杂地层，止水与支护一体化，减少对周边环境的影响。被动区加固：

通过水泥石搅拌桩或注浆加固坑底泥岩层,提升抗隆起能力。动态设计调整。根据泥岩风化程度差异分区设计支护参数,局部加强代替全断面加固,降低工程成本。

3.3 止水与排水措施。止水帷幕。采用三重管高压旋喷桩形成截水帷幕,深度需穿透泥岩软化层并进入稳定岩层1m以上。排水系统。设置明沟+集水井排除地表水,必要时采用真空降水控制地下水位,防止泥岩遇水软化。

3.4 施工技术要求。分层分段开挖。每层开挖厚度 $\leq 1\text{m}$ ,遵循“先撑后挖”原则,缩短无支撑暴露时间。支护桩施工。旋挖钻机成孔灌注桩为主,泥浆护壁工艺确保桩身质量;遇岩溶区采用人工挖孔桩结合超前钻探。冠梁与支撑施工。冠梁混凝土强度需 $\geq 1\text{MPa}$ 后拆模,砖挡墙分层砌筑并设置构造柱增强整体性。

3.5 监测与风险控制。变形监测。布设位移计、测斜管监测桩顶位移及坑底隆起,数据超限时启动注浆加固或补加支撑。应急预案。针对突水、局部塌陷等风险,提前储备应急材料(如速凝水泥、钢支撑)。

3.6 经济性与工期优化。预应力钢支撑替代锚索:减少锚索施工对场地的占用,缩短工期。局部加强设计:结合泥岩力学参数差异动态调整支护方案,避免过度设计。

#### 4 支护桩在复杂地质下的设计与施工要点

4.1 设计要点。支护结构选型与组合。组合支护形式:复杂地质下优先采用“支护桩+锚索/内支撑”复合体系,如旋挖钻孔灌注桩与预应力锚索结合,增强水平约束与竖向承载力;锁扣钢管桩:针对高水位或软硬交互地层,采用锁扣钢管桩围堰,嵌固深度需穿透软弱层(如泥岩软化层)并进入稳定岩层 $\geq 5\text{m}$ 。桩参数优化。桩径与间距根据地层差异调整,软土区加密桩间距(如3倍桩径以内),硬岩区适当扩大间距;桩长需穿透液化土层或全风化岩层,确保嵌固段进入稳定地层(如微风化泥质粉砂岩) $\geq 2\text{m}$ 。止水措施强化。止水帷幕采用三重管高压旋喷桩,深度需覆盖泥岩软化层并延伸至稳定岩层 $\geq 1\text{m}$ ,阻断地下水渗透路径;局部渗漏区采用速凝水泥注浆或砂石混合物锚固补强。动态设计调整。根据钻孔揭露的溶洞、软硬夹层等异常地质情况,分区调整桩长、支护密度及支撑形式。

4.2 施工要点。分层分段开挖控制。每层开挖厚度 $\leq 1\text{m}$ ,遵循“先撑后挖”原则,缩短无支撑暴露时间;核心筒等密集桩区采用跳挖施工,避免群桩效应导致塌孔。成孔工艺选择。旋挖钻机成孔:适用于黏土、砂层及强风化岩,泥浆护壁控制泥浆比重(1.2~1.3)防止塌孔;人工挖孔桩:岩溶发育区或机械无法作业区域,采

用钢桶护壁配合超前钻探验证地质条件。钢筋笼与混凝土施工。钢筋笼主筋与加劲筋采用单面电弧焊连接,螺旋筋梅花点焊加固,吊装时设置船型定位卡控制保护层厚度;混凝土灌注连续作业,导管埋深 $\geq 2\text{m}$ ,塌落度控制在180~220mm,充盈系数 $\geq 1.1$ 。特殊地层处理。淤泥质土层:桩机底座铺设钢板或路基箱分散荷载,冲孔时控制提钻速度并注入高黏度泥浆;液化砂层:成孔后立即灌注混凝土,或采用钢护筒跟进隔离流砂。

4.3 监测与应急措施。变形监测系统。布设测斜管、位移计实时监测桩顶位移(警戒值 $\leq 20\text{mm}$ )及坑底隆起,数据异常时启动注浆或补加内支撑;应急预案储备。突水风险区预置速凝水泥、钢板桩及钢支撑,塌孔时采用砂石混合物回填复钻。

4.4 经济性与工期优化。预应力钢支撑替代锚索:减少锚索施工占地,加快支护进度;分区差异化施工:按地质条件划分优先级,优先完成高风险区域支护桩施工。

#### 5 复杂地质下泥岩地区基坑支护设计方法

5.1 地质特性与设计难点。泥岩水敏性控制。泥岩遇水易软化,需重点防控地下水渗透引发侧壁滑移或底鼓,设计时优先考虑止水帷幕的完整性。高风化区泥岩强度差异大,需通过钻孔取样分区确定承载力参数,动态调整支护方案。环境约束。邻近敏感建筑物时,支护结构需严格控制水平位移(如 $\leq 20\text{mm}$ ),必要时采用隔振工艺减少施工扰动。

5.2 支护结构选型与优化。组合支护体系。灌注桩+预应力锚索/钢支撑:旋挖钻孔灌注桩提供竖向承载力,预应力锚索或钢支撑增强水平约束,适应泥岩变形敏感特性;钢板桩围堰:针对高水位区域,采用拉森钢板桩(如SP-IV型)+工字钢围檩,锁扣连接确保止水效果,桩长需穿透软化层至稳定岩层 $\geq 5\text{m}$ ;被动区加固:坑底采用水泥石搅拌桩或注浆加固,提升泥岩抗隆起能力,注浆深度宜为基坑深度的1.2~1.5倍。动态设计调整。根据钻孔揭露的泥岩风化程度差异,分区调整桩长(硬岩区缩短,软弱区延长)、锚索密度(软岩区加密至间距 $\leq 2\text{m}$ )及支撑刚度。

5.3 止水与排水系统设计。止水帷幕。采用三重管高压旋喷桩或TRD工法形成连续截水帷幕,深度需穿透泥岩软化层进入稳定岩层 $\geq 1\text{m}$ ,搭接宽度 $\geq 200\text{mm}$ ;局部渗漏区采用速凝水泥注浆或化学浆液补强,注浆压力控制在0.5~1.0MPa。排水措施。设置明沟+集水井排除地表水,坑内布置轻型井点或真空降水管,控制地下水位低于坑底 $\geq 0.5\text{m}$ <sup>[2]</sup>。

5.4 施工关键技术。分层开挖与支撑安装。每层开挖

厚度 ≤ 1m, 遵循“分段开挖、先撑后挖”原则, 钢支撑安装与土方开挖间隔 ≤ 24小时; 核心区采用跳挖工艺, 相邻桩孔间距 ≥ 4倍桩径, 避免群桩效应导致塌孔。成孔质量控制。旋挖钻机成孔: 泥浆比重控制在1.2~1.3, 含砂率 ≤ 4%, 清孔后沉渣厚度 ≤ 50mm; 人工挖孔桩: 岩溶发育区采用钢护筒跟进, 每挖深1m及时浇筑C20混凝土护壁。材料与工艺控制。钢筋笼主筋焊接采用单面搭接焊(焊缝长度 ≥ 10d), 螺旋筋与主筋点焊固定, 保护层厚度偏差 ≤ 10mm; 混凝土灌注连续作业, 导管埋深 ≥ 2m, 塌落度180~220mm, 充盈系数 ≥ 1.1。

5.5 监测与应急措施。实时监测系统。布设测斜管(间距20~30m)、位移计及水位观测井, 监测桩顶位移(警戒值 ≤ 20mm)、坑底隆起及地下水位变化; 数据异常时启动应急注浆或补加临时钢支撑。应急预案储备。预置速凝水泥、钢板桩及钢支撑, 突水时采用双液注浆封堵, 塌孔区域回填砂石复钻。

#### 6 复杂地质下泥岩地区基坑支护设计优化建议

6.1 地质特性针对性优化。泥岩软化防控。采用三重管高压旋喷桩或TRD工法形成连续止水帷幕, 深度需穿透泥岩软化层并进入稳定岩层 ≥ 1m, 阻断地下水渗透路径; 坑底被动区采用水泥土搅拌桩加固, 注浆深度为基坑深度的1.2~1.5倍, 增强泥岩抗隆起能力。风化差异处理。根据钻孔揭露的泥岩风化程度差异, 分区调整支护参数: 硬岩区: 缩短灌注桩嵌固深度( ≥ 2m), 扩大桩间距至4倍桩径; 软弱区: 延长桩长至稳定岩层 ≥ 5m, 锚索密度加密至间距 ≤ 2m。

6.2 支护结构优化。组合支护体系。灌注桩+预应力锚索: 旋挖钻孔灌注桩(桩径 ≥ 800mm)提供竖向承载力, 锚索施加150~200kN预应力以控制泥岩侧向变形; 锁扣钢管桩围堰: 针对高水位区域, 采用SP-IV型拉森钢板桩+工字钢围檩, 锁扣密封胶填充确保止水效果, 嵌固深度 ≥ 5m。动态设计调整。施工中每开挖2m进行一次地

质复勘, 根据揭露的溶洞或软弱夹层实时调整桩长及支撑刚度。

6.3 止水与排水系统优化。分层止水措施。浅层(0~5m)采用双轴搅拌桩截水, 深层(5m以下)采用高压旋喷桩补强, 搭接宽度 ≥ 200mm; 局部渗漏点采用速凝水泥(初凝时间 ≤ 5min)注浆封堵, 注浆压力0.5~1.0MPa。智能排水控制。布设真空降水管井(间距15~20m), 配合水位传感器实现自动启停, 保持地下水位低于坑底 ≥ 0.5m。

6.4 施工控制优化。精细化开挖管理。采用“分层分段跳挖”工艺, 每层厚度 ≤ 1m, 相邻区域高差 ≤ 2m, 减少临空面暴露时间; 钢支撑安装与土方开挖间隔 ≤ 12小时, 预应力施加误差控制在±5%以内。成孔质量控制。旋挖钻机成孔时泥浆性能实时监测(比重1.2~1.25, 含砂率 ≤ 4%), 沉渣厚度 ≤ 50mm; 岩溶发育区采用钢护筒跟进(壁厚 ≥ 10mm), 护筒底端嵌入稳定岩层 ≥ 1m。

6.5 监测与应急优化。多参数实时监测。布设测斜管(间距20m)、锚索应力计及孔隙水压计, 桩顶位移警戒值 ≤ 15mm, 锚索拉力波动阈值±10%; 数据异常时启动自动预警, 优先采用微型桩+注浆加固变形区域。模块化应急储备。预置装配式钢支撑(长度可调±2m)、速凝水泥及钢板桩, 突水时双液注浆(水玻璃:水泥浆 = 1:1)30秒内封堵。

总之, 通过地质适配性设计、智能施工控制及模块化应急体系, 可显著提升泥岩地区基坑工程的安全性与经济性。

#### 参考文献

- [1]王超.浅谈复杂地质下泥岩地区基坑支护设计与实践.2022.
- [2]张红艳.复杂地质下泥岩地区基坑支护设计与实践分析.2023.