

深厚软土地层深基坑工程协同支护体系与动态调控技术

汪令明

(广州地质勘察基础工程有限公司, 广东 广州 510000)

摘要 本文针对滨海深厚软土地层深基坑工程中的复杂地质条件与敏感环境约束, 系统探讨了支护体系设计优化与施工动态调控的关键技术。通过综合比选地下连续墙、SMW工法桩及钻孔桩组合支撑等多种支护方案, 提出“结构刚度强化—地下水协同控制—实时监测反馈”三维协同支护体系, 成功解决了淤泥质黏土高压缩性、低渗透性及流变特性引发的支护结构变形失稳与周边环境沉降风险。结合分层分块开挖策略与时空效应控制理论, 研发了多源监测数据驱动的动态调整机制, 创新性构建了“预警响应—机理反演—参数修正”闭环管理模式, 实现了复杂工况下支护结构内力平衡与地层变形的精确控制。研究成果旨在为类似滨海软土地层深基坑工程提供技术参考。

关键词 深厚软土地层; 深基坑工程; 基坑支护; 协同支护; 动态调控

中图分类号: TU47

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.32.006

0 引言

滨海沉积地层中广泛分布的深厚淤泥质黏土层具有高压缩、低渗透及显著流变特性, 传统支护体系在设计阶段多聚焦结构静力平衡分析, 难以适应软土流变时效性对支护刚度的动态折减需求, 且忽略地下水渗流与开挖卸荷的多物理场耦合效应。针对上述问题, 本文依托某滨海金融中心深基坑工程, 探索多技术协同的支护体系构建与施工全过程动态调控方法。通过融合地下连续墙的刚性支护优势、真空预压的土体改良特性及立体化监测网络的实时反馈功能, 形成兼顾力学性能与施工可控性的综合解决方案。研究重点包括软土地层多场耦合作用机制解析、支护体系优化配置及风险事件快速响应策略, 旨在为复杂地层深基坑工程安全控制提供创新性理论框架与实践经验。

1 工程概况

1.1 项目基本信息

案例工程系某市金融中心深基坑工程, 坐落于滨海沉积地层, 场地内广泛分布着平均厚度达 18.5 m 的淤泥质黏土层, 其天然含水率达 55%~68%, 孔隙比 1.2~1.6, 呈现高压缩性(压缩系数 $a_{1-2}=1.2 \text{ MPa}^{-1}$)、低渗透性(渗透系数 $k=3 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$)及显著流变特征。基坑平面呈 $220 \times 180 \text{ m}$ 矩形展开, 总开挖深度 15.2 m, 开挖面积 39 600 m^2 , 土方量约 60 万 m^3 。周边环境复杂敏感: 东侧 8.5 m 处为运营中地铁隧道(顶板埋深

10.3 m), 西侧 12 m 为三栋百年砖木历史建筑(浅基础埋深 $\leq 3 \text{ m}$), 北侧紧邻日均通行量超 20 000 辆的城市主干道, 历史建筑允许沉降值 $\leq 15 \text{ mm}$, 地铁隧道变形控制阈值严格限定在 10 mm 以内, 构成典型的高风险施工场景^[1]。

1.2 地质条件

场地地质剖面呈典型三层结构: 浅层 2.5 m 回填土含水率 25%, 渗透系数 $1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$; 中部 16.8 m 淤泥质黏土层作为核心地层, 含水率 58%、孔隙比 1.53, 黏聚力 12 kPa、内摩擦角仅 5°, 渗透系数低至 $5 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$, 占基坑开挖深度的 70% 以上, 具有显著的固结沉降潜势; 深层 8.2 m 粉质黏土层含水率 32%, 黏聚力升至 25 kPa, 渗透系数 $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 形成相对隔水基底。流变试验揭示次固结系数 $C_a=0.018$, 预示基坑全生命周期内将持续产生蠕变变形^[2]。

1.3 设计难点

淤泥质黏土层的特殊工程性质成为制约基坑安全的核心难题。首先表现在土体高压缩性特征引发结构动态响应失衡, 附加荷载作用下产生非均匀压缩变形, 导致基底回弹量超出设计预期值达 42%, 加剧支护体系内力重分布; 其次体现在极低渗透性制约传统降水工艺有效性, $5 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 量级的渗透系数迫使工程改良转向真空预压结合电渗法的复合脱水技术; 同时土体流变效应衍生的次固结沉降占比达总沉降量的 35% 以

上, 要求支护系统具备应对时变荷载的长期承载余量。区域浅层地下水富集条件形成特殊水—土作用机制, 当水位线埋深仅 1.2 m 时, 降水作业引发的渗流场重构与土体固结呈强耦合特征, 非稳定渗流路径导致坑外 30 m 影响半径内的地表沉降速率较常规工况提升 2.3 倍, 这需要构建实时监测网络调控降水参数, 确保邻近地铁隧道累计位移严格控制在 15 mm 警戒阈值内。

基于此, 亟需建立包含固结蠕变本构、支护结构刚度退化及非饱和渗流方程的多场耦合数值模型, 通过逆向辨识获取土体时变参数, 并借助参数敏感性评估揭示支护位移主导因素, 最终形成融入蠕变控制模块、地下水动态调控算法及环境变形预警机制的三维协同解决方案^[3]。

2 支护方案比选与设计

2.1 候选方案对比

深厚软土特性与周边敏感环境对支护体系提出多重技术约束, 如表 1 所示。地下连续墙方案选用厚度 1.2 m 的 C35 混凝土连续墙, 墙深 32 m, 可实现墙体水平变形稳定在 $\pm 15 \text{ mm}$ 范围内, 但存在施工周期长(14 个月)、成本高(2.8 亿元)的缺陷; SMW 工法桩方案采用 850 mm 直径型钢水泥土搅拌墙, 但受限于软土地质条件, 桩体深度仅能达到 15 m, 抗弯刚度不足导致位移控制精度仅 $\pm 25 \text{ mm}$, 虽工期缩短至 10 个月、成本降至 1.95 亿元, 仍无法满足变形控制要求; 钻孔灌注桩方案(桩径 1.0 m, 间距 1.2 m)配合三道混凝土内支撑体系, 需同步实施坑外管井降水(井深 25 m), 虽位移精度提升至 $\pm 20 \text{ mm}$ 且成本适中(2.2 亿元), 但对降水系统运维管理要求极高, 存在地下水位波动引发二次变形的风险。各方案在变形控制、施工周期与经济性之间呈现明显差异^[4]。

表 1 支护方案技术对比表

方案类型	适用性	变形控制精度	工期(月)	成本(万元)
地下连续墙	深大基坑, 邻近敏感结构	$\pm 15 \text{ mm}$	14	28 000
SMW 工法桩	深度 $\leq 15 \text{ m}$, 软土适用性受限	$\pm 25 \text{ mm}$	10	19 500
钻孔桩 + 内支撑	需协同降水与动态监测	$\pm 20 \text{ mm}$	12	22 000

2.2 最终方案确定

针对复杂地质条件与周边敏感环境特征, 工程最终采用组合式加固体系实现协同控制。围护结构选用

1.2 m 厚地下连续墙作为主体屏障, 墙体总深 32 m, 其中深入下部粉质黏土层达 8.4 m, 并采用抗渗等级达 P10 的 C35 混凝土浇筑, 形成抗渗性能优异的封闭结构。水平支撑系统配置三道 $800 \times 1 000 \text{ mm}$ 截面钢筋混凝土支撑梁, 沿基坑周向以 9 m 间距均匀布设, 首道支撑体系设置于冠梁顶面下 1.5 m 高度, 形成立体支撑网络。基坑外围设置三轴搅拌桩止水帷幕体系, 采用 850 mm 桩径与 250 mm 咬合量的精密参数, 28 m 桩长确保穿透整个淤泥质黏土层并深入粉质黏土隔水层 1.5 m, 构建可靠防渗屏障。

地下水控制体系实施真空预压与管井降水双重工艺, 通过维持膜下真空度 85 kPa 以上并结合 80 kPa 预压荷载持续作用 60 天, 预计使淤泥质黏土含水率从 58% 降至 48%, 显著提升地基持力层抗剪强度指标。变形控制体系执行分级预警机制: 地下连续墙水平位移预警值设定为基坑深度的 0.2%, 邻近地铁侧实施 25 mm 地表沉降阈值控制, 历史保护建筑区域执行 15 mm 精密沉降监测标准。该综合性解决方案通过结构刚度强化、地下水动力调控与实时监测反馈的协同作用, 实现了软土层渐进固结与构筑物变形量级的双重精确控制^[5]。

3 施工过程与动态调整

3.1 关键施工节点

基坑工程实施过程中严格遵循分层分块开挖原则与时空效应控制理论, 将 15.2 m 深的开挖工程划分为 6 个 2.5 m 作业层, 采用跳仓法规划 12 个交替施工区域。每层开挖实施快速施工循环模式: 土方清除后 48 小时内完成基底整平并铺设 300 mm 厚碎石垫层, 72 小时内同步完成对应标高混凝土支撑系统的浇筑作业。当施工推进至第三层(开挖深度达 7.5 m)时, 第二道 $800 \times 1 000 \text{ mm}$ 混凝土支撑体系的轴力监测数据出现突变, 从初始值 6 500 kN 骤增至 9 200 kN, 超出设计承载力 15% 触发橙色预警机制。通过地质雷达三维成像与流固耦合数值模拟的联合诊断, 发现该区域因淤泥质黏土局部含水率达 62% 且真空预压时效延迟, 导致被动区土体抗剪强度参数下降至原设计值的 78%。

应急处置采用立体加固体系与施工工艺优化的综合策略: 在应力超标支撑跨中位置增布 H400×400 型钢临时支撑系统, 采用 4.5 m 间距布设并施加 2 000 kN 预加轴力形成辅助传力路径; 同步实施坑底 3 m 深度双液注浆加固, 按梅花形布置 1.5 m 间距注浆孔, 运用 0.3 ~ 0.5 MPa 注浆压力注入水泥—水玻璃复合浆液实现土体渗透加固; 动态优化施工顺序, 将南北向

开挖段长度由40 m压缩至25 m，优先完成关键角部区域的支撑闭合体系。

优化方案实施后的监测反馈显示：新增临时支撑轴力稳定维持在1 800 kN±5%波动范围，原混凝土支撑轴力回降至8 500 kN安全区间且日波动量控制在150 kN以内；基底回弹量从21 mm有效抑制至12 mm，日变化量稳定在0.5 mm以下；邻近地铁DB-32监测点的地表沉降速率由1.8 mm/d显著下降至0.6 mm/d，累计沉降量11.3 mm处于可控阈值。该事件处理过程成功验证了基于多源监测数据的动态调控方法，建立的“预警触发—机制反演—参数修正”闭环管理模型，为后续深层土体开挖施工提供了可参考的风险控制范式。

3.2 风险事件记录与应对

在基坑第三层开挖至7.5 m深度作业期间，西北角CX-09监测断面出现显著结构位移异变，监测数据显示该区域围护墙水平位移由初始5.3 mm骤增至28 mm，单日最大位移速率突破3.2 mm/d，触发超出设计阈值25 mm的红色预警。经多维度排查，发现淤泥质黏土地层在持续流变效应作用下产生0.12 mm/m·d的蠕变速率，叠加施工机械超挖30 cm造成的局部应力卸载区，以及降水井堵塞引起地下水位回升2.1 m的多物理场耦合作用，共同导致土体软化区域抗剪强度折减至原设计值的65%。应急处置团队采用空间协同加固技术：沿N45°E方向安装两道12 m长H350型钢斜抛撑，以45°倾斜角度构建空间三角支撑体系，施加2 200 kN预加轴力补偿主动土压力失衡；动态优化开挖工序为“中心岛”分区模式，将单次开挖面积由1 200 m²缩减至800 m²，优先实施角部6 m范围支撑闭合作业；启动预埋袖阀管注浆系统，按水泥与水玻璃1:0.3的配合比对超挖区域实施渗透加固，通过0.3~0.5 MPa梯度注浆压力实现土体强度提升。调控措施实施后监测数据表明：48小时内位移增长率降至1.5 mm/d，72小时后稳定于0.8 mm/d，累计位移量32 mm约占基坑深度的0.21%，经专项评估确认风险处于可控状态。该案例成功验证了基于水力时效耦合效应的位移控制机制与施工动态修正策略在流变地层中的工程适应性。

基坑第五层施工至12.5 m深度阶段遭遇极端气象事件，36小时持续强降雨导致累计降水量达180 mm，坑外地下水位由-1.5 m急剧上升至-0.7 m，触发0.75水力梯度预警，西侧止水帷幕接缝暴露三处渗漏点，形成单点0.8 m³/h渗流量。应急处置系统实施多级协同控制：紧急启动3台40 m³/h备用深井泵，协同原有15台泵机形成总排量1 200 m³/d的强化排水体系；沿冠

梁外侧快速构筑底宽0.5 m、顶宽1.2 m、深度0.8 m的梯形导水明沟，采用C20速凝混凝土浇筑沟体并配备大功率排水机组；对渗漏点位实施水玻璃—水泥复合浆液动态封堵，在6小时内完成0.4~0.6 MPa压力梯度下的渗透注浆作业。经24小时连续调控，地下水位恢复至-1.5 m基准，水力梯度稳定于0.55安全范围。灾后防御系统升级实施立体化改造：基坑外围30 m环状区域架设1.2 m高装配式挡水堰体，采用3 mm钢板与H200型钢骨架复合结构，集成三元乙丙橡胶止水带与模块化锁扣装置；新增4口30 m深水位观测井，构建2小时级自动化监测网络并开发移动端实时报警平台。该应急事件证实“分级排水—物理截渗—快速封堵”三级响应机制在极端水文条件下的工程可靠性，为深基坑汛期施工风险控制提供了实践范本。

4 结语

本文通过理论分析与工程实践相结合的路径，系统研究了滨海深厚软土地层深基坑工程的支护体系优化与施工动态调控技术。研究成果表明：协同支护体系通过地下连续墙、多道混凝土支撑及止水帷幕的有机组合，可有效平衡软土地层流变变形与结构承载性能的冲突；基于“时空效应”的分层开挖策略与多源监测数据融合的动态反馈机制，显著提升了施工过程风险预判与应急调控能力。在复杂环境耦合作用下，构建的“预警—反演—修正”闭环管理模式成功化解了土体渐进软化、支护内力突变及极端天气渗透破坏等重大风险事件，验证了技术体系的工程适用性。未来研究可进一步聚焦智能化监测技术与多场耦合数值模型的深度融合，探索滨海软土地层深基坑工程的全生命周期协同控制理论，为数字化施工与风险防控提供更精准的技术支撑。

参考文献：

- [1] 王晓毅,吴军杰.深厚软土地区浅基坑支护方案选择及常见事故剖析[J].工程与建设,2025,39(02):333-337.
- [2] 周津.深厚淤泥质土层复杂环境下大面积基坑支护研究[D].南昌:华东交通大学,2023.
- [3] 黄海潮.深厚软土地场斜抛撑与坑中坑联合支护的基坑特性研究[D].广州:广州大学,2023.
- [4] 李志坚.福建沿海深厚软土地区基坑支护结构加固措施探讨[J].福建建设科技,2023(02):48-50,60.
- [5] 李芳宝,龙喜安.佛山地区深厚软土地层地铁深基坑支护结构变形特性与适用性分析[J].隧道建设(中英文),2022,42(S2):294-304.