

# 复合土钉墙在基坑支护中的优化设计与应用

张 永

中国市政工程中南设计研究总院有限公司 湖北 武汉 430000

**摘 要:** 复合土钉墙通过土钉、预应力锚杆、微型桩、止水帷幕及喷射混凝土面层的协同作用,显著提升了基坑支护的承载能力和变形控制水平。针对当前突出的问题,从支护参数优化、施工工序管控、止水体系强化、动态监测预警四个维度提出优化策略。采用精细化数值计算与工况模拟相结合的优化方法,合理配置土钉长度与锚杆预应力,建立分层开挖与支护协同施工机制,完善信息化动态监测体系,可有效提升复合土钉墙的支护效果和经济性,实现基坑工程安全与经济双向平衡。

**关键词:** 复合土钉墙; 基坑支护; 优化设计; 预应力锚杆; 止水帷幕

引言: 随着城市建设用地的日益紧张,基坑工程呈现出深大化、复杂化的发展趋势,对支护结构的安全性和变形控制能力提出了更高要求。复合土钉墙作为一种经济有效的基坑支护形式,兼具土钉墙的柔性特点和锚杆支护的主动受力优势,在软土地区、深基坑及周边环境敏感区域得到广泛应用。本文从优化设计角度出发,系统探讨复合土钉墙的支护参数确定、施工工序优化、止水体系强化及动态监测预警方法,为基坑支护设计施工提供参考。

## 1 复合土钉墙支护结构基础概述

### 1.1 复合土钉墙核心定义与支护机理

复合土钉墙是在传统纯土钉墙基础上,搭配超前支护微型桩、深层搅拌桩止水帷幕、预应力锚索及喷射混凝土面层组合形成的复合型基坑支护结构,属于柔性 with 刚性相结合的岩土支护体系。区别于传统单一土钉仅依靠土钉土体摩擦力维持边坡稳定的受力模式,复合土钉墙构建多结构协同承载、分层受力、联合止水、分级控变的综合防护体系,各组成部分各司其职、相互协同,共同抵御基坑侧壁土压力、水压力及地面附加荷载。其中超前微型桩承担土体超前加固和防范浅层坍塌的作用;止水帷幕阻隔地下水渗流,规避管涌等隐患;土钉及预应力锚杆依托锚固摩擦力约束土体侧向位移;喷射混凝土面层封闭表层土体,均匀传递侧壁土压力。整体支护体系实现超前加固、止水防渗、锚固支护、表层防护一体化。

### 1.2 复合土钉墙主要常见组合类型及适用工况

结合基坑开挖深度、地下水水位及周边环境保护等级,复合土钉墙形成多种成熟组合支护形式。一是微型桩加普通土钉墙复合结构,适用于开挖深度五至八米、地下水位较低、周边保护要求一般的常规基坑,微型桩

防范开挖塌孔,土钉承担主体支护受力,结构简单、施工快捷。二是搅拌桩止水帷幕加土钉墙复合结构,多用于地下水位偏高、砂层发育的基坑工程,止水帷幕解决渗水隐患,兼顾止水与稳定双重需求。三是微型桩加止水帷幕加预应力锚杆复合型结构,适配开挖深度八至十二米、紧邻老旧建筑物、变形控制要求严苛的深基坑,预应力锚杆严控侧壁深层位移,整体刚度大、变形可控性强。各类复合支护结构需结合工程实际差异化选型组合<sup>[1]</sup>。

### 1.3 复合土钉墙支护相较于传统支护的应用优势

相较于传统排桩支护、地下连续墙等支护形式,复合土钉墙综合应用优势突出。一是工程造价经济可控,无需大型钻孔设备及大量钢筋混凝土材料,可节约建设成本百分之二十五左右。二是施工工序简便高效,施工设备体积小、场地占用少,分层开挖分层支护同步推进,可有效缩短工期百分之十至百分之十五。三是结构适配性灵活多样,可根据基坑深度、地质条件随时调整土钉长度、间距、锚杆预应力及帷幕参数,适配各类复杂地质环境。四是变形控制效果良好,通过预应力锚杆与微型桩协同作用,有效弥补单一土钉墙刚度不足缺陷,精准控制基坑侧壁沉降及位移。五是后期拆除便捷、环保性强,支护结构后期破除施工简单,建筑垃圾产生量少,符合绿色施工及环保管控要求。

## 2 复合土钉墙常规设计与施工现存主要问题

### 2.1 支护结构参数设计取值经验化,配比缺乏科学优化

当前多数复合土钉墙支护设计缺乏精细化数值计算与工况模拟支撑,参数取值过度依赖设计人员过往经验,结构参数配比不合理问题普遍存在。部分设计人员未结合基坑实际土层力学参数、地下水位埋深、周边地

面超载情况精准核算土压力及支护受力,土钉长度、间距、钻孔直径、锚杆预应力等核心参数照搬同类工程模板,未结合本项目地质及环境差异化调整。部分浅基坑支护参数设计偏大,土钉布设过密、长度超标,造成施工材料浪费、造价无谓增加;部分深基坑及临近敏感建筑物基坑支护参数偏小,土钉锚固力不足、锚杆预应力偏低、微型桩布设稀疏,支护结构整体刚度不达标,埋下边坡滑移、位移超标安全隐患。同时各类支护结构协同配比不合理,止水帷幕与土钉支护衔接设计脱节、微型桩与锚杆受力分配不均衡,单一结构受力过载、整体协同受力效能不足,复合支护结构整体优势难以充分发挥,无法实现安全与经济双向平衡<sup>[2]</sup>。

## 2.2 开挖施工工序不规范,分层开挖与支护时序管控混乱

复合土钉墙核心施工原则为分层开挖、分层支护、随挖随支、严禁超挖,但施工现场普遍存在开挖工序不规范、支护施工滞后、时序管控不严等突出问题,直接加剧基坑变形风险。部分施工单位为追赶施工进度,违规一次性超深度开挖、跨层开挖,单次开挖深度远超规范要求的一点五至二米标准,土体应力瞬间快速释放,基坑侧壁卸荷变形急剧增大,远超支护结构承载预判数值。同时开挖完成后支护施工跟进不及时,土体裸露时间过长,远超四十八小时最佳支护窗口期,土体蠕变变形持续发展,基坑侧壁沉降及侧向位移大幅增加。部分施工现场土钉钻孔、注浆、喷射混凝土施工工序随意穿插,注浆饱满度不足、面层喷射厚度不达标、锚杆张拉锁定时机把控不准,过早张拉易造成预应力损失,过迟张拉无法有效约束土体变形。分层开挖与支护时序脱节、工序衔接不畅,直接导致支护结构成型质量差、受力性能打折,基坑整体稳定性难以保障。

## 2.3 止水防渗体系设计施工薄弱,水文风险防控不到位

地下水管控是复合土钉墙基坑支护施工的关键环节,水文处理不当极易诱发侧壁渗水、管涌、流沙及边坡失稳坍塌事故,但当前多数工程止水防渗体系设计施工重视程度不足,成为支护体系薄弱短板。部分地下水位较高、砂层发育的基坑工程,止水帷幕桩径偏小、桩间搭接长度不足、成桩深度不够,桩体施工垂直度偏差大,桩间搭接缝隙渗漏隐患多,止水帷幕整体闭合性差,无法有效阻隔地下水渗流。帷幕施工注浆配比不合理、搅拌不均匀、养护时间不足,桩体成型强度低、抗渗性能不达标,长期水压力作用下易出现桩体破损、渗漏通道扩大等问题。同时基坑内部降水、疏干井布设不

合理,降水深度不足、降水速率把控不当,过度降水引发周边地面不均匀沉降,降水不足导致基坑开挖作业面积积水,影响土钉注浆及支护施工质量。止水与降水协同设计缺失,水文风险防控体系不完善,水压力长期侵蚀支护结构,大幅降低复合土钉墙整体支护稳定性与使用寿命。

## 2.4 施工质​​量管控与现场动态监测体系不完善

复合土钉墙施工现场质量精细化管控缺失、后期动态监测运维不到位,是基坑支护运行阶段故障频发、变形超标失控的重要管理类问题。施工过程中监理及建设单位质量监管履职不严,土钉钻孔清孔不彻底、注浆浆液饱满度不足、钢筋锚固安装不规范、喷射混凝土厚度及强度不达标等隐蔽工程质量问题频发,隐蔽工序验收流于形式,施工遗留质量隐患较多。支护结构施工完成后,基坑常态化动态监测体系不完善,监测点位布设稀疏、监测频次不足、监测数据记录不规范,基坑侧壁位移、周边地面沉降、建构筑物倾斜、地下水位变化等核心指标未能实时跟踪监测。监测数据未及时对比分析、异常数据未及时预警处置,基坑变形发展趋势无法提前预判,小隐患逐步演变为边坡失稳大风险<sup>[3]</sup>。同时施工完成后无常态化支护养护机制,混凝土面层养护不到位、锚杆预应力未定期复检补张拉,支护结构长期运行性能逐年衰减,难以保障基坑全周期安全稳定。

## 3 复合土钉墙支护结构科学化优化设计核心措施

### 3.1 精准优化支护结构核心参数,实现安全与经济双向平衡

摒弃传统经验化参数设计模式,依托修正深基坑计算软件及Plaxis数值模拟软件,结合工程地质勘察报告、基坑开挖深度、周边荷载条件开展精准受力核算与参数优化设计。精准核算基坑侧壁主动土压力、被动土压力及地下水压力,以基坑整体抗滑移、抗倾覆、抗隆起安全系数达标为底线,兼顾施工经济性优化土钉长度、布设间距、钻孔直径及锚杆张拉预应力等核心参数。合理控制土钉竖向及水平布设间距,间距不宜过大或过小,保障土体与土钉协同受力均匀;优化土钉钻孔倾角控制在五度至二十度之间,提升土钉抗拔承载力与排水泄压效果。针对深基坑及敏感地段,适度加密预应力锚杆布设、提升锚杆张拉预应力,强化深层变形管控;常规浅基坑合理缩减冗余参数,严控材料浪费。通过正交试验对比多组参数组合受力及造价指标,筛选安全性达标、造价最优的参数配比方案,杜绝设计冗余过大或支护强度不足问题,实现复合支护结构受力均衡、安全可靠、经济合理。

### 3.2 优化分层开挖与支护施工工况, 严控土体卸荷变形扰动

严格遵循分层、分段、跳槽、对称开挖原则, 优化基坑开挖及支护施工工况时序, 从施工流程层面严控土体卸荷变形。规范控制单次开挖分层厚度, 严格按照一点五至二米标准分层开挖, 严禁超挖、深挖、跨层开挖, 减缓土体应力释放速率, 规避瞬时卸荷引发的基坑突变变形。合理把控开挖与支护衔接时序, 开挖作业完成后四十八小时内必须完成土钉钻孔、注浆、面层喷射及锚杆张拉锁定作业, 缩短土体裸露时间, 抑制土体蠕变变形持续发展。优化预应力锚杆张拉锁定施工时机, 结合数值模拟受力变化规律, 在土体初期变形稳定后及时张拉锁定, 避免过早张拉预应力损失、过迟张拉变形失控。规范跳槽开挖施工模式, 分段分区交替开挖支护, 避免大面积连续开挖造成土体整体扰动, 保障基坑侧壁受力稳定。同步细化施工技术交底, 规范一线施工人员操作流程, 严控各工序施工质量, 确保开挖、支护、锚固、防护全流程标准化推进, 从施工源头降低基坑变形风险。

### 3.3 强化止水帷幕与降水系统优化, 筑牢水文安全防控防线

聚焦地下水防控核心短板, 优化止水帷幕设计及施工工艺, 配套完善基坑降水疏干系统, 构建止水与降水双重水文防护体系。根据地下水位及砂层分布情况, 合理确定止水帷幕桩径、桩间搭接长度及成桩深度, 保障帷幕全封闭闭合施工, 彻底阻断地下水渗流通道; 规范搅拌桩施工工艺, 严控注浆配比、搅拌均匀度及成桩养护时间, 确保帷幕桩体强度、抗渗性能达标, 杜绝桩间渗漏隐患。优化基坑内部疏干井、观测井布置密度及降水深度, 分级分段精准降水, 严控降水速率, 既保障基坑开挖干地施工条件, 又避免过度降水引发周边地面不均匀沉降。建立地下水动态观测机制, 实时监测水位变化及帷幕渗漏情况, 发现渗漏隐患及时采取注浆封堵加固措施。强化止水帷幕与土钉支护结构衔接设计, 确保止水防护与受力支护协同配合, 有效规避水文地质风险对基坑支护稳定性的不利影响, 筑牢基坑水文安全运行防线<sup>[4]</sup>。

### 3.4 健全施工质量管理与动态监测预警长效管理机制 构建复合土钉墙施工全过程质量管控与基坑动态监

测预警一体化长效管理体系, 以精细化管理保障支护优化设计方案落地见效。强化施工全过程三方质量管控, 严格落实隐蔽工程旁站监理及专项验收制度, 对土钉钻孔、注浆、锚杆张拉、帷幕成桩、面层喷射等关键隐蔽工序, 施工完成后必须专项验收合格方可进入下一工序, 及时整改各类施工质量隐患。完善基坑现场动态监测方案, 科学布设基坑侧壁位移点、周边沉降观测点、建筑物倾斜监测点及水位监测点, 合理加密敏感区域监测点位, 常态化开展定期监测, 汛期及开挖关键阶段加密监测频次。安排专人做好监测数据记录、整理、对比分析工作, 建立监测数据异常预警机制, 一旦位移、沉降指标超出预警阈值, 立即启动应急处置预案, 采取补打锚杆、加固支护、放缓开挖等措施及时管控风险。同步建立支护结构后期养护复检机制, 定期复检锚杆预应力、混凝土面层完好情况, 及时开展养护修复, 保障支护结构长期稳定运行。

#### 结束语

复合土钉墙是基坑支护工程中经济有效的技术形式, 其优化设计应立足于各构件的协同工作机制和全流程质量管控。本文系统分析了参数取值经验化、施工工序不规范、止水防渗薄弱、监测体系不完善等突出问题, 提出了支护参数精准优化、施工工况优化、止水体系强化、动态监测预警健全四项核心措施。研究表明, 采用精细化数值计算与工况模拟相结合的优化方法, 合理配置土钉长度与锚杆预应力, 建立分层开挖与支护协同施工机制, 完善信息化动态监测预警体系, 可有效提升复合土钉墙的支护效果和经济性。

#### 参考文献

- [1]王宝玉.复合土钉墙在基坑支护工程中的应用[J].工程技术研究, 2024, 9(9): 108-110.
- [2]任睿祺,张旭辉,李振杰,等.考虑地质影响的深基坑复合土钉墙最优支护参数选择技术[J].粉煤灰综合利用,2024,38(1):82-87.
- [3]文昊.复合土钉墙支护模型及在深大基坑工程中的应用[J].工程机械与维修, 2026(1):44-46.
- [4]范章强.复合土钉墙支护在高层建筑深基坑施工中的技术应用与工艺研究[J].建筑机械,2025(7):284-286,290.