

岩土工程中深基坑土钉墙施工技术的应用与优化

姚志诚

山西冶金岩土工程勘察有限公司 山西 太原 030000

摘要: 深基坑支护是岩土工程安全管控的核心,土钉墙技术因适配性强、经济性突出被广泛应用。本文系统分析该技术通过土钉与岩土体协同受力实现边坡稳定的原理,及经济实用、干扰小等特征。结合城市建筑、道路桥梁、地下工程三类场景,明确各场景下支护参数适配、施工管控等应用要点。从参数动态优化、工艺升级、材料创新及智能管控四维度,提出技术优化路径。研究表明,精准化与智能化改进可显著提升支护质量,为复杂地质条件下深基坑工程提供可靠技术支撑。

关键词: 岩土工程;深基坑;土钉墙施工技术;应用;优化与创新

引言: 土钉墙施工技术凭借施工便捷、成本可控等优势,成为深基坑支护的主流选择,但在软土、砂土等复杂地层中,仍存在参数匹配不准、支护稳定性不足等问题。山西地区岩土类型多样,深基坑工程安全需求迫切。基于此,本文结合工程实践,解析土钉墙技术原理与特征,探讨其在不同场景的应用要点及优化方向,为区域岩土工程施工提供理论与实践参考。

1 深基坑土钉墙施工技术的原理与技术特征

1.1 工作原理

深基坑土钉墙施工技术的核心原理是通过土钉与周边岩土体的协同作用,将基坑侧壁的土体荷载传递并分散,进而提升边坡的整体稳定性。土钉作为关键受力构件,通过钻孔植入岩土体后,借助注浆工艺与土体紧密结合,形成具有一定刚度和抗剪强度的复合土体结构。在基坑开挖过程中,土体因卸荷易产生侧向位移,此时土钉会通过界面摩擦阻力和黏结力约束土体变形,同时土钉自身的抗拉强度可抵消部分侧向土压力。土钉墙的面层结构(如喷射混凝土层)能有效封闭土体表面,减少雨水渗透和风化对土体性质的影响,与土钉共同构成完整的支护体系,实现基坑侧壁的稳定控制。

1.2 主要技术特征

深基坑土钉墙施工技术具有以下技术特征,(1)经济性与实用性突出,其施工材料来源广泛,土钉、钢筋网、喷射混凝土等成本相对较低,且施工工序简便,无需大型重型设备,能有效缩短工期,降低工程总成本。(2)支护体系灵活性强,可根据基坑开挖深度、岩土体分布特征及周边环境要求,灵活调整土钉的长度、间距、倾角等参数,适配不同工程场景的支护需求。(3)施工对周边环境影响小,施工过程中产生的振动、噪音较低,不会对邻近建筑物、地下管线等设施造成明显干扰,尤其适

用于城市密集建筑群中的深基坑工程。(4)土钉墙与土体的结合性好,能随土体变形发挥支护作用,具有良好的变形协调性,可有效控制基坑侧壁的位移量,保障施工安全^[1]。

2 岩土工程中深基坑土钉墙施工的关键工序与技术要点

深基坑土钉墙施工是系统性工程,要严格把控各工序的技术标准,确保支护体系的稳定性与安全性。其关键工序围绕“开挖-加固-防护”的核心逻辑展开,各环节技术要点紧密衔接,共同保障施工质量。(1)基坑分层开挖与坡面修整。基坑开挖是土钉墙施工的前置工序,需遵循“分层开挖、分层支护、限时完成”的原则,开挖深度应与土钉竖向间距匹配,通常每层开挖深度控制在1.5-2.0m,避免单次开挖过深导致土体失稳。开挖过程中需采用机械开挖与人工修整相结合的方式,机械开挖至距设计坡面10-15cm处停止,由人工进行坡面修整,确保坡面平整度误差不超过5cm,坡度符合设计要求。开挖后的坡面需及时进行封闭处理,一般在修整完成后24小时内开展后续工序,防止坡面土体风化或雨水冲刷引发坍塌。(2)土钉钻孔与安装作业。钻孔质量直接影响土钉与土体的结合效果,钻孔前需根据设计图纸准确定位孔位,标记土钉的间距、倾角等参数,倾角通常控制在5°-15°,以增强土钉的抗拔性能。钻孔设备需根据岩土条件选型,在黏性土中可采用螺旋钻,砂卵石层则需选用冲击钻,钻孔直径应比土钉直径大10-20mm,钻孔深度需超出土钉设计长度5-10cm,避免孔底残留虚土。土钉安装前需检查钢筋外观,清除锈蚀与油污,按设计要求焊接定位支架,确保土钉居中放置,安装时缓慢下放,防止扰动孔壁,若遇塌孔需及时采用套管跟进或注浆固壁处理。(3)注浆施工与质量控制。注浆是实现土钉与土

体协同受力的关键,注浆材料以水泥浆为主,水泥选用强度等级不低于42.5级的普通硅酸盐水泥,水灰比控制在0.4-0.5,可根据需求掺入适量早强剂或减水剂。注浆前需检查注浆管通畅性,将注浆管插入孔底5-10cm,采用压力注浆方式,注浆压力控制在0.2-0.4MPa,确保浆液从孔底向上充盈,直至浆液溢出孔口且无气泡冒出后停止,停止后需及时补浆1-2次,防止孔内出现空洞。注浆过程中需做好浆液试块,每批次制作3组标准试块,用于检测浆液抗压强度,确保其达到设计标准。(4)钢筋网铺设与喷射混凝土。钢筋网铺设需与坡面紧密贴合,采用直径6-8mm的钢筋,网格间距为150-200mm,钢筋搭接长度不小于30d(d为钢筋直径),搭接处采用绑扎或点焊固定。钢筋网与土钉需可靠连接,通过焊接钢筋连接器实现两者锚固,确保荷载有效传递。喷射混凝土前需清理坡面杂物,检查钢筋网固定情况,混凝土强度等级不低于C20,粗骨料最大粒径不超过15mm,喷射压力控制在0.1-0.2MPa,喷射顺序从下向上分段进行,每次喷射厚度为5-10cm,分2-3次完成,总厚度达到设计要求。喷射完成后及时进行养护,养护时间不少于7天,确保混凝土强度稳步增长,形成完整的支护面层^[2]。

3 深基坑土钉墙施工技术在岩土工程中的具体应用

3.1 在城市建筑工程基坑中的应用

城市建筑基坑多处于人口密集、管线交错区域,施工空间受限且对环境扰动控制严格,土钉墙技术凭借灵活适配性成为常用方案,应用中需重点关注参数适配与环境协调。(1)支护参数动态适配。针对城市常见的杂填土、粉质黏土等土层,施工前通过原位测试明确土体黏聚力、内摩擦角等指标,据此调整土钉核心参数。土钉直径选用 $\phi 20$ - $\phi 25$ 螺纹钢,间距控制在1.2-1.8m,竖向间距与基坑分层开挖深度匹配,通常为1.5-2.0m。钻孔深度需穿透表层软弱土层,锚固于下部密实土层中,锚固段长度不小于5m,确保支护体系承载稳定。(2)施工干扰控制措施。钻孔作业优先选用小型液压螺旋钻,减少施工振动对周边建筑物基础的影响,振动速度控制在2.5cm/s以内。对于临近地下管线的区域,采用人工洛阳铲进行浅层钻孔,精准定位管线位置后调整土钉孔位,避免管线破损。喷射混凝土作业时设置移动式隔音屏障,将施工噪音控制在70分贝以下,减少对周边居民生活的干扰。(3)坡面与地表防护处理。基坑坡面修整完成后,立即喷射5cm厚C20混凝土封闭层,防止土体风化或雨水冲刷。在土钉墙顶部设置50cm宽混凝土压顶,与坡面混凝土连成整体,压顶内配置双向 $\phi 8@200$ 钢筋网。地表沿基坑周边设置30cm高挡水坎和坡度3%的排水坡度,配合间

距5m的排水盲沟,有效疏导地表积水,避免雨水渗入基坑侧壁。

3.2 在道路与桥梁工程基坑中的应用

道路桥梁工程中的基坑多位于路基或边坡区域,岩土条件以砂土、砾石土为主,施工需兼顾支护效率与通行安全,土钉墙技术的快速施工特性在此类工程中优势显著。(1)砂土区域支护强化。针对砂土渗透性强、抗剪强度低的特点,采用“土钉+注浆加固”联合方案。注浆材料选用水泥-水玻璃双液浆,水灰比0.45,水泥与水玻璃体积比1:0.3,注浆压力提升至0.3-0.5MPa,确保浆液在砂土中快速扩散凝固,形成直径不小于30cm的固结体。土钉间距缩短至1.0-1.2m,采用 $\phi 25$ 螺纹钢并设置定位支架,保证土钉居中受力。(2)施工与通行协同安排。采用“分段开挖、分段支护”模式,每段施工长度控制在10-15m,开挖完成后4小时内完成土钉安装与第一层混凝土喷射,减少基坑暴露时间。临近行车道的基坑侧壁,在钢筋网外侧增设 $\phi 14@1000$ 的加强筋,喷射混凝土总厚度提升至15cm,增强面层抗冲击能力。施工区域设置标准化围挡,划分施工区与通行区,采用临时钢便桥保障车辆通行,避免施工影响交通秩序。(3)地下水控制措施。在基坑侧壁设置间距2-3m、孔径50mm的排水孔,插入外包土工布的透水管,透水管深入土体1m,外部与喷射混凝土面层平齐,将基坑侧壁渗水导出。基坑底部沿周边设置30cm \times 30cm的排水沟,每隔20m设置一座集水井,采用潜水泵及时排出积水,确保基坑内施工面干燥,避免砂土因浸泡导致强度降低。

3.3 在地下工程基坑中的应用

地下车库、地铁附属设施等地下工程基坑开挖深度大,岩土体受力复杂,且需考虑长期稳定性,土钉墙技术常与其他支护形式结合应用,提升整体支护效果。(1)复合支护体系构建。对于开挖深度超过10m的基坑,采用“土钉墙+预应力锚杆”复合支护,在基坑中下部设置一道预应力锚杆,锚杆间距3m,预应力值施加至设计值的70%,与土钉墙协同承担侧向土压力。土钉长度按上短下长设置,上部土钉长度6-8m,下部土钉长度10-12m,确保不同深度土体均得到有效锚固。(2)抗渗与防腐处理。喷射混凝土采用C25抗渗混凝土,添加高效减水剂和膨胀剂,抗渗等级不低于P6,确保面层具备良好的隔水性能。土钉加工前进行除锈处理,涂刷两道环氧煤沥青防腐涂料,外露部分采用聚乙烯防腐套管包裹,套管与土钉之间填充防腐砂浆,避免地下水侵蚀导致土钉锈蚀。(3)与主体结构衔接处理。在土钉墙施工时,按主体结构墙体位置预留钢筋接驳器,接驳器间距与主体结构钢筋间

距一致,伸出喷射混凝土面层15cm。基坑开挖至设计标高后,及时施工主体结构底板,通过底板与土钉墙的可靠连接,将支护体系的荷载传递至基础,形成完整的受力体系,为后续主体结构施工提供安全保障^[3]。

4 岩土工程中深基坑土钉墙施工技术的优化路径与创新方向

深基坑土钉墙施工技术的优化与创新要立足工程实际需求,聚焦参数精准化、工艺高效化、材料高性能化及管理智能化,通过多维度改进提升技术适用性与可靠性。(1)施工参数动态优化。依托岩土工程勘察数据与实时监测结果,构建参数动态调整体系。采用地质雷达与钻孔触探联合勘察,精准获取土体分层参数,结合有限元模拟软件,对土钉长度、间距、倾角等核心参数进行量化优化。针对软土地基,采用“上密下疏”的土钉布置方式,缩短上部土钉间距至1.0-1.2m,下部延伸至硬持力层,确保支护受力均衡。施工中通过位移监测数据反馈,实时微调注浆压力与混凝土喷射厚度,实现参数与实际工况的精准匹配。(2)施工工艺升级改进。对关键工序进行工艺革新,提升施工效率与质量。钻孔环节推广使用智能导向钻孔设备,配备实时倾角与深度监测系统,将钻孔偏差控制在 $\pm 2^\circ$ 以内。注浆工艺采用“二次高压注浆+真空辅助”技术,首次常压注浆后,通过真空抽除孔内空气,再进行0.5-0.8MPa高压补浆,减少浆液空洞率。喷射混凝土引入湿喷工艺,配备自动计量搅拌系统,提升混凝土和易性,将回弹率降至10%以下。(3)材料与结构创新。研发适配不同工况的高性能材料与复合结构。土钉采用防腐涂层与钢筋混凝土组合结构,外层包裹玻璃纤维增强复合材料,提升抗腐蚀性能与使用寿命。注浆材料推广使用超细水泥基浆液,掺入纳米硅灰改性剂,优化浆液流动性与黏结强度,在砂层中固结体

强度可提升30%以上。探索“土钉墙+微型桩”复合支护结构,微型桩间距2-3m,与土钉协同受力,增强复杂地质条件下的支护稳定性。(4)智能化管理与监测。构建全流程智能化管控体系,安装无线传感网络监测系统,实时采集土钉拉力、坡面位移、土体应力等数据,通过云平台进行数据分析与风险预警。采用BIM技术构建施工模型,模拟施工全过程,提前优化工序衔接。引入无人机航拍巡检,结合图像识别技术,自动识别坡面裂缝与混凝土缺陷,提升隐患排查效率与准确性^[4]。

结束语:深基坑土钉墙施工技术在岩土工程中具有不可替代的应用价值,其核心在于通过土钉与岩土体的协同作用实现安全支护。本文通过对技术原理、关键工序的解析,明确了不同工程场景下的应用要点,提出的参数优化、工艺升级等路径,为技术实践提供了具体方向。随着岩土工程复杂度提升,土钉墙技术需进一步向精准化、智能化发展。未来可加强新型材料研发与智能监测技术融合,完善复合支护体系设计,推动该技术在更复杂地质条件下实现安全、高效应用,助力岩土工程行业高质量发展。

参考文献:

- [1]杨峰峰.土钉墙支护技术在深基坑工程中的应用与效果分析[J].陶瓷,2025(2):168-171.
- [2]娄崇构.深基坑支护技术在岩土工程施工中的应用研究[J].现代工程科技,2025,4(6):57-60.
- [3]李卫华.深基坑土钉墙支护施工技术在建筑工程中的应用[J].中国厨卫,2025,24(5):233-235+238.
- [4]姜珊珊,王帅.岩土工程勘察中深基坑支护技术类型及应用研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(2):005-008.