

土木工程现场施工中边坡支护技术的实用要点分析

史政旗

中国华冶科工集团有限公司 天津 300270

摘要: 边坡支护是保障基坑与路堑稳定、防范坍塌事故的关键技术环节。随着工程建设规模扩大、施工环境日趋复杂,边坡支护的技术难度与风险管控要求持续提升。本文立足于现场施工实践,系统梳理了边坡失稳的主要模式与成因机理,分析了锚杆支护、土钉墙、桩锚体系、喷锚网等常用支护形式的技术特点与适用范围,从地质勘察、过程质量控制、变形监测、排水系统及季节性施工等维度总结了实用技术要点。边坡支护成效取决于地质认知准确性、方案适配性及过程控制精细化程度,应建立“勘察—设计—施工—监测”一体化的动态管控体系,为现场技术人员提供实践参考。

关键词: 边坡支护;深基坑;锚杆;土钉墙;施工技术

引言: 随着城镇化进程推进和基础设施建设规模扩大,深基坑开挖、高填方路堤、山体切坡等工程活动日益增多,边坡稳定性已成为施工安全管理的核心关切。边坡失稳具有突发性和灾难性,轻则延误工期,重则造成人员伤亡和重大财产损失。近年多起基坑坍塌事故反复警示:只有科学合理地选择并实施边坡支护方案,才能从源头防范安全风险。本文从边坡失稳机理出发,系统梳理常用支护形式的技术特点,提炼现场施工实用要点,旨在为一线工程技术人员提供系统的技术参考与操作指引。

1 边坡失稳的机理与影响因素

1.1 边坡失稳的主要模式

边坡失稳是指边坡岩土体在内外因素作用下沿某一滑动面产生整体或局部位移的现象。根据破坏形态和运动特征,可归纳为以下典型模式。圆弧滑动是最常见的破坏形式,主要发生在均质黏性土或松散堆积体边坡中。破坏面近似呈圆弧形,从坡脚切入、沿弧线延伸至坡顶。此类破坏通常由坡脚开挖卸荷、坡顶超载或地下水位上升引发,具有突发性强、滑动体量大的特点。平面滑动主要发生在层状岩体或具明显软弱结构面的边坡中,滑移面沿岩层层面、节理面等发育。当结构面倾向与坡面一致且倾角小于坡角时,滑动风险显著增加。楔形体滑动发生于多组结构面切割形成的块状岩体中,结构面组合形成空间楔形体,沿交线方向滑出,识别和治理难度较大,需准确掌握结构面的空间组合关系。坍塌与剥落表现为坡面表层岩土体在风化、雨水冲刷或冻融

循环作用下逐层剥落或局部坍塌,单次规模较小,但持续发展将削弱坡体整体稳定性,是长期服役阶段的主要隐患。现场技术人员需根据地质条件和变形特征准确识别失稳模式,这是合理选择支护方案的基本前提^[1]。

1.2 影响边坡稳定性的关键因素

边坡稳定性受多重因素耦合控制,理解其相互作用机制是实施有效支护的前提。地质因素是最根本的控制条件,包括岩土体类型、岩层产状、结构面发育特征和构造破碎带分布等。软弱夹层、断层破碎带和节理密集带往往是边坡失稳的控制性界面,在勘察阶段需予以重点查明;水与施工因素同样至关重要,孔隙水压力降低有效应力、减小抗剪强度,渗流动水压力增加下滑推力。雨季因地下水位上升引发的边坡失稳事故占比极高,排水系统的设置和运行维护尤为重要。坡体几何形态与施工扰动直接影响稳定性——坡高越大、坡角越陡,稳定性越差。不合理的施工顺序(如先切坡后支护、一次开挖到位未及时支护)是导致施工期失稳的直接诱因;外部荷载与环境因素包括坡顶堆载、交通荷载、地震作用、降雨入渗和冻融循环等,往往具有随机性和季节性特征,增加了稳定性评估的复杂性。上述因素并非独立作用,施工中需综合判断其实际影响程度。

2 常用边坡支护技术及其适用条件

2.1 锚杆与锚索支护技术

锚杆支护是通过在坡体中钻孔并置入受拉杆件,将不稳定坡体与深层稳定岩土体联结,借助锚固力抵抗滑动推力的一种主动支护形式。锚杆按受力机制分为粘结

型锚杆（依靠锚固段与岩土体的粘结力提供锚固力）和机械型锚杆（依靠锚头机械咬合提供锚固力），前者应用更为广泛。锚索采用高强钢绞线束，锚固力大、锚固深度深，适用于高陡边坡或大型基坑的深层加固。施工流程包括钻孔、清孔、安装、注浆和张拉锁定五个环节，其中注浆饱满度是决定锚固质量的核心指标，注浆不密实将直接削弱锚固力并加速杆体锈蚀。锚杆的适用条件为：边坡岩土体具备提供足够锚固力的条件，锚固段应设置于稳定地层中，锚固力设计值根据稳定性计算确定。对于软弱土层或破碎岩体，需采用扩大头锚杆或二次注浆等技术措施提高锚固效果。关于锚索注浆质量控制等通用施工要求，与锚杆基本一致，可参照执行。

2.2 土钉墙支护技术

土钉墙是一种原位加固技术，通过在坡面成孔后置入土钉并喷射混凝土面层，形成以土钉为主要受力构件的复合加固体系。土钉与周围土体相互作用形成“土钉-土体”复合结构，显著改善原状土体的力学性能。土钉墙的受力机理不同于锚杆——土钉主要依靠与土体界面的粘结力传递拉力，其被动受力特征是在坡体产生微小变形后逐渐发挥作用，因此允许边坡产生一定量的可控变形以调动土钉抗力。土钉墙的优势在于工艺简单、设备轻便、施工速度快、造价低廉，适用于有一定自稳能力的黏性土、粉土和密实砂层中的浅基坑和路堑边坡，深度一般不超过 15m。局限性在于对软土、流砂层等软弱地层适应性较差，坡面位移控制能力有限，不能用于对变形有严格要求或紧邻重要管线的区域^[2]。关键控制要点包括成孔质量、土钉定位、注浆密实度和面层与土钉端部的连接构造，每环节均直接影响整体承载能力。

2.3 桩锚支护体系

桩锚支护体系由支护桩与锚索组合而成，是目前深基坑和高边坡工程中应用最广泛的支护形式之一。与单独使用锚杆不同，桩锚体系的核心优势在于支护桩承担主要的侧向土压力和水压力，锚索提供额外的拉结力，两者协同工作，有效控制坡体位移、减少桩身弯矩和变形。灌注桩适用于地质条件复杂、地下水丰富的深大基坑；型钢桩结合内支撑适用于工期紧迫、对变形控制要求较高的情况。技术关键在于桩的嵌固深度和锚索布置参数——嵌固深度不足易导致桩体倾覆，锚索锚固段必须设置于潜在滑动面以下的稳定地层中。桩顶设置冠梁将各桩连接为整体受力系统，增强空间协同能力。关于注浆质量控制等锚索本身的施工要求，与 2.1 节锚杆一致，不再赘述。该体系造价较高，适用于深度超过 15m 的深基坑或对变形控制有严格要求的工程。

2.4 喷锚网支护与复合支护体系

喷锚网支护是将喷射混凝土面层、钢筋网和锚杆三者组合应用的加固方式。施工工序为：坡面修整后铺设钢筋网，打入系统锚杆，喷射混凝土形成整体面层。喷射混凝土封闭坡面、防止风化剥落和局部坍塌；钢筋网增强面层抗裂性能；系统锚杆将面层与坡体深部联结。该技术施工速度快、适应性强，适用于临时性边坡和稳定性较好的永久边坡防护，但对深层滑动控制能力有限，不能用于存在明显软弱结构面或深层滑动风险的边坡。单一支护形式往往难以满足复杂条件，需采用复合支护体系。常见有效组合包括：土钉墙与预应力锚杆联合——土钉浅层加固、锚杆深层锁定，适用于深度 8~15m 的中等基坑；桩锚与喷锚网分层组合——上部放坡喷锚网防护、下部桩锚支护，适用于深度超过 15m 且场地受限的深基坑；分级放坡与支护结构组合——多级放坡减小单级坡高，每级结合相应支护，适用于高填方或山体切坡工程。复合体系能发挥各技术手段的协同效应，实现深部锚固、浅层加固和坡面防护的多层次防护。方案选择需综合地质条件、开挖深度、周边环境、工期和经济性等因素，通过技术经济比选确定最优组合。

3 边坡支护现场施工实用要点

3.1 地质勘察与设计参数的合理选取

地质勘察是边坡支护方案设计的根基，勘察成果的准确性和完整性直接决定了支护方案的科学性。施工准备阶段应复核勘察资料与现场实际情况的一致性，重点关注软弱夹层、地下水位、结构面产状等关键信息。当发现实际揭露的地质条件与勘察报告存在较大出入时，应及时通知设计方调整方案，避免“按图施工”导致安全隐患。设计参数合理选取是支护方案可靠性的保障，抗剪强度指标（黏聚力和内摩擦角）对稳定性计算结果影响显著，应综合室内试验、原位测试和工程类比等方法交叉验证。对于重要性等级较高的边坡工程，建议采用参数反分析方法——依据同类工程实测数据反算强度指标，使设计参数更贴近实际。地下水位设计水位应充分考虑雨季最高水位和施工期间可能产生的水位变化，排水系统设计能力应满足最不利工况要求^[3]。

3.2 施工过程质量控制要点

施工过程质量控制是保证支护结构发挥预期效能的关键。钻孔施工需严格控制孔位偏差（不宜超过 $\pm 50\text{mm}$ ）、孔径和孔深，成孔后及时清孔、避免孔壁坍塌。锚杆（索）安放应确保对中支架设置到位，杆体保护层厚度满足防腐要求；注浆应控制水灰比和注浆压

力,采用二次压力注浆提高饱满度和锚固力。土钉墙施工中,土钉与面层钢筋网的连接是形成整体受力的关键,连接件焊接长度和强度必须满足设计要求。喷射混凝土施工需控制配合比、喷射距离和角度,确保面层厚度均匀、强度达标,分层喷射时需掌握好层间间隔时间,防止出现“冷缝”影响整体性。桩锚体系中灌注桩的成孔质量、钢筋笼制作精度和水下混凝土灌注质量直接影响桩体承载能力,每道工序均需严格执行验收规范。所有隐蔽工程应留存完整的影像资料和检测数据,为质量追溯提供依据。

3.3 变形监测与动态反馈调整

变形监测是判断边坡安全状态、验证支护效果和指导动态施工的核心手段。监测方案应涵盖坡顶水平与竖向位移、深层水平位移(测斜)、锚杆(索)轴力、支护桩内力、地下水位及坡面裂缝观测等内容。监测点布设应形成空间控制网,重点部位加密布置,确保监测数据全面反映边坡实际变形状态。监测频率应根据施工进度和变形速率动态调整——开挖初期和雨季应加密频次,变形趋于稳定后可适当放宽。当监测数据出现异常(位移速率持续增大、锚杆轴力异常松弛或骤增)时,应立即启动预警机制,暂停危险区域作业、组织各方会商分析原因,必要时启动应急预案并调整支护方案。监测数据分析不应停留在数据报表层面,应结合地质条件和施工工况综合研判,及时发现潜在风险。实践证明,动态监测和及时的信息反馈是避免边坡失稳事故的关键保障。

3.4 排水系统设置与季节性施工应对

排水系统的科学设置是边坡支护工程成败的关键配套措施。坡顶应设置截水沟拦截地表径流,防止雨水冲刷坡面和渗入坡体;坡面应设置泄水孔或排水管,及时疏排坡体内积水;坡脚应设置排水沟或集水坑,确保积水及时排出。各类排水设施应在支护施工前优先完成或同步实施,避免因排水不畅导致坡体含水率升高、稳定性下降。季节性施工应对方面,雨季应密切关注天气预报,大雨前对已完成支护的坡面进行覆盖防护,雨后及时检查排水系统完好性和坡面变形情况。冬季施工需重视冻融循环对坡面稳定性的损害——土方开挖应避免在深层冻结状态下进行;锚杆注浆应采取防冻措施(掺加防冻剂、控制出机温度),确保浆体在低温下正常凝结;喷射混凝土应控制在正温条件下施工,必要时覆盖

保温养护。高温季节应做好喷射混凝土保湿养护,防止早期开裂影响面层质量。季节性因素对施工质量和安全的影响不容低估,需在施工组织设计中充分考虑^[4]。

3.5 应急支护与险情处置要点

地质条件的复杂性和施工过程的不确定性可能导致边坡出现突发异常。当基坑或路堑开挖揭露的地质条件较预期大幅恶化、或监测数据显示位移速率持续增大时,应果断启动应急支护程序。应急支护的基本原则是“先稳住、后加固”——首先采取快速措施遏制变形发展,再实施永久性加固。常用应急手段包括:坡脚反压(堆置土袋或砂石料提高抗滑力矩,见效最快)、增设预应力锚索(针对关键滑移面快速锁定,宜选用可快速张拉的成品锚索)、坡面覆盖防水布(防止雨水入渗恶化)等。应急措施实施后加密监测频次,待变形收敛稳定后,由各方会商确定后续永久处理方案。应急支护不能替代系统设计和施工,而是为后续处理争取时间和空间。施工项目部应提前制定应急预案,储备必要的应急物资(土袋、防水布、快速锚固材料等),确保险情发生时能够快速响应。

结束语

边坡支护是土木工程现场施工中不可忽视的技术难题,其成效不仅取决于支护结构的设计合理性,更依赖于施工全过程的质量控制和技术管理。本文从边坡失稳机理出发,从地质勘察、过程质量控制、动态监测和排水防护等维度提炼了现场施工中的实用要点。随着工程建设环境日趋复杂,边坡支护技术将持续向智能化、精准化方向发展,绿色低碳施工理念也日益成为行业共识。施工技术人员应在确保工程安全与质量的前提下,积极践行绿色施工要求,推动边坡支护技术向安全、高效、环保的方向全面升级。

参考文献

- [1] 何琳琳. 边坡支护技术在土木工程施工中的运用分析[J]. 散装水泥, 2026(2): 106-108.
- [2] 余烽, 张恩. 土木工程施工中的边坡支护技术[J]. 建筑与装饰, 2025(18): 133-135.
- [3] 赵德彦. 土木工程施工中边坡支护技术的应用研究[J]. 砖瓦世界, 2025(4): 52-54.
- [4] 邱举刚, 黄阳阳, 王光玲. 土木工程建筑施工中的边坡支护技术[J]. 建筑·建材·装饰, 2023(16): 85-87, 78.