

水利工程深基坑支护与边坡稳定处理技术探讨

吴凤英

内蒙古自治区红山水库管理中心，内蒙古赤峰市，024511；

摘要：随着国家水网建设的全面提速，水利水电工程正向着更深、更高、更复杂的方向纵深发展。深基坑开挖与高边坡治理作为工程建设中的核心环节，其稳定性直接关系到工程结构安全、施工效率及周边生态环境的可持续性。由于水利工程多选址于地质构造复杂、水文环境多变且生态敏感的山区或峡谷地带，传统的经验式设计与单一支护手段已难以满足现代工程对安全性、经济性与环保性的多重严苛需求。

关键词：水利工程；深基坑支护；边坡稳定；数值模拟；生态防护；综合治理；智能监测

DOI：10.69979/3060-8767.26.05.058

引言

水利工程作为国家基础设施建设的基石，在防洪减灾、水资源配置、水力发电及生态环境保护等方面发挥着不可替代的作用。近年来，随着“十四五”规划中重大水利工程的密集落地，三峡后续工程、南水北调西线工程论证、滇中引水等超级工程的推进，使得水电建设规模日益扩大，开挖深度不断突破百米大关，边坡高度持续攀升至数百米甚至千米级。在这一宏大背景下，深基坑与高边坡的稳定性控制已从单纯的技术问题上升为制约工程进度、决定工程成败的核心难题。

1 水利工程深基坑支护体系的分类与选型策略

深基坑支护是确保地下空间开挖安全的核心措施，其本质是通过人工构筑的临时或永久结构体系，平衡基坑侧向土压力、水压力及外部荷载，防止坑壁土体失稳坍塌。在水利工程中，由于基坑深度大、周边环境保护要求高且地质条件多变，支护体系的选型是一项极具挑战性的系统工程，必须综合考虑地质条件、周边环境、开挖深度、施工工艺、工期要求及工程造价等多重因素，进行科学决策。

1.1 常见支护结构形式的技术特点与适用边界

目前，水利工程中广泛应用的支护结构主要包括排桩支护、地下连续墙、土钉墙（含锚杆/锚索联合支护）、重力式挡墙及内支撑体系等，每种结构形式都有其独特的力学机制与适用场景。

排桩支护是目前应用最为广泛的支护形式之一，其通过钢筋混凝土灌注桩或预制桩排列形成挡土墙体，并在桩间设置止水帷幕（如高压旋喷桩）。排桩支护具有刚度大、承载力高、施工便捷、造价适中等优点，特别适用于地质条件较好、开挖深度在15-25米之间的基坑。

然而，对于超深基坑或地质条件极差的情况，单排桩的侧向变形较大，往往需要配合多层内支撑或预应力锚索使用，以限制其位移。

地下连续墙则被誉为深基坑支护的“全能选手”，它兼具优异的挡土功能与卓越的止水性能。通过槽段浇筑形成连续的钢筋混凝土墙体，其整体刚度极大，能够有效控制周边地层沉降，特别适用于深大基坑（深度超过30米）、紧邻重要建筑物或地下管线密集的区域，以及地下水丰富、渗透系数大的砂层或卵石层。尽管地下连续墙具有显著的技术优势，但其施工成本高、对设备要求严、成槽质量难以完全控制，且在深厚软土地区易发生“缩颈”或“塌孔”现象，因此在经济性敏感的项目中需慎重选用。

1.2 基于多目标优化的支护选型机制与决策模型

科学的支护选型不应仅凭工程师的个人经验或单一指标判断，而应建立基于多目标优化的科学决策机制。该机制需构建一个包含地质风险度、基坑变形控制指标、周边环境影响阈值、工程造价预算、施工工期约束及生态环保要求等多维度的评价指标体系。

首先，必须基于高精度的地质勘察数据，对基坑周边的地质风险进行量化评估。例如，在紧邻地铁隧道、历史保护建筑或大型管网区域，变形控制能力成为首要考量因素，此时应优先选择变形控制能力极强的地下连续墙或带有水平内支撑的排桩体系，即使其造价较高，也需以确保周边安全为底线。反之，在地质条件较差但允许一定变形（如空旷场地）的区域，可考虑采用加筋土、柔性支护结构或土钉墙，以大幅降低工程成本。

2 高边坡稳定性的关键影响因素与加固机理

高边坡稳定性是水利工程安全运行的生命线，其破坏过程往往是多种因素耦合作用的结果。深入理解高边

坡的破坏机理,识别关键影响因素,是实施有效加固的前提。水利工程高边坡通常位于峡谷深切地带,岩体结构复杂,节理裂隙发育,且长期受到地表水、地下水和水库水位变化的共同作用,形成了极为复杂的“水-岩-力”耦合系统。

2.1 地质与水文环境的耦合作用机制

水利工程高边坡的稳定性首先受制于其内在的地质构造。峡谷地带岩体往往经历多次构造运动,形成密集的节理、裂隙、断层及破碎带。这些结构面不仅是岩体中的薄弱面,更是潜在的滑动面。当边坡开挖切断了这些结构面的支撑时,岩体应力状态发生剧烈改变,极易沿结构面发生剪切滑移。特别是在软弱夹层或断层破碎带附近,岩体强度极低,一旦遭遇强降雨或地震,极易发生大规模滑坡。

然而,地质因素只是基础,水文环境才是诱发滑坡的“催化剂”。在水利工程中,地下水的作用尤为关键。雨水入渗会降低岩土体的抗剪强度,使岩土体由“摩擦型”转变为“润滑型”,显著降低摩擦系数。静水压力会增大滑推力,直接推动潜在滑体下滑;而动水压力则可能引发管涌、流土等渗透破坏,掏空坡脚,导致边坡失稳。更为特殊的是,水库水位的周期性涨落对岸坡产生巨大的动水压力变化。当水位快速下降时,坡体内孔隙水压力来不及消散,形成向外指向的渗透力,极大地降低了边坡的有效应力和抗滑力,这是许多库岸边坡在低水位期发生滑坡的根本原因。因此,在分析边坡稳定性时,必须摒弃静态视角,将地质结构与水文动态纳入统一框架,重点研究水-岩相互作用机制,特别是非饱和土渗透特性、裂隙水压力分布规律及水位骤降时的瞬态渗流场演化过程。

2.2 主流加固技术的力学原理与应用深化

针对高边坡失稳风险,现代工程中已形成了一套成熟的加固技术体系,包括抗滑桩、锚索框架梁、注浆加固及格构护坡等,其核心在于改变边坡的应力分布状态,提高抗滑安全系数。

抗滑桩是治理大型深层滑坡的经典手段。其力学原理是将桩身嵌入滑动面以下的稳定地层中,利用桩侧阻力抵抗滑坡推力。为了充分发挥抗滑桩的作用,通常需要设置桩前阻滑区和桩后减载平台,并采用多排桩布置以形成整体效应。抗滑桩适用于推力大、滑面深的滑坡,但施工难度大,对桩基承载力要求高。

锚索框架梁则是目前高边坡治理的主流技术,具有“主动加固”的显著优势。其原理是将高强度钢绞线锚

固在深部稳定岩层中,通过张拉锁定产生巨大的预应力,再通过框架梁将力均匀传递给坡面。这种主动施加的预应力不仅能抵消部分下滑力,还能封闭坡面裂隙,防止风化剥落和雨水入渗。锚索加固深度大、效果显著,特别适用于高陡岩质边坡。

注浆加固技术则侧重于改善岩土体本身的物理力学性质。通过高压注入水泥浆液或化学浆液,填充岩体裂隙、胶结松散岩块,从而提高岩体的整体性、胶结强度和抗渗性能。注浆技术常用于断层破碎带治理或作为其他加固措施的辅助手段,以提高岩体的自稳能力。

3 数值模拟技术在稳定性评价中的应用进展

随着计算机硬件性能的飞跃和计算力学理论的成熟,数值模拟已成为定量评价深基坑与边坡稳定性不可或缺的工具。它突破了传统极限平衡法只能给出安全系数的局限,能够直观展示应力应变场、塑性区分布及变形全过程,为工程设计和风险评估提供了精细化的科学依据。

3.1 有限元与离散元方法的对比分析与融合应用

有限元法(FEM)是基于连续介质力学假设的经典方法,适用于大多数土体和完整岩体的应力应变分析。它能够精确计算支护结构与土体的相互作用,模拟复杂的边界条件和非线性本构关系,广泛应用于常规边坡稳定性评价和基坑变形预测。然而,FEM在处理节理裂隙极发育的岩质边坡、涉及大变形、破裂及块体运动的问题时存在明显局限,因为它难以准确模拟岩体内部的断裂扩展和块体间的相对滑移。

相比之下,离散元法(DEM)则专为不连续介质设计,它将岩体视为由无数个独立块体组成的集合,能够模拟块体间的运动、碰撞、分离及转动过程,更真实地反映岩体破坏机制。对于节理发育的硬岩边坡,DEM能够揭示裂纹的萌生、扩展及贯通路径,预测渐进式破坏过程。近年来,流固耦合算法的发展使得数值模拟能够同时考虑地下水渗流场与应力场的耦合效应,显著提升了复杂水力条件下边坡稳定性预测的准确性。在实际工程中,往往采用“有限元-离散元”耦合的方法,即对连续介质部分采用FEM,对节理破碎带采用DEM,以实现优势互补,提高模拟精度。

3.2 模型构建与参数反演技术的精细化路径

数值模拟的精度高度依赖于地质模型的真实性与岩土参数的准确性。在实际工程中,常采用地质雷达、高密度电法、钻孔探测等手段获取原始数据,构建三维地质模型。然而,地质条件的复杂性使得初始参数往往

存在较大不确定性。为此,必须引入参数反演技术。

利用现场监测数据(如深部位移计、测斜仪、渗压计、GNSS接收机等)对模型参数进行反演修正,是提升模拟精度的关键。通过建立“监测-反馈-修正”的闭环模式,将实测的位移、应力、孔隙水压力等数据与模拟结果进行对比,利用优化算法(如遗传算法、粒子群算法)不断调整岩土体力学参数,直至模拟结果与实际工况高度吻合。这种动态反演过程不仅提高了评价结果的可靠性,还能为施工过程中的动态调整提供实时依据,实现了从静态评价向动态预警的转变。

4 绿色生态理念下的综合防护技术趋势

在生态文明建设背景下,水利工程边坡治理正经历着从单纯的工程防护向生态友好型方向的历史性转型。传统的“水泥抹面”、“喷浆护坡”虽然强度高,但彻底破坏了自然植被,导致水土流失加剧,景观破碎,无法满足新时代对绿水青山的追求。绿色生态防护技术应运而生,旨在实现工程安全与生态效益的双赢。

4.1 生态混凝土与植被恢复技术的深度融合

生态混凝土技术是绿色防护的核心突破。它通过在混凝土中添加有机纤维、无机轻质骨料或预留植生孔,使其在保持足够结构强度的同时,具备透气透水性,为植物根系生长提供适宜环境。配合客土喷播技术,可以将富含种子、肥料和保水剂的混合基质喷射到裸露岩壁上,迅速形成土壤层。植生袋技术则利用土工布包裹营养土和草籽,层层堆叠,形成稳固的护坡层。

这种“工程护坡+植物护坡”的双重防护体系,不仅有效防止了地表径流冲刷和浅层滑坡,还能通过植物根系固土、蒸腾作用调节坡体水分,改善局部微气候,促进生物多样性恢复。例如,在三峡库区的一些高边坡治理中,采用了生态混凝土挂网喷播技术,短短两年内便恢复了茂密的植被覆盖,不仅消除了安全隐患,还重塑了优美的库岸景观,真正实现了“工程隐形化、景观自然化”。

4.2 智能监测与全生命周期管理的数字化未来

未来的边坡与基坑治理将深度融合物联网、大数据、云计算与人工智能技术,构建全天候、全方位的智能监测网络。通过布设分布式光纤传感器(DTS)、高精度GNSS接收机、无人机倾斜摄影系统及InSAR卫星遥感

技术,实现对边坡表面位移、内部应力、渗流场及裂缝发展的实时感知。

利用大数据分析平台,自动采集并处理海量监测数据,利用机器学习算法识别异常变形趋势,提前发布分级预警信息,实现从“事后补救”向“事前预防”的跨越。同时,建立全生命周期管理平台,将设计、施工、监测、维护等环节的数据串联起来,形成数字孪生模型。管理者可以在虚拟空间中推演各种工况下的边坡响应,优化运维策略,实现边坡健康状态的数字化管理与科学决策。这种智能化的管理模式,将确保水利工程在长达数十年的运行期内始终保持安全稳定,为国家水网建设筑牢坚实的安全屏障。

5 结语

水利工程深基坑支护与高边坡稳定处理技术是一项涉及地质学、岩石力学、土力学、工程学及生态学等多学科交叉的系统工程,其复杂性与重要性不言而喻。

通过优化支护结构设计,建立基于多目标决策的选型机制;深化数值模拟应用,实现从静态评价向动态精准预测的转变;推广绿色生态防护技术,实现工程安全与生态和谐共生;构建智能化监测预警体系,打造全生命周期的智慧管理闭环。我们能够有效应对深基坑与高边坡带来的各种挑战,将风险控制萌芽状态。

参考文献

- [1] 吴彦苇. 软土地区基坑常用支护结构性能分析及选型专家系统[D]. 浙江科技大学, 2024. DOI: 10.27840/d.cnki.gzjkj.2024.000263.
- [2] 刘杰. 长短桩组合支护体系在深厚淤泥基坑中的应用研究[D]. 广州大学, 2023. DOI: 10.27040/d.cnki.ggzdu.2023.000309.
- [3] 金晓飞. 新型接头超深地下连续墙施工过程分析及工程应用研究[D]. 东南大学, 2016.
- [4] 傅志斌. 基于失稳加速度的支护基坑稳定分析方法研究[D]. 中国地质大学, 2020. DOI: 10.27492/d.cnki.gzdzd.2020.000085.
- [5] 王永鹏. 粉质粘土深基坑地下连续墙力学效应分析及优化设计[D]. 太原理工大学, 2016.
- [6] 王明珉. 支护桩桩间临空土体破坏机理与稳定性分析方法[D]. 重庆大学, 2015.