水利水电工程中高边坡稳定性分析及加固技术研究

高兴双

新疆兵团水利水电工程集团有限公司　新疆　乌鲁木齐　830000

摘　要：高边坡稳定性是水利水电工程建设与运行中的核心岩土工程问题，直接关系到坝址安全、施工安全与长期运营可靠性。本文在系统阐述高边坡工程特性与失稳模式的基础上，梳理了工程地质分析、极限平衡法、数值模拟及可靠度分析等稳定性评价方法的适用条件与技术演进，进而从排水截渗、抗滑支挡、锚固加固及坡面防护等方面构建了系统的加固技术体系。研究表明，高边坡稳定性分析应坚持地质调查为先导、定量计算为核心的技术路线，加固方案的选择需综合考量坡体结构特征、失稳机制和施工可行性，形成”分析-设计-施工-监测”四位一体的闭环管控体系，为水利水电工程高边坡灾害防控提供系统化的技术思路。

关键词：水利水电工程；高边坡；稳定性分析；加固技术；锚固支护

引言

水利水电工程建设中，高边坡广泛存在于坝肩开挖、溢洪道切坡、引水隧洞口及库岸等部位，其稳定性直接制约着工程选址、设计、施工和长期运营。我国西部水电开发区域多属高山峡谷地貌，地形陡峻、地质构造复杂、地应力水平高，高边坡稳定问题尤为突出。部分水电工程在建设或运行中曾遭遇边坡失稳事件，造成了工期延误、投资增加甚至人员伤亡的严重后果，使得高边坡稳定性成为工程界高度关注的焦点议题。高边坡稳定性分析的核心任务是在查明工程地质条件的基础上，准确评价天然状态和工程扰动后坡体的稳定程度，识别潜在失稳模式与关键破坏面，为加固设计提供依据。与此相应，加固技术研究的重点在于根据不同的失稳机制和工程约束条件，选择经济合理的加固方案并确定关键设计参数。

1 高边坡工程特性与失稳模式分析

1.1 高边坡的界定与工程地质特征

高边坡通常指高度大于 30 米的天然斜坡或人工开挖边坡，在水利水电工程中，坝肩边坡和溢洪道边坡的高度往往达到百米乃至数百米量级。与一般边坡相比，高边坡具有以下显著特征：一是坡体规模大，应力场复杂，自重应力与构造应力叠加效应显著；二是地质结构非均质性强，常发育有断层、节理、软弱夹层等不连续面，构成控制性结构面；三是受河谷下切和地壳抬升影响，高应力区岩体卸荷强烈，坡体浅表部常存在松弛带和风化带；四是水文地质条件复杂，地下水渗流场与应力场耦合作用显著。这些特征决定了高边坡的稳定性不能简单套用一般边坡的分析方法，必须综合考虑岩体结构特征、地应力状态和水-岩耦合效应。

1.2 高边坡失稳的主要模式与成因分类

高边坡失稳模式取决于坡体地质结构和破坏机制，可归纳为以下几类典型模式。滑动破坏是最常见的形式，包括沿单一软弱面或结构面的平面滑动、沿两组结构面交线的楔形体滑动以及沿圆弧或折线形滑面的旋转滑动，其中前两者受控于岩体结构，后者多见于松散堆积体或破碎岩体。倾倒破坏发生于反倾向层状岩体中，岩层在重力作用下向临空面发生弯曲、折断和倾覆。崩塌落石多见于陡立岩壁，由结构面切割形成的块体在卸荷或震动作用下脱离母岩[1]。流动破坏主要发生于松散土质边坡或高度风化的岩质边坡，在暴雨作用下转化为泥流或碎屑流。上述失稳模式的成因可归结为内因（地质结构、岩性、地应力）和外因（开挖卸荷、降雨入渗、爆破震动、水位骤降）的共同作用，准确识别失稳模式是选择分析方法和加固手段的前提。

1.3 工程活动对高边坡稳定性的扰动效应

水利水电工程建设对高边坡稳定性的扰动主要体现在三个方面。开挖卸荷效应：坝肩和溢洪道开挖使坡体侧向约束解除，临空面附近应力重分布，可能诱发坡体内已有结构面的张开或错动，降低抗滑力。渗流场改变：水库蓄水使库岸地下水位抬升，增加了坡体的渗透压力和浮托力，同时水位骤降时坡体内产生指向临空面的动水压力，对透水性较强的坡体尤为不利。爆破与地震动荷载：基坑开挖中的爆破作业和工程运行期的地震作用，可能触发坡体内不稳定块体的动力失稳。这些扰

动因素的叠加效应要求稳定性分析必须紧密围绕工程全过程展开，既评价施工期的临时稳定，也预测运行期的长期稳定。

2 高边坡稳定性分析方法体系

2.1 工程地质分析与结构面控制理论

工程地质分析是高边坡稳定性研究的基础性工作，其核心在于查明坡体的岩性组合、地质构造、结构面发育特征和水文地质条件，识别控制坡体稳定的主控结构面，建立坡体的地质力学模型。结构面控制理论认为，岩质边坡的稳定性很大程度上受控于结构面的产状、延展性、粗糙度和充填物性状，需要通过对结构面的系统测量和统计分析（如赤平极射投影法）判断可能形成的切割块体和失稳方向。地质分析不应止于定性描述，而应与定量评价紧密结合，为后续数值模型的建立提供可靠的地质边界和力学参数。实践中，地质分析不足或结构面识别遗漏是导致稳定性评价失准的最常见原因。

2.2 极限平衡法的原理与适用条件

基本思路是假定滑裂面形状，将滑体划分为若干条块，通过静力平衡方程求解安全系数。根据滑裂面假设的不同，主要有 Bishop 法（圆弧滑面）、Janbu 法（任意形状滑面）、Sarma 法（考虑结构面控制的非垂直条分）及不平衡推力传递法等。极限平衡法的优势在于计算简便、物理意义明确、能够快速给出定量安全系数，但局限性也很突出：需要预先假定滑裂面形状和位置，对复杂地质条件下的非圆弧滑动适应性差；条块间作用力的简化假定可能引入误差；无法计算坡体内部的应力-应变分布[2]。因此，极限平衡法适用于地质结构相对简单、失稳模式明确的边坡初步评价，对复杂边坡应辅以数值分析方法。

2.3 数值分析方法的发展与应用

数值分析方法能够模拟坡体内部的应力场、位移场和塑性区分布，适用于复杂地质结构和多种失稳模式的精细分析。有限元法可考虑材料的非线性本构关系（如摩尔-库仑模型、邓肯-张模型）和渗流-应力耦合效应，通过强度折减法直接获得安全系数和潜在滑动面位置，是目前应用最广泛的数值方法。有限差分法（如 FLAC）在模拟大变形和破坏过程方面具有优势。离散元法适用于碎裂结构岩体或节理发育边坡，能够模拟块体间的接触、滑动和转动，是分析节理控制型失稳的有效工具。数值方法的可信度高度依赖于岩体力学参数的准确性和本构模型的适用性，参数选取应基于室内试验和现场测试，并结合反分析进行校核。

2.4 可靠度分析与风险评价方法

确定性分析方法（极限平衡法、数值法）采用单一的安全系数表征稳定性，无法量化和考虑参数不确定性对稳定性的影响。高边坡岩体参数具有天然的变异性和空间不确定性，可靠度分析方法通过将岩体参数视为随机变量，计算坡体的失效概率和可靠度指标，为风险决策提供更为科学的依据。常用方法包括一次二阶矩法、响应面法和蒙特卡洛模拟法。近年来，概率方法与数值分析相结合的可靠度数值方法逐步发展，能够更真实地反映复杂边坡的不确定性特征。值得指出的是，可靠度分析不能替代确定性分析，两者应互为补充——确定性分析确定安全裕度，可靠度分析评价安全裕度的可信水平。

2.5 多方法协同的综合分析框架

高边坡稳定性分析科学的分析策略应是多方法、多层次的协同应用。建议建立” 三级递进” 分析框架：第一级为工程地质调查与定性评价，确定坡体结构类型和可能的失稳模式；第二级为极限平衡法定量验算，在多种工况（天然、暴雨、地震、水位骤降）下计算安全系数，筛查关键工况；第三级为数值分析方法精细模拟，针对关键工况和复杂地质段进行应力-变形耦合分析，确定潜在滑裂面的位置和形态。对于重要工程或地质条件极为复杂的边坡，还应开展可靠度分析，评估参数不确定性对结论的影响程度。各级分析结果相互校核，形成综合判断，克服单一方法的局限。

3 高边坡加固技术体系与关键措施

3.1 坡面排水与地下渗流控制技术

水是诱发高边坡失稳的最活跃因素，排水与截渗往往是成本最低但效果最显著的加固措施。坡面排水系统包括截水沟、排水沟和跌水设施，其功能是拦截坡面径流、防止雨水入渗和冲刷坡面。地下排水系统旨在降低坡体内地下水位和孔隙水压力，主要手段包括排水隧洞（在坡体深部设置）、排水孔（从坡面或平硐内向坡体钻孔）和集水井-水平排水孔组合体系。排水孔的布置方向、深度和间距应根据地下水位分布和渗流场模拟结果确定，排水孔应设置反滤层防止细颗粒流失。对于渗透性高的边坡，还可采用井点降水或电渗排水等强化措施。排水系统应与坡面防护措施统筹设计，形成地表截排与地下疏导相结合的立体防排水体系。

3.2 抗滑桩与挡土墙的选型与设计要点

抗滑桩是将桩体穿过滑面锚固于稳定地层中，依靠桩体的抗弯剪能力抵抗滑体推力的一种深基础支挡结构，适用于滑面埋深较大、滑体厚度较大的边坡。桩型

可选用钢筋混凝土挖孔桩、钻孔灌注桩或 H 型钢桩，桩位一般布置在滑体推力合力作用点附近，桩间距根据桩间土拱效应确定。抗滑桩的设计核心在于准确确定滑体推力（采用剩余下滑力法或数值法计算）和桩身内力（按弹性地基梁或有限元法分析），桩的嵌固深度应满足抗弯、抗剪和锚固稳定的要求。挡土墙适用于滑面较浅、滑体厚度不大的边坡，重力式、悬臂式和扶壁式是常用结构形式，其稳定性验算包括抗滑移、抗倾覆和地基承载力三个方面。抗滑桩与挡土墙可根据坡体条件组合使用，形成多级支挡体系。

3.3 锚固技术的分类与锚固机制

锚固技术通过将锚杆（索）的一端锚固于坡体稳定区，另一端张拉锁定于坡面，将不稳定坡体的部分荷载传递至深层稳定地层，从而提高坡体的整体稳定性。按锚固深度和承载能力可分为系统锚杆（长度一般 3~12m，适用于浅层加固）和预应力锚索（长度可达数十米至百米，承载力数百千牛至数千千牛，适用于深层加固）。预应力锚索的施加不仅提供了直接的抗滑力，还通过改善坡体应力状态、闭合张拉裂缝、提高结构面抗剪强度等间接方式增强坡体稳定性[3]。锚固设计的关键参数包括锚固力大小、锚固段长度、自由段长度、锚固间距和布设角度，这些参数需根据坡体结构、滑面位置和下滑力计算综合确定。锚固施工中成孔质量、锚固段注浆饱满度和预应力张拉控制是影响锚固效果的核心环节。

3.4 坡体深层加固的综合技术方案

对于规模巨大、失稳风险高的高边坡，单一加固措施往往难以满足要求，需要采用综合加固方案。常见的组合模式包括” 锚索 + 抗滑桩 + 排水” 三位一体体系：锚索提供主动抗滑力并改善坡体应力状态，抗滑桩承担滑面处的集中剪力，排水系统降低孔隙水压力，三者协同作用形成空间多维加固格局。对于倾倒破坏型边坡，可采用深层锚索与浅层系统锚杆相结合的方式，锚索穿过倾倒折断面锚固于稳定基岩，系统锚杆增强坡面层状岩体的整体性[4]。对于碎裂松动坡体，除锚固措施外还应辅以坡面挂网喷混凝土或主动防护网，防止坡面局部崩塌。综合加固方案的设计应遵循” 对症下药、层次分明、经济合理” 的原则，避免过度加固造成浪费，也要防止局部加固不足留下隐患。

3.5 坡面防护与生态恢复措施

坡面防护是防止浅表层岩土体风化剥落、雨水冲刷和局部崩塌的重要措施，常用方法包括喷射混凝土护坡、浆砌石护坡、格构锚固护坡和柔性防护网系统等。喷射混凝土护坡适用于岩体较破碎的坡面，可有效封闭坡面、防止风化，但应注意设置泄水孔防止背后水压力积聚。格构锚固将钢筋混凝土格构梁与锚杆（索）结合，兼具坡面约束和深层锚固功能，视觉效果和生态兼容性优于大面积喷混凝土。近年来，生态护坡技术在高边坡治理中受到重视，通过厚层基材喷播、客土吹附或植生袋等手段在坡面构建植被覆盖层，利用植物根系的加筋作用和蒸腾排水作用辅助稳定坡面，同时改善工程景观和生态环境。生态措施适用于岩体相对完整、坡度较缓的边坡，应与工程加固措施协调配置。

4 结语

高边坡稳定性分析与加固是水利水电工程的重要课题。本文梳理其工程特性、失稳模式及分析方法，揭示地质分析、定量评价与针对性加固的内在逻辑，强调 “地质先行、分析定量、加固对症” 的技术路线。实践中需重视三点：一是分析方法无绝对准确，需通过多方法协同与校核逼近真实模型；二是加固无普适最优方案，须基于具体机制定制化设计；三是治理非一次性行为，应贯穿全生命周期，依托动态监测确保长期安全。未来，随着岩体精细化探测、多场耦合数值模拟及智能预警技术发展，该领域将向更精准、智能和高效方向演进。

参考文献

[1] 黄润秋, 许强, 李为乐. 高边坡稳定性评价的关键技术问题与研究进展 [J]. 工程地质学报,2023,31(3):557-569.

[2] 陈祖煜, 王玉杰, 汪小刚. 边坡稳定分析极限平衡法的进展与适用性评价 [J]. 岩土工程学报,2022,44(8):1381-1393.

[3] 何满潮, 李术才, 杨晓杰. 预应力锚固技术在深挖高边坡治理中的力学效应与设计方法 [J]. 煤炭学报,2023,48(2):589-601.

[4] 刘汉东, 张建海, 符文熹. 水利水电工程高边坡治理技术发展综述 [J]. 水力发电,2024,50(6):34-43.