

边坡工程地质稳定性勘察与评价研究

潘奎优 向宝刚

中水珠江规划勘测设计有限公司 广东 广州 510610

【摘要】：边坡工程的失稳往往由地形切割、岩土体结构、地下水活动、降雨入渗及工程扰动共同诱发，单纯依赖少量钻孔或单一安全系数难以充分揭示潜在破坏模式。本文依据《工程勘察通用规范》GB 55017—2021、《岩土工程勘察规范》GB 50021—2001（2009年版）和《建筑边坡工程技术规范》GB 50330—2013，构建“资料调查—地质测绘—钻探试验—水文观测—模型判定—稳定计算—动态复核”的勘察评价体系。研究重点分析控制性结构面、软弱夹层与地下水条件对边坡稳定性的耦合作用，提出以破坏模式为前提、以参数分区为基础、以确定性计算和概率分析互证的评价方法。公开工程案例数据表明，原状坡体平均安全系数为1.0024、破坏概率为49.5%，采用挡土墙或地锚后平均安全系数分别提高至1.7388和1.7745，说明勘察成果只有转化为针对性的排水、减载与支挡措施，才能形成可靠的风险控制闭环。

【关键词】：边坡工程；工程地质勘察；破坏模式；稳定性评价；安全系数

3DOI:10.12417/2705-0998.26.11.039

引言

交通、水利、矿山及城镇建设活动不断向山地丘陵地区延伸，边坡开挖高度、临空条件和周边环境敏感程度随之增加。边坡稳定问题具有明显的隐蔽性、时变性与空间非均质性：坡体在常态条件下可能保持暂时平衡，但连续降雨会抬升地下水位并削弱软弱面抗剪强度，坡顶堆载、坡脚开挖和爆破振动又会改变原有应力路径，使局部变形逐步演化为整体滑移。现行规范强调勘察必须服务设计、施工与运营全过程，既要查明地层、构造、地下水及不良地质作用，也要对可能的崩塌、滑动、倾倒和浅层冲刷等模式作出判断。因此，边坡工程地质稳定性评价不能停留在“钻孔揭露加经验定性”的层面，而应将现场调查、试验参数、计算模型与监测信息贯通起来，以保证评价对象、破坏模式和控制措施之间具有明确对应关系。

1 边坡工程地质稳定性勘察基础

1.1 稳定性控制因素与勘察目标

边坡稳定性主要受坡高、坡角、坡形和临空面的组合控制，岩土体处于缓坡状态时可以保持稳定，但是当陡坡出现或者坡脚被切除后会表现出抗滑力不足的问题，岩土体结构决定潜在破坏面的空间位置，土质边坡主要会在土层界面、软弱夹层或者基岩顶面上产生圆弧形和折线形的滑面。岩质边坡主要受方面构造、节理构造、断层构造和卸荷裂隙构造的组合控制，会出现平面滑动、楔形滑动、倾倒或者崩塌，地下水把地质条件同外部荷载联系起来，水位抬升会使孔隙水压力增大并使坡体自重增加，也会让泥化夹层变软，使裂隙充填物被冲刷掉，从而引起抗剪参数出现折减。工程荷载上，坡顶建筑、车辆和材料堆载增加下滑力，坡脚开挖削弱支承，爆破和机械振动有可能使既有裂缝贯通，依据上述机理，勘察工作应当把获取土层厚度和承载力的任务改为识别控制稳定性的地质边界和水力边界，要明确边坡安全等级、可能破坏范围、主要结构面、地

下水补排关系、施工扰动敏感部位，以此作为参数选取、计算剖面和治理分区的依据。

1.2 分阶段勘察内容与技术方法

边坡勘察应当按照可行性研究、初步勘察、详细勘察、施工勘察这几个阶段依次进行，并且需要根据工程的复杂程度来对勘察点进行动态加密处理，前期工作收集了区域地质、地形地貌、历史灾害、遥感影像和降雨资料，利用无人机倾斜摄影或高精度地形测量恢复坡体几何形态，并且识别冲沟、裂缝、鼓胀、掉块和旧滑坡边界。地质测绘需要在坡顶、坡面、坡脚、两侧边界位置布置调查线路，并且对岩性分界、风化程度、结构面产状、延伸性、粗糙度、充填、渗水状态进行记录，钻探和槽探位置需要围绕确定滑面、软弱夹层、地下水通道进行布置，而不是进行机械均匀布孔，孔洞需要穿过可能发生的滑动面并且进入稳定的地层达到一定的深度。室内试验要区分天然、饱和和残余强度条件，土体可以进行含水率、密度、直剪或者三轴试验，岩体需要结合岩块强度、结构面剪切和点荷载试验，边坡受强降雨影响比较明显，本文建议在孔位布置地下水位孔、孔隙水压力计、泉点流量观测设备，以测定雨前、雨中和雨后期间的响应时差。在需要时，利用高密度电法、地震波或探地雷达来补充识别松动带和富水带，让地表迹象、钻孔揭露和物探异常可以相互进行验证。

2 稳定性评价方法与参数体系

2.1 破坏模式识别及参数确定

计算稳定性时要保证破坏模式和实际地质结构相符合，对于均质或者接近均质的土坡，可以使用圆弧滑动假定，在基岩面、软弱夹层或者多级台阶的情况下，应当优先选择折线形或者任意形状的滑面，岩质边坡应该根据结构面组合进行赤平投影和运动学分析，先判断平面滑动、楔形滑动或者倾倒是否有几何条件，然后建立力学模型。参数确定应当坚持把试验值当

作基础、把地质分区当作约束条件,并且依靠工程经验进行校核的原则,重度可以按照原位密度和含水状态来确定,黏聚力和内摩擦角应当结合峰值、长期值、残余值分别进行选取,针对泥化夹层、强风化带和既有滑带,直接使用完整土样峰值强度经常会高估稳定性,应当利用反演、重复剪切或者残余强度试验进行校正。岩体参数也要把结构面组数、间距、贯通性、岩桥比例都纳入考量,不可以把岩块抗压强度当作岩体整体强度来用,地下水工况应当包括正常水位、暴雨或者排水失效条件,如果需要的话,也可以考虑地震、施工和坡顶附加荷载的组合,本文利用参数分区和敏感性分析方法来确定对安全系数产生最大影响的变量,从而为后续的补勘和治理设计提供依据。

2.2 极限平衡与概率评价的互证

工程实践里经常使用简化 Bishop 法、Janbu 法和 Morgenstern—Price 法来计算安全系数, Morgenstern—Price 法可以同时达到整体力和力矩平衡的要求,适合用于圆弧及非圆弧滑面,安全系数在实质上反映潜在滑体的抗滑能力和下滑效应的比值,但是单个确定数值无法表达参数的离散程度、模型的不确定性。为防止出现计算值刚好达到标准就误判为绝对安全的情况,研究者应当在进行极限平衡计算之后再行进行敏感性分析或者概率分析,把黏聚力、摩擦角、地下水位等当作随机变量,来计算安全系数的平均值、标准差、失效概率,表 1 列出的数据来源于公开发表的案例二:覆盖层天然重度是 18.34 kN/m^3 ,黏聚力是 10.59 kPa ,摩擦角是 24° 。本文运用点估法和 Morgenstern—Price 法进行分析后发现,原状坡体平均安全系数为 1.0024 ,失效概率达到 49.5% ,说明该边坡处于临界状态,在设置挡土墙或者地锚以后,平均安全系数分别达到 1.7388 和 1.7745 ,失效概率都下降到 1.2% 。该结果表明,确定性安全系数和概率指标应当结合起来进行使用,确定性安全系数有利于同规范控制值进行比较,概率指标可以反映参数波动所引起的各类风险情况,从而为治理方案的选择提供更加充分的量化数据支持。

表 1 公开案例地层参数及不同治理方案稳定性评价结果

方案	原状自然恢复	加设挡土墙	加设地锚
重度/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	18.34	18.34	18.34
黏聚力/ kPa	10.59	10.59	10.59
摩擦角/ $(^\circ)$	24	24	24
平均安全系数	1.0024	1.7388	1.7745
失效概率/ $\%$	49.5	1.2	1.2
评价	临界不稳定	稳定性明显提高	稳定性明显提高

注:数据根据冯正一等公开案例整理,计算使用点估法和 Morgenstern—Price 极限平衡法。

在单一评价方法的应用中,极限平衡法作为确定性分析方法,仅能输出确定的安全系数结果,无法体现岩土参数固有变异性对边坡稳定性的影响,难以直观量化边坡发生失稳破坏的风险水平;而单纯的概率评价虽然可以刻画参数不确定性带来的失效风险,却难以直接对接现行工程规范的控制要求,不便直接用于工程方案的合规性判定。将两种方法结合形成互证体系后,既能够满足工程实践中对接规范验收的基本要求,又可以补充体现边坡稳定性的风险水平,弥补单一方法的局限性。在实际工程评价过程中,可先通过极限平衡法完成确定性安全系数的计算,初步筛选出满足规范要求的方案框架,再针对初步入围方案开展概率评价,通过失效概率指标进一步识别不同方案的风险差异,最终结合两类指标完成方案的比选优化。

3 勘察评价质量控制与工程应用

3.1 多源信息验证与动态复核

边坡勘察质量控制的主要工作并非通过增加资料数量来实现,而是要保证各种资料可以指向同一个地质解释,本文首先需要建立统一的坐标和高程基准,把地质测绘、钻孔、物探、地下水、监测点位叠加到同一个三维模型中,并且检查地层界面、结构面和异常区是否保持连续,其次,钻孔岩芯编录需要和坡面露头进行对比,物探异常要依靠钻探或者槽探来进行验证,防止把含水裂隙、松动带和岩性界面混在一起。第三,参数统计需要记录样本数量、离散程度、试验状态和取值依据,对于控制性软弱层不能使用大范围平均值来稀释其不利影响,施工阶段开始以后,开挖工作会暴露出勘察阶段没有发现的裂隙、夹层或者渗水点,工作人员需要进行地质编录、超前预报、信息化施工,并且要对地质剖面 and 稳定模型进行及时修正。监测工作需要把坡顶水平位移、深部位移、裂缝宽度、地下水位和支护内力结合起来进行分析,主要观察变形速率一直增加、降雨后水位表现出不正常的滞后情况、多个指标一起出现改变的现象,勘察结论要在施工揭露和监测反馈过程中反复检验,以免静态报告同实际边坡状态产生脱节。

3.2 基于评价结果的分区防控与治理

稳定性评价最后应当变成能够进行的工程措施,针对受地表水汇集和浅层软化控制的土质边坡,应当把坡顶截水、平台排水、坡面防冲刷、坡脚排水作为重点进行完善,从而使坡体的入水量得以降低,如果边坡坡度较大并且坡角较陡,但是深层滑面尚未贯通,就可以利用分级放坡、卸载反压和坡脚支挡这些方式来减少下滑效应。在受软弱夹层、顺层结构面或既有滑带控制的边坡上,应当使用抗滑桩、锚索框架、挡墙或组合支护,并且把锚固段设置在稳定的岩土体里,治理分区应当和勘察分区保持一致,不可以一种支护形式来覆盖整个坡段,施

工顺序也要服从稳定性控制逻辑,一般先截排水、后分层开挖,先形成临时支护、再进行永久加固,防止长时间暴露和坡脚一次性切除。运营期应当按照安全等级和环境风险来确定巡查、监测和维护的周期,并且在遇到强降雨、地震或者周边施工时要及时进行复核,当位移、水位或者支护内力接近预警值时,需要进行排水疏导、坡脚反压、限制荷载、人员撤离等措施,由此形成“勘察识别—计算评价—设计治理—施工验证—监测维护”的全寿命闭环,使稳定性评价可以真正发挥风险决策作用。

4 结论

边坡工程地质稳定性勘察应以破坏模式识别为主线,综合

查明坡体几何形态、岩土体结构、控制性软弱面、地下水补排关系及工程扰动条件。评价阶段需根据土质边坡、岩质边坡和复合边坡的差异建立相应模型,参数选取应区分天然、饱和、长期与残余状态,并通过敏感性和概率分析揭示不确定性。公开案例表明,处于临界状态的原状坡体经针对性支挡后,平均安全系数和失效概率均可得到显著改善,但治理有效性的前提是勘察结论、支护形式和排水条件准确对应。今后应进一步加强无人机测绘、三维地质建模、自动化监测和动态反演的协同应用,使边坡勘察从一次性成果交付转向施工与运营全过程的信息更新,为复杂山区工程安全提供更可靠的地质依据。

参考文献:

- [1] 王甜,张鹏.地震作用下水利水电工程边坡稳定性分析研究[J].中国设备工程,2024,(16):237-239.
- [2] 戚家丰.水利枢纽工程中高边坡稳定性分析与加固技术研究[J].工程技术与管理(香港),2026,(5):98-100.
- [3] 朱宇琦.基于有限元模型的水利枢纽工程新增临时航道边坡稳定性分析研究[J].中国水运,2023,(9):130-132.
- [4] 张远坤.面向水利水电工程的水库边坡稳定性与失效概率研究[J].水利科技与经济,2025,31(1):22-27
- [5] 赵山.大沂河水利枢纽工程边坡稳定性的数值模拟研究[J].陕西水利,2022,(3):32-34.