

岩土工程勘察在高边坡工程中的运用分析

卜烜靖 赵晓飞

中南勘察基础工程有限公司 湖北 武汉 430081

摘 要：岩土工程勘察作为高边坡设计、施工与灾害防治的基础性工作，通过查明边坡岩土体类型、结构面特征、水文地质条件及物理力学参数，为边坡稳定性分析与支护设计提供关键依据。本文系统论述了岩土工程勘察在高边坡工程中的主要任务、勘察阶段划分、勘察方法与技术手段，重点分析了结构面调查、软弱夹层识别、水文地质测试、岩体质量分级及参数选取等核心内容，探讨了勘察成果在边坡稳定性评价、破坏模式识别及支护方案优化中的具体运用。研究表明，精细化、综合化、动态化的岩土工程勘察是保障高边坡工程安全的关键环节，勘察与设计的深度融合、数字化技术的应用将显著提升高边坡工程的可靠性与经济性。

关键词：高边坡工程；岩土工程勘察；结构面；稳定性分析；参数选取

引言

随着我国基础设施建设向山区、高原及复杂地质条件区域延伸，高边坡工程日益增多。在公路、铁路、水利水电、露天矿山及城市建设等领域，常遇到高度超过 30m 甚至上百米的人工开挖边坡或自然斜坡。高边坡的稳定性受控于岩土体性质、地质构造、地下水、风化卸荷及工程扰动等多重因素，失稳后可能造成重大人员伤亡与财产损失。因此，在高边坡工程设计施工前，必须开展系统、深入的岩土工程勘察工作。岩土工程勘察的目的是查明边坡工程地质条件、获取岩土物理力学参数、识别潜在滑动面、评价边坡稳定性，并为支护结构选型与设计提供依据。然而，长期以来部分工程存在“重设计、轻勘察”或勘察工作流于形式的问题，导致边坡失稳事故频发。究其原因，既有勘察投入不足的问题，也有勘察方法选择不当、结构面调查不细致、参数取值偏于经验、勘察成果与设计衔接不够等原因。因此，系统梳理岩土工程勘察在高边坡工程中的运用方法，明确各勘察阶段的工作重点与技术要点，对于提升高边坡工程的安全性和经济性具有重要现实意义。

1 高边坡工程岩土勘察的主要任务与阶段划分

1.1 主要任务

(1) 查明边坡地形地貌、地层岩性、地质构造及不良地质现象；(2) 查明结构面（层面、节理、裂隙、断层、软弱夹层）产状、间距、延续性、粗糙度、充填物及组合关系；(3) 查明水文地质条件（地下水位、含水层与隔水层、渗透性、泉水出露及水力联系）；(4) 测定岩土物理力学参数（密度、抗剪强度 c 、 φ 、抗压

强度、变形模量等）；(5) 识别潜在滑移面或优势破坏面，分析破坏模式（平面、楔形体、圆弧滑动、倾倒破坏等）；(6) 评价天然及开挖扰动后的边坡稳定性，提出支护形式与设计参数建议；(7) 预测施工及运营期变形趋势，提出监测建议。

1.2 阶段划分

可行性研究阶段，以资料收集与地质测绘为主（比例尺 1:10000 ~ 1:50000），初步评价地质条件、避让不良地质体，给出稳定性结论及投资估算。初步设计阶段，采用测绘、物探、钻探、原位测试及室内试验（比例尺 1:2000 ~ 1:5000），查明地质结构、水文条件与岩土参数，定量评价稳定性，推荐支护方案，为设计核心依据。施工图设计阶段，针对关键部位（坡脚、断层带、潜在滑面）加密勘探与补充试验，核实参数，提出动态设计建议；必要时开挖中开展地质编录修正设计。施工及运营期补充勘察，当开挖揭示地质条件不符或出现异常变形时，补充调查、勘探与监测，支撑动态设计。

2 高边坡岩土勘察的主要方法与技术

2.1 工程地质测绘与调查

最基础经济的勘察手段。测绘比例尺 1:500 ~ 1:2000，范围涵盖坡顶外 ≥ 1 倍坡高、坡脚外 ≥ 0.5 倍坡高。内容：地层岩性、构造产状与性质、风化卸荷带厚度、不良地质现象、地表水与地下水露头、边坡稳定状态^[1]。重点测量结构面：测线长 $\geq 50\text{m}$ ，每组结构面测点数 ≥ 30 ，绘制赤平投影图或玫瑰花图，分析结构面组合与坡向关系。成果包括平面图、剖面图及结构面分析图表。

2.2 遥感与地球物理勘探

地形陡峭、交通不便区域采用卫星遥感、无人机航摄影、机载 LiDAR 获取 DEM 与正射影像, 识别线性构造、崩塌堆积体、古滑坡。解译比例尺 1:1000 ~ 1:2000, 指导地面调查重点。物探 (高密度电法、地震折射波法、地质雷达、声波测井) 可快速经济探测含水层、破碎带、覆盖层厚度、岩体波速及完整性系数 K_v , 为钻探布孔提供依据, 减少工作量。陡倾结构面或高阻覆盖层下物探具多解性, 需与钻探验证。

2.3 钻探与取样

获取深部信息的最直接手段。钻孔沿主剖面布置, 控制坡顶、坡中、坡脚及潜在滑移带; 孔深应穿过最深层潜在滑面进入稳定地层 $\geq 5\text{m}$; 边坡高度 $> 50\text{m}$ 时, 布置 2 ~ 3 条勘探线, 每线 ≥ 3 孔。覆盖层用回转取芯或冲击钻, 岩层用双/三管单动取芯钻, 岩芯采取率: 完整岩 $\geq 80\%$, 破碎带 $\geq 65\%$ 。记录钻速、漏水、坍塌、涌水等^[2]。取样: 每层不扰动样 ≥ 6 组; 软弱夹层、滑带土取大直径块状样或三重管样; 节理密集带可取原位剪切样。样品及时密封保湿防震, 48h 内送实验室。

2.4 原位测试

避免取样扰动失真。方法: (1) 标准贯入试验 (SPT) 用于覆盖层及全风化岩, 测 N 值; (2) 动力触探 (DPT) 用于碎石土及强风化岩; (3) 孔内剪切试验 (钻孔剪切、十字板剪切); (4) 岩体变形试验 (刚性/柔性承压板法) 求变形模量 E_0 和弹性模量 E_e ; (5) 抽水或压水试验测渗透系数及透水率 (Lu 值)。潜在滑动面宜在探槽或平硐中做大型直剪试验, 试体 $\geq 50\text{cm} \times 50\text{cm}$, 法向应力模拟实际压力。

2.5 室内试验

针对不同岩性及风化程度开展。主要项目: (1) 物理性质: 密度、含水率、比重、液塑限、孔隙比等; (2) 岩石力学: 单轴抗压 (天然与饱和)、抗拉强度、点荷载强度; (3) 结构面抗剪强度: 获得 c 、 φ 值; (4) 土工试验: 直剪 (快剪、固结快剪、慢剪)、三轴 (UU、CU、CD)、固结试验。滑带土做反复剪切求残余强度。每个参数 ≥ 6 组数据, 剔除异常值后取标准值。

2.6 水文地质测试

地下水显著影响边坡稳定。勘察内容: 钻孔分层水位观测; 抽/注水试验求渗透系数; 压水试验评价透水性; 水质分析判定腐蚀性; 必要时示踪试验查流向流速。重点调查陡倾结构面导水、层间软弱夹层滞水及降

雨入渗通道。

3 高边坡勘察中的关键分析内容

3.1 结构面调查与优势面分析

系统采集结构面产状、间距、迹长、粗糙度 (JRC)、张开度、充填物及风化程度。采用测线法 (20 ~ 50m) 或窗口法统计。将产状投影至赤平极射图, 进行等密度分析, 确定优势组数及平均产状; 结合坡向、坡角, 判断破坏类型 (平面滑动、楔形体滑动、倾倒破坏等)^[3]。大型边坡宜采用块体理论或关键块体法, 识别可动块体并计算稳定性系数。

3.2 软弱夹层与潜在滑面的识别

软弱夹层包括原生型、构造型及次生型。识别方法: 钻探岩芯观察、探槽/平硐编录与取样、物探异常验证、地质演化推断古滑面。潜在滑面证据: 钻孔中剪切面、擦痕、定向碎石、磨圆颗粒、渗水点; 探槽中镜面、糜棱化带; 监测数据中的剪应变集中带。确定滑面后, 沿走向及倾向布设控制性剖面, 查明空间形态。

3.3 岩体质量分级

(1) RQD: 根据岩芯中 $\geq 10\text{cm}$ 块长比例计算。RQD $< 25\%$ (极差)、25% ~ 50% (差)、50% ~ 75% (一般)、75% ~ 90% (良好)、90% ~ 100% (优良)。高边坡中 RQD $< 50\%$ 区域需重点关注。(2) RMR 分级: 综合单轴抗压强度、RQD、节理间距、节理条件及地下水影响评分 (0 ~ 100)。RMR ≤ 40 为差岩体, 需系统支护。(3) GSI: 适用于破碎或强结构控制岩体, 通过观察结构面及块体特征估算, 用于 Hoek-Brown 准则。(4) BQ 分级 (国标): 以岩体基本质量 BQ 值为指标, 修正后得 [BQ]。分级结果对应抗剪强度与变形模量建议值。勘察报告应针对不同地层单元及风化带给出 RQD、RMR 或 BQ 值, 并绘制剖面岩体质量分布图。

3.4 岩土参数选取

原则: (1) 以室内试验与原位测试为基础, 按地层、风化程度统计 (剔除异常值后给出均值、标准差、变异系数); (2) 结合岩体质量分级、国标及地区经验综合判断; (3) 结构面及滑带抗剪强度优先采用大型直剪或反分析结果; (4) 考虑工程扰动、干湿循环及长期强度衰减, 峰值强度折减 0.8 ~ 0.9 后提供建议值; (5) 给出参数范围 (最小值、最大值、推荐值) 及保证率 (75% ~ 85%)。主要参数: 天然密度、 c 、 φ 、变形模量 E_0 、泊松比 μ 、抗拉强度、渗透系数 k 、单轴抗压强度 R_c 等。

4 勘察成果在高边坡工程中的运用

4.1 边坡稳定性分析与评价

勘察提供的工程地质模型与力学参数是边坡稳定性定量评价的基础。运用方式包括：（1）基于优势结构面组合，采用赤平投影法初步判定可能失稳模式；（2）对于平面滑动或楔形体滑动，采用极限平衡法（如不平衡推力法、Sarma 法、Janbu 法）计算安全系数，滑面形态根据勘察揭示的结构面产状与钻孔控制点确定；（3）对于土质边坡或破碎岩质边坡，采用圆弧滑动法（Bishop 法、瑞典法）搜索最危险滑面；（4）对于复杂边坡，采用有限元强度折减法或离散元法（UDEC、3DEC）进行数值模拟，分析变形破坏全过程；（5）考虑地下水影响，分别计算天然工况、暴雨工况及地震工况下的安全系数，评价标准参照《建筑边坡工程技术规范》（GB 50330）中的规定（一级边坡 $F_s \geq 1.35$ ，二级 ≥ 1.30 ，三级 ≥ 1.25 ）。勘察报告中应给出各工况下的稳定性评价结论，明确边坡潜在破坏范围及推力大小。

4.2 支护方案比选与设计参数确定

勘察成果直接指导支护结构选型与设计计算。具体运用包括：（1）对于以浅层风化层或覆盖层为主的边坡，建议采用系统锚杆（索）+格构梁+坡面防护的组合支护，锚杆长度与倾角根据滑面位置确定，设计锚固力由极限平衡反算得到；（2）对于受单一结构面控制的平面滑动边坡，建议采用预应力锚索（锚固段深入稳定岩层不少于 4m），锚索间距、吨位根据下滑力与安全系数确定；（3）对于高陡岩质边坡中的倾倒破坏，建议采用深层锚索与钢筋混凝土抗滑桩组合；（4）对于软弱夹层发育的边坡，需设置排水孔或排水隧洞降低地下水位，必要时采用抗滑桩或挡墙穿越夹层；（5）根据 RMR 或 BQ 分级结果，给出系统锚杆的间排距、喷混凝土厚度及钢筋网规格^[4]。勘察报告中应附有推荐支护方案的典型断面图，并标注各结构层与地质界面的空间关系。

4.3 施工监测方案设计

勘察成果为施工期及运营期监测提供了控制目标与布置依据。监测断面应选在勘察剖面位置，监测项目包括：（1）地表位移监测（GPS、全站仪）在坡顶、坡中、坡脚布置测点，间距 20~50m；（2）深层水平位移监测（测斜孔）穿过潜在滑面以下 5~10m；（3）地下

水位监测孔沿边坡剖面布置；（4）锚杆（索）轴力监测；（5）裂缝监测。勘察报告应给出各监测项目的预警阈值，阈值通常取稳定分析极限位移的 60%~70%。

4.4 动态设计配合与信息化施工

高边坡地质条件复杂多变，施工开挖过程中极易揭示新的不良地质体。勘察单位应提供“动态设计配合”服务，包括：对开挖面进行地质编录，核对岩土分界线、结构面产状及风化程度；若发现与勘察成果不符，及时提出补充勘察方案，更新参数与稳定性评价；根据监测数据反演岩土参数，调整支护参数与施工工序。这种“勘察-设计-施工-监测”闭环反馈机制是确保高边坡工程安全的核心手段。

5 结语

高边坡工程勘察是保障安全的基础，任务包括查明地质结构、获取岩土参数、识别潜在滑面及评价稳定性。勘察应分阶段开展，综合运用工程地质测绘、遥感物探、钻探、原位与室内试验等多种手段，其中结构面系统统计、软弱夹层精准识别、岩体质量分级及参数综合取值为核心技术环节。勘察成果为极限平衡与数值模拟提供地质模型与力学参数，指导支护方案比选、锚固设计、监测断面及预警阈值确定，支撑动态设计与信息化施工，形成闭环控制。当前勘察存在投入不足、结构面调查主观性强、参数经验色彩浓厚及数字化水平低等问题，未来应朝向精细化、三维化、智能化及勘察-设计一体化发展，推广三维地质建模、可靠度分析与随钻测量等技术。从业者需认识到勘察并非一次性任务，而是贯穿工程全生命周期的动态过程，只有将成果深度融合于设计与施工，方能实现安全、经济与环保目标。

参考文献

- [1] 李宏俊,赵岩枫,潘少红.岩土工程勘察在高边坡工程中的运用分析[J].产业创新研究,2025,(2):118-120.
- [2] 伍勇.多金属矿高边坡工程治理中对岩土工程勘察的运用分析[J].世界有色金属,2025,(9):133-135.
- [3] 冯禄强.高边坡防护工程的勘察设计关键与施工分析[J].世界有色金属,2021,(5):115-116.
- [4] 隗新.岩土工程勘察在高边坡工程中的应用实践研究[J].建材与装饰,2020,(4):227-228.