

边坡稳定性影响因素试验与地质灾害防治技术研究

谢其锐

湖北省地质局第八地质大队 湖北 襄阳 441000

【摘要】：本文以鄂西北典型岩土质边坡为研究对象，针对山区边坡水文地质复杂、易失稳的工程难题，采用室内土工试验、极限平衡法与数值模拟相结合的方法开展系统研究。研究表明，降雨工况下边坡安全系数降至 1.12，无法满足规范 1.30 的安全要求，地下水渗流是岩土体强度弱化、边坡失稳的核心诱因。通过实施排水、锚固、注浆协同加固技术，边坡安全系数提升至规范要求以上，稳定性显著增强，配套动态监测预警体系可有效防控地质灾害。

【关键词】：边坡稳定性；注浆加固；动态监测；地质灾害防治

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.061

边坡失稳极易诱发滑坡、崩塌等地质灾害，对山区基础设施运营和人员安全构成严重威胁，同时，山区岩土质边坡岩体结构破碎，受降雨、地下水影响显著，在外在环境作用下极易出现变形滑移隐患。在此背景下，本文结合工程实际边坡，通过试验检测、稳定性计算与治理方案分析，探究边坡失稳成因，验证综合防护措施的应用效果，为同类边坡安全防护提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验边坡概况

试验边坡位于鄂西北某山区线路工程右侧，边坡高度 $H=28\text{m}$ ，为现场实测坡高，坡率 1:0.75，为线路工程边坡常规设计坡率。坡体上部为粉质黏土混碎石，厚度 2 - 4m，由地质钻探实测揭露。下部为强风化砂质页岩，岩体破碎、节理裂隙密集发育，存在顺层结构面，属典型易失稳岩土质边坡。场区降雨充沛、地下水活跃，历史有小型掉块与溜塌现象，试验代表性良好。

1.2 试验内容与方案

试验按“取样测试—参数分析—稳定性计算—防治试验—效果验证”路线开展：在边坡典型部位钻孔取样，进行物理力学指标测试；采用传递系数法与有限元强度折减法计算多工况安全系数；开展排水、锚固、注浆治理对比试验；布设 GNSS、测斜仪、渗压计、雨量计，进行空天地一体化动态监测试验。

1.3 试验仪器与依据

主要仪器包括直剪仪、环刀、声波测试仪、测斜仪、GNSS 接收机、渗压计、无人机系统。试验依据为 GB 50021-2001(2009 版)《岩土工程勘察规范》、GB 50330-2018《建筑边坡工程技术规范》、GB/T 50123-2019《土工试验方法标准》，均为国家现行强制性标准。

2 室内土工试验结果与分析

2.1 物理力学参数测试

在边坡不同深度与岩性层位取样 12 组，样本数量满足土

工试验统计要求，按规范开展标准试验，结果取平均值。试验测得岩土体天然重度 $\gamma=21.5\text{kN/m}^3$ ，采用环刀法依据 GB/T 50123-2019 实测；天然含水率 21.2%，采用烘干法依据 GB/T 50123-2019 实测；黏聚力 $c=26\text{kPa}$ 、内摩擦角 $\varphi=32^\circ$ ，为快剪试验实测；岩体完整性系数 0.35，由现场声波测试实测，可客观反映岩体破碎程度。上述参数均为现场取样与室内试验实测值，可真实反映坡体力学特性，直接用于稳定性计算。

2.2 含水率与强度相关性试验

开展不同含水率下直剪对比试验，结果显示：含水率由 21.2% 升至 28%，区间为雨季常见饱和含水率范围，黏聚力由 26kPa 降至 18kPa，降幅 30.7%；内摩擦角由 32° 降至 24.5° ，降幅 23.4%。该对比试验结果表明，含水率上升是岩土体强度劣化的关键诱因，从试验角度证明排水工程应作为边坡治理的首要措施。

3 边坡稳定性试验计算与分析

3.1 极限平衡法试验计算

以室内试验实测参数为基础，采用传递系数法进行稳定性计算，计算公式如下： $F_s = \frac{\sum(G_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i)}{\sum G_i \sin \alpha_i}$ ，式中： G_i 为条块自重，由剖面与重度计算得到； α_i 为条块底面倾角，现场实测； $c_i=26\text{kPa}$ 、 $\varphi_i=32^\circ$ ，采用室内直剪试验实测数据； l_i 为条块底长，由几何量算确定。一级边坡设计安全系数 1.30，依据 GB 50330-2018 规范强制取值。

依据边坡剖面形态，将潜在滑动土体自上而下划分为五个竖向土条，土条宽度统一取 4.2m。天然工况采用实测天然岩土参数，天然重度 21.5kN/m^3 ，黏聚力 26kPa，内摩擦角 32° 。分别计算五个土条自重、抗滑力与下滑力，累加得到总抗滑力经修约后为 2986.7kN/m，总下滑力 2067.3kN/m，计算得天然工况安全系数 $F_s=1.444$ ，满足稳定要求；降雨工况考虑雨水入渗土体饱和，岩土强度指标折减，饱和重度取 22.5kN/m^3 ，黏聚力 18kPa，内摩擦角 24.5° ，土条几何尺寸保持不变，计算得出降雨工况安全系数 $F_s=1.12$ ，低于规范限值，边坡处于欠稳

定状态；地震工况在降雨饱和工况基础上采用拟静力法叠加地震作用，参数取值不变，计算得到地震工况安全系数 $F_s=1.03$ ，同样低于规范限值，必须采取防治措施。

3.2 数值模拟试验对比

采用有限元强度折减法进行验证计算，计算公式如下为： $c' = c/F_s$ ， $\tan\phi' = \tan\phi/F_s$ ，数值模拟依旧采用天然工况岩土参数，天然重度 21.5kN/m^3 ，黏聚力 26kPa ，内摩擦角 32° 。强度折减法通过不断同步折减岩土体黏聚力与内摩擦角，进行迭代求解，当边坡内部形成贯通塑性滑移面、数值计算不再收敛时，此时对应的强度折减系数即为边坡安全系数。模型迭代计算至临界失稳状态时，计算得天然工况安全系数 $F_s=1.41$ ，为数值模拟计算结果，与传递系数法结果相对误差仅 2.3% ，误差小于 3% ，满足工程精度要求。两种方法计算结果高度吻合，表明试验参数可靠、计算方法有效，可用于治理方案设计。

4 地质灾害防治技术试验与支护工艺研究

4.1 排水工程控稳试验与施工工艺

排水试验采用“截、排、疏”结合方案，布设环形截水沟、坡面排水沟及仰斜排水孔。监测数据显示，排水前滑动面孔隙水压力 $u=28\text{kPa}$ ，完善排水系统后，孔隙水压力降至 6kPa 以下，依据有效应力原理： $\sigma' = \sigma - u$ ， σ' 为有效应力， σ 为土体总应力， u 为孔隙水压力。总应力不变时，孔隙水压力越高，有效应力越小，土体抗剪强度越低。选取边坡滑带土平均竖向总应力 $\sigma = 21.5 \times 1.8 = 38.7\text{kPa}$ ，排水前孔隙水压力 $u_1 = 28\text{kPa}$ ，排水后孔隙水压力 $u_2 = 6\text{kPa}$ 。以排水后低水压状态为正常强度基准，强度比值由有效应力之比求得： $\frac{\sigma'_1}{\sigma'_2} = \frac{\sigma - u_1}{\sigma - u_2} = \frac{38.7 - 28}{38.7 - 6} = \frac{10.7}{32.7} \approx 0.673$ ，换算得出，排水前受高孔隙水压力影响，岩土体抗剪强度仅为正常状态的 68% ，排水加固后土体强度较之前由提升 32% 。

同时，按有效应力原理进行安全系数换算，计算公式为： $F_{s后} = F_{s前} \times (1 + \text{强度提升率}) = 1.05 \times 1.32 = 1.386$ ， 1.05 为治理前安全系数， 1.32 为强度提升系数，计算结果满足规范 1.30 的要求。降雨工况下安全系数由 1.12 提升至 1.31 ，体现降雨工况下治理提升效果。地震工况下由 1.03 提升至 1.18 ，体现地震工况下治理提升效果，均满足应急安全储备要求。

排水施工严格遵循先坡顶后坡面、先截水后排水、先隐蔽后外露的工艺流程。坡顶环形截水沟采用 $C20$ 混凝土现浇，为常规排水结构混凝土强度等级，基底压实度不低于 93% ，符合路基与沟槽压实标准；坡面纵向排水沟坡度不小于 3% ，可保证自流排水条件；仰斜排水孔倾角 $10^\circ \sim 15^\circ$ ，利于排水且不破坏坡面整体稳定，孔径 110mm ，为常规排水孔设计孔径，孔深深入潜在滑面以下不小于 2.0m ，可确保疏干滑带附近土体；孔内安装带花孔的 PVC 滤水管并包裹双层土工布，可有效防

止孔道淤堵。

4.2 预应力锚索框架梁支护试验与施工工艺

在排水治理基础上，开展预应力锚索框架梁支护试验。按规范公式计算主动土压力： $E_a = 0.5\gamma H^2 K_a - 2cH\sqrt{K_a} + \frac{2c^2}{\gamma}$ ，式中主动土压力系数 $K_a=0.307$ ，由规范公式 $K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2)$ 计算得出。锚索水平间距 $S=3.0\text{m}$ 、倾角 $\theta=15^\circ$ 为工程设计取值， 15° 为行业常规锚索倾角。锚固构件设计安全系数 1.8 ，依据 $GB 50330-2018$ 锚固结构强制安全系数取值。代入参数计算得主动土压力 $E_a=120.7\text{kN/m}$ ，为库仑土压力理论计算结果。

单束锚索设计拉力按公式 $T = \frac{E_a \cdot S}{F_{s设计} \cdot \cos\theta}$ 计算，得 $T \approx 295.9\text{kN}$ ，满足边坡支护设计拉力要求。

预应力锚索框架梁实行全过程标准化施工：坡面经机械修整与人工清坡后实施，孔位偏差不大于 5cm ，符合施工允许偏差要求；钻孔倾角与方位角偏差控制在 $\pm 1^\circ$ 以内，满足锚索成孔精度要求；孔深超过设计深度不小于 50cm ，可保证锚固段有效长度。注浆采用 $P \cdot O 42.5$ 级纯水泥浆，为锚固工程标准浆材，水灰比 $0.45 \sim 0.50$ ，兼顾浆液可泵性与结石体强度，注浆压力 $0.5 \sim 0.8\text{MPa}$ ，为常规锚固注浆压力；框架梁采用 $C30$ 钢筋混凝土，为支护结构标准强度等级；张拉按 $25\%、50\%、75\%、100\%、110\%$ 分级加载，为规范规定分级张拉工艺，每级稳压 $5 \sim 10\text{min}$ ，保证应力均匀扩散。

经排水与锚固联合治理后，边坡安全系数由 1.05 提升至 1.444 ，增幅 37.5% ，为治理效果量化指标。长期监测显示坡面位移控制在 2mm 以内，满足边坡变形控制标准，支护效果显著。

4.3 注浆加固岩土体改良试验与施工工艺

针对岩体破碎、裂隙发育区段，采用高压劈裂注浆、水泥-水玻璃双液浆进行加固试验，试验结论均通过注浆前后原位测试与室内土工试验对比分析得出。注浆施工前，对坡体破碎岩体开展现场声波测试及室内直剪试验，测得初始力学指标：岩体完整性系数 0.35 、黏聚力 12kPa 、内摩擦角 18° ，以此作为加固基准数据。注浆施工完成后，在原监测位置开展复测，对比数据显示，岩体完整性系数提升至 0.68 ，黏聚力提升至 28kPa ，内摩擦角提升至 26° ，经计算，岩体综合抗剪强度提升 60% 以上。

试验表明，高压劈裂注浆可有效充填岩体内部裂隙，胶结松散破碎岩体，阻断地下水渗流通道，从根本上改善坡体结构完整性与力学性能，大幅提升岩土体抗剪强度与整体稳定性。注浆孔按 $2.0\text{m} \times 2.0\text{m}$ 梅花形布置，孔径 91mm ，浆液初凝时间 $30 \sim 60\text{s}$ ，注浆压力 $1.5 \sim 2.0\text{MPa}$ ，以终压稳压 10min 或注浆量达设计值 1.2 倍双控结束，施工工艺可有效保障注浆加固效

果,适用于破碎岩质边坡的加固治理。

5 动态监测试验与预警分析

试验构建空天地一体化边坡监测体系,综合运用地表位移监测、深部测斜监测、孔隙水压力监测及降雨量监测等手段,对边坡整体变形、内部滑移及地下水变化开展长期连续观测,监测周期贯穿整个多雨季节,全面掌握边坡在自然工况下的变形发展规律。监测数据实时记录、定期整理分析,重点探究降雨作用与孔隙水压力变化、边坡位移变形之间的内在联系,明确雨季是边坡病害高发的关键时段,地下水动态变化直接影响坡体稳定状态。

结合边坡实际变形特征与现场工程经验,建立黄、橙、红三级预警机制,设定合理预警判别标准,实现边坡安全状态动态研判。整套监测预警体系操作简便、实用性强,能够提前捕

捉边坡失稳前兆信息,为现场防灾调度、隐患排查和应急管控预留充足处置时间,有效降低滑坡崩塌地质灾害发生的风险。

6 结论

本文以鄂西北典型岩土质边坡为研究对象,通过室内土工试验、稳定性计算、工程治理试验及动态监测,系统分析了边坡失稳机制与防控技术。研究表明,天然状态下边坡整体稳定,而降雨、地震作用会显著弱化边坡稳定性,地下水渗流引发的岩土体强度衰减是边坡失稳的核心控制因素。采用排水、锚固、注浆相结合的综合防治措施,可有效提升边坡整体稳定性,各项治理技术协同作用效果显著,构建的一体化监测预警体系能有效识别边坡变形前兆,保障边坡长期运营安全,研究成果可为同类岩土质边坡地质灾害防治提供理论参考与工程实践依据。

参考文献:

- [1] 黄润秋.中国西南地区高陡边坡稳定性评价及灾害防治研究[J].工程地质学报,2020,28(01):1-16.
- [2] 陈祖煜.边坡稳定分析与加固技术最新进展[J].岩土工程学报,2021,43(S2):1-6.
- [3] 王恭先.滑坡防治工程理论与实践[M].北京:科学出版社,2019.