

深厚残积土地区滑坡稳定性数值模拟与敏感性分析

李建洪

云南省地质工程勘察有限公司 云南昆明 650051

摘要: 深厚残积土作为花岗岩等母岩经长期风化残留形成的特殊性土体, 其分布区域常因土体结构复杂、力学性质易变等特征成为滑坡灾害高发区。滑坡稳定性评价是区域地质灾害防控的核心环节, 而数值模拟与敏感性分析为揭示其失稳机制、识别关键影响因素提供了科学手段。本文基于深厚残积土的物质组成与结构特性, 系统阐述滑坡稳定性数值模拟的核心方法, 包括渗流场-应力场耦合模拟、变形演化过程模拟及稳定性状态量化等关键技术; 深入分析敏感性分析的实施路径, 明确内在土体参数与外部环境因素的影响权重; 结合工程实践需求探讨模拟结果的应用价值, 为深厚残积土地区滑坡灾害的精准防控提供理论支撑与技术参考。

关键词: 深厚残积土; 滑坡稳定性; 数值模拟; 敏感性分析; 渗流场-应力场耦合

引言

深厚残积土由花岗岩等母岩长期风化形成, 因结构复杂、力学性质易变, 其分布区成为滑坡高发地带, 严重威胁交通、城镇安全与生态环境。滑坡稳定性评价是灾害防控核心, 数值模拟与敏感性分析则是揭示失稳机制、识别关键影响因素的关键手段。本文立足深厚残积土物质组成与结构特性, 系统阐述滑坡稳定性数值模拟核心方法, 深入分析敏感性分析实施路径, 探讨模拟结果应用价值, 旨在为该类地区滑坡精准防控提供理论支撑与技术参考。

一、深厚残积土的物质组成与力学特性

(一) 物质组成与结构特征

深厚残积土物质组成继承母岩, 以花岗岩残积土为典型, 含40%~60%粗颗粒石英(构骨架定强度)、20%~35%片状黏土矿物(致水敏感性)及少量长石蚀变产物。

宏观上, 其自上而下分红土层、砂土层, 下部与风化花岗岩交错接触, 力学性质沿深度差异显著; 微观以团聚体存在, 靠黏土胶结与颗粒摩擦稳定, 内部及颗粒间含大量孔隙、微裂隙, 孔隙比0.6~0.9(均值0.75)。

特殊组成与结构使其具“遇水软化、失水收缩”特

性: 雨水入渗削弱胶结致结构松散, 干燥收缩产生的微裂隙又助雨水入渗, 形成强度降低恶性循环。

(二) 力学性质的动态变化规律

深厚残积土力学性质核心为抗剪强度、压缩性与渗透性, 受含水率、孔隙水压力等因素调控。抗剪强度由粘聚力与内摩擦角表征, 二者随含水率升高显著降低, 从天然到饱和状态, 粘聚力下降30%~50%, 内摩擦角下降 10° ~ 15° , 与黏土矿物吸水弱化颗粒间作用力直接相关。

渗透性具显著各向异性, 平行层理方向渗透系数是垂直方向的3~5倍, 因黏土矿物定向排列, 雨水易沿层理渗透, 在残积土与基岩界面形成滞水带。降雨入渗使孔隙水压力升高、有效应力降低, 间接削弱抗剪强度, 成为滑坡重要诱因。

孔隙比反映密实度, 越小则颗粒排列越密, 抗剪强度越高、压缩性越低; 反之结构疏松易破坏。长期干湿循环与荷载作用下, 土体力学性质不可逆劣化, 粘聚力与压缩模量下降, 滑坡风险增加^[1]。

二、深厚残积土滑坡稳定性数值模拟方法

(一) 模拟模型构建与参数选取

数值模拟准确性依赖合理建模, 需以深厚残积土地质结构为基础, 明确边界条件、地层划分与计算范围。纵向涵盖完整残积土层及下部风化基岩, 横向延伸至边坡影响范围1.5~2.0倍以消边界效应; 底部设固定约束, 两侧水平约束, 顶部自由, 按实际地形定边坡形态。

地层划分需体现分层特征, 红土层、砂土层、风化

作者简介: 李建洪(1980.11--), 男, 汉族, 云南泸西人, 职称: 工程师, 学历: 本科, 研究方向: 地质灾害、矿山生态修复方面。

花岗岩各为独立单元，单元间设接触面单元；裂隙区加密网格或设裂隙单元，潜在滑动带等关键区网格尺寸控制在0.5~1.0米。

参数选取需室内试验、现场测试与工程类比结合；物理参数借原状土样试验得，力学参数用三轴剪切试验、渗透试验测，接触面参数取相邻土体参数0.7~0.9倍，难直接获取的参数用反分析法修正。

（二）渗流场与应力场耦合模拟

深厚残积土滑坡孕育是渗流场与应力场相互作用的结果，耦合模拟是揭示其机制的关键，核心是建立渗流与应力平衡方程联立体系，实现水分运移与力学响应同步计算。

渗流场模拟用Richards方程描述非饱和土水分运移，以降雨强度为边界条件，设不同降雨工况，兼顾地表径流与植被截留，重点监测孔隙水压力时空变化，尤其是残积土与基岩界面的压力增量^[2]。

应力场模拟基于弹塑性力学，用Mohr-Coulomb准则判断塑性变形，借有效应力公式更新应力状态。耦合关键在时间步长协调，以迭代法交替进行渗流与应力计算。通过耦合模拟可呈现滑坡“初始-入渗-发展-失稳”四阶段演化过程。

（三）变形演化与稳定性量化

变形演化模拟通过在边坡不同高程设监测点，追踪水平与垂直位移，以位移速率划分阶段： $<0.1\text{mm/d}$ 为稳定， $0.1\sim 1.0\text{mm/d}$ 为缓慢变形， $>1.0\text{mm/d}$ 为加速变形。其变形具空间差异性，上部张拉、中部剪切、下部压缩，变形集中区与潜在滑动带吻合，降雨会使其贯通成滑动面，剪切变形的剪胀效应短期抑变形，降雨超补偿能力则加速变形。

稳定性量化用稳定性系数（强度折减法算， >1.2 稳定、 $1.0\sim 1.2$ 基本稳定、 <1.0 失稳）与塑性区贯通度（ $>80\%$ 近失稳临界）。不同工况下，天然状态系数 $1.2\sim 1.5$ ，中等降雨 $1.1\sim 1.3$ ，暴雨 <1.0 ，与现场观测一致，验证模拟可靠性。

三、深厚残积土滑坡敏感性分析

（一）敏感性分析的核心方法

敏感性分析旨在定量识别各因素对滑坡稳定性的影响程度，为防控提供靶向依据，核心是通过改变单因素取值观测稳定性系数变化，实际多采用正交设计与方差分析结合的方法。

正交设计选标准正交表安排试验，选4~6个关键

因素、各设3~5个水平，据正交表确定因素水平组合方案，每个方案对应一组数值模拟，可减计算量且获全面结果^[3]。

方差分析用SPSS等软件处理结果，算F值判影响显著性，借P值分极显著（ $P<0.01$ ）、显著（ $0.01\leq P<0.05$ ）、不显著（ $P\geq 0.05$ ），算因素贡献率实现敏感程度量化排序。

（二）内在土体参数的敏感性排序

内在土体参数是滑坡稳定性的根本影响因素，含抗剪强度参数（粘聚力 c 、内摩擦角 ϕ ）、物理状态参数（天然重度 γ 、孔隙比 e ）及渗透性参数（渗透系数 k ），其敏感性存在明确优先级。

抗剪强度参数最敏感，内摩擦角敏感性高于粘聚力：内摩擦角每降 1° ，稳定性系数平均降 $0.05\sim 0.08$ ；粘聚力每降 10kPa ，系数降 $0.03\sim 0.06$ ，因内摩擦角对颗粒间摩擦咬合作用影响更关键。

物理状态参数中，孔隙比敏感性高于天然重度：孔隙比每增 0.1 ，系数降 $0.04\sim 0.07$ ；天然重度每变 1kN/m^3 ，系数仅变 $0.02\sim 0.03$ ，仅高边坡下影响显著。

渗透系数敏感性与降雨相关，暴雨时其每增一个数量级，系数降 $0.06\sim 0.09$ ，无降雨时敏感性最低。综上，内在参数敏感性排序为：内摩擦角 $>$ 孔隙比 $>$ 粘聚力 $>$ 渗透系数 $>$ 天然重度。

（三）外部环境因素的影响机制

外部环境因素（降雨、边坡形态、人类活动）通过改变土体内在性质间接影响滑坡稳定性，其协同作用常为滑坡直接诱因，敏感性分析可明确其临界阈值与影响权重。

降雨是核心触发因素，强度敏感性高于持续时间：降雨强度超 $10\sim 20\text{mm/h}$ 时，稳定性系数显著下降；持续超24小时后，系数下降趋缓。前期降雨使土体初始含水率升高，会增强对降雨的敏感性。

边坡形态中，坡角敏感性最高，每增 5° 系数降 $0.10\sim 0.15$ ，超 35° 时边坡对其他因素更敏感；坡高影响呈非线性，超15米后系数下降加快，与自重应力累积相关。

人类活动里，坡脚开挖敏感性远高于坡顶加载：开挖深每增1米系数降 $0.08\sim 0.12$ ，加载每增 10kPa 系数降 $0.03\sim 0.05$ 。排水系统破坏会使其他因素敏感性提 $10\%\sim 20\%$ ，需重点防控。

四、模拟与分析结果的工程应用

（一）滑坡隐患点精准识别

数值模拟与敏感性分析为深厚残积土滑坡隐患识别

提供依据。通过批量模拟区域边坡，按稳定性系数分高 (<1.0)、中 ($1.0 \leq \sim <1.2$)、低 (≥ 1.2) 风险级，完成初步筛查。

结合敏感性分析复核中高风险边坡：内摩擦角低、孔隙比大的临界系数边坡，及大坡角暴雨区边坡，需评估极端天气失稳概率，“模拟分级+敏感复核”可避免漏误判。

动态识别靠监测阈值：以水平位移速率 1.0mm/d 、孔隙水压力增量 50kPa 为预警值，监测数据达阈值时，结合敏感因素实时状态判风险，如孔隙水压骤升且坡脚开挖，立即启动高级预警^[4]。

(二) 滑坡治理方案优化设计

模拟与分析结果指导治理方案优化，通过调控敏感因素平衡效果与经济性：内摩擦角敏感滑坡用碎石桩增强颗粒咬合，孔隙比大的边坡用强夯或真空预压提密实度。

排水设计依渗流模拟，孔隙水压集中区设仰斜排水孔（穿残积土至基岩），间距据渗透系数定（系数大则间距小，常 $3\sim 5$ 米）；降雨敏感区配截水沟与防渗层减入渗。

支挡设计结合稳定性与敏感因素：坡角敏感边坡用挡土墙（墙高据系数缺口算），滑动带明确的用抗滑桩（桩长穿滑动带至基岩，间距依剪应力模拟优化）。优化后稳定性系数超 1.3 ，造价降 $15\%\sim 20\%$ 。

(三) 监测方案靶向制定

敏感性分析为监测方案制定提供指导，可高效配置资源。针对内摩擦角、孔隙比等内在敏感参数，设土体力学监测点，用原位剪切试验仪测抗剪强度，借孔隙水压力计监测压力变化；对降雨、坡脚开挖等外部因素，配雨量计、位移计等设备。

监测点布置聚焦关键区域：依变形模拟的塑性区分布，在边坡中上部变形集中区加密位移监测点（间距 $5\sim 8$ 米）；在残积土与基岩界面孔隙水压峰值区，设深层监测点（覆盖整个滑动带）；坡脚人类活动频繁区，增设地表裂缝监测仪追踪发育^[5]。

监测频率结合因素敏感性时间特征：暴雨季降雨敏感性高，监测从每日1次加密至每2小时1次；坡脚开挖期间同步增频次，直至工程结束且边坡稳定。该方案可降成本、全面捕捉关键信息。

结论

本文围绕深厚残积土地区滑坡稳定性展开研究，得出核心结论如下：深厚残积土的石英-黏土矿物组成及孔隙-裂隙结构，决定其力学性质的水敏感性与各向异性，是滑坡易发性的内在根源；渗流场-应力场耦合模拟可有效还原滑坡“入渗-发展-失稳”全过程，稳定性系数与塑性区贯通度能精准量化稳定状态；敏感性分析表明，内在参数中内摩擦角影响最显著，外部因素中降雨强度与坡角为关键触发因子；模拟与分析结果可支撑隐患点识别、治理方案优化及监测方案制定，为深厚残积土地区滑坡灾害科学防控提供可靠的理论依据与技术路径。

参考文献

- [1] 赵建军, 潘浩楠, 贺建先, 等. 构造混杂岩带软弱基座型滑坡形成机制研究——以白格滑坡为例 [J]. 人民长江, 2025, 56 (09): 20-32.
- [2] 郭德庆, 张宇, 黄宇, 等. 基于信息量-逻辑回归模型雅安市雨城区滑坡危险性评价 [J]. 地下水, 2025, 47 (05): 119-122.
- [3] 黄发明, 杨阳, 蒋水华, 等. 滑坡易发性关键问题综述及其基于半监督非对称理论的解决方案 [J/OL]. 岩石力学与工程学报, 1-30 [2025-10-04]. <https://doi.org/10.3724/1000-6915.jrme.2024.1003>.
- [4] 陈波. 考虑岩石裂隙扩展特征的滑坡敏感性三维识别模型研究 [J]. 安徽地质, 2025, 35 (03): 241-245.
- [5] 白千千, 任皓晨. 滑坡灾害治理中抗滑桩工程单价敏感性分析 [J]. 建筑机械, 2025, (09): 63-66.