

膨胀土地区光伏电站滑坡的稳定性及治理方案研究

文 / 黄 佳 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

摘要: 在某光伏电站发展过程中, 频繁出现滑坡事故, 其中由于膨胀土引起的滑坡占比较大。膨胀土滑坡是目前最独特的土滑坡, 很容易产生各种工程地质问题, 严重威胁到人民生命财产安全。基于此, 本文以十堰郧阳区某光伏电站滑坡为主要研究对象, 在分析滑坡概况、物质组成的基础上, 结合光伏电站滑坡变形特征、位移监测数据进行滑坡稳定性分析, 并提出相关治理方案, 有助于控制十堰郧阳区膨胀土的防灾减灾作业。

关键词: 膨胀土滑坡; 变形特征; 稳定性; 数值模拟

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.17.074

引言

膨胀土是一种富含蒙脱石、伊利石、高岭石等黏土矿物的特殊土体, 由于其自身具有明显的吸水膨胀、失水收缩特性, 在膨胀土中表现出高度的不稳定性, 很容易增加膨胀土地区滑坡问题的解决难度系数。本研究以十堰郧阳区某光伏电站滑坡为对象, 通过岩土体成分分析、地质力学特征解译及多源监测数据融合, 系统解析滑坡体稳定性演化规律。提出了针对性的防治措施。

一、工程概况

该滑坡体位于十堰市郧阳区丘陵地貌区, 整体地形北高南低, 高程介于 152.0-220.5m 之间, 相对高差 68.5m。滑坡体主滑方向为南偏西 5°, 坡度 15° - 25°, 平面形态呈不规则舌状, 剖面呈阶梯状折线型, 滑体平均厚度 12m, 总方量约 206.4 万 m³, 属大型土质滑坡。区域地质构造复杂, 出露地层包含第四系松散堆积层、白垩系寺沟组碎屑岩(砂砾岩、粉质黏土岩)及震旦系灯影组碳酸盐岩(白云质灰岩), 岩体结构面发育特征对滑坡形成具有显著控制作用。通过系统分析滑

坡体物质组成、结构特征及变形监测数据, 本研究旨在揭示该光伏电站滑坡的稳定性演化规律。

二、变形特征

在膨胀土地区光伏电站滑坡的变形监测分析中, 2023 年布置了全面的监测工程, 科学评估滑坡体的稳定性及变形规律。共布置 3 纵 2 横共 5 条监测剖面, 沿 3 条纵剖面布设 G1—G8 共 8 个 GNSS 地表位移监测点, 这些监测点能够实时获取滑坡体的地表位移数据, 为后续分析提供有力依据。通过分析 2023 年 6 月至 11 月期间的监测数据发现, 滑坡体位移变形和库水位变化、降雨事件直接相关在库区水位抬升过程中, 坡体呈现多级位移响应特征。初期阶段, 库水通过毛细作用向土体内部持续渗流, 形成指向坡体内部的渗透压强梯度, 该力学效应显著改变坡体应力场分布。随着浸润过程持续, 当浸润锋面达到动态平衡后, 渗透压强梯度逐渐衰减, 此时库水浮力效应导致岩土体有效应力降低。特别是在每次强降雨后, 滑坡体的变形速率明显加快, 表明降雨是诱发滑坡加速变形的重要因素。见图 1。

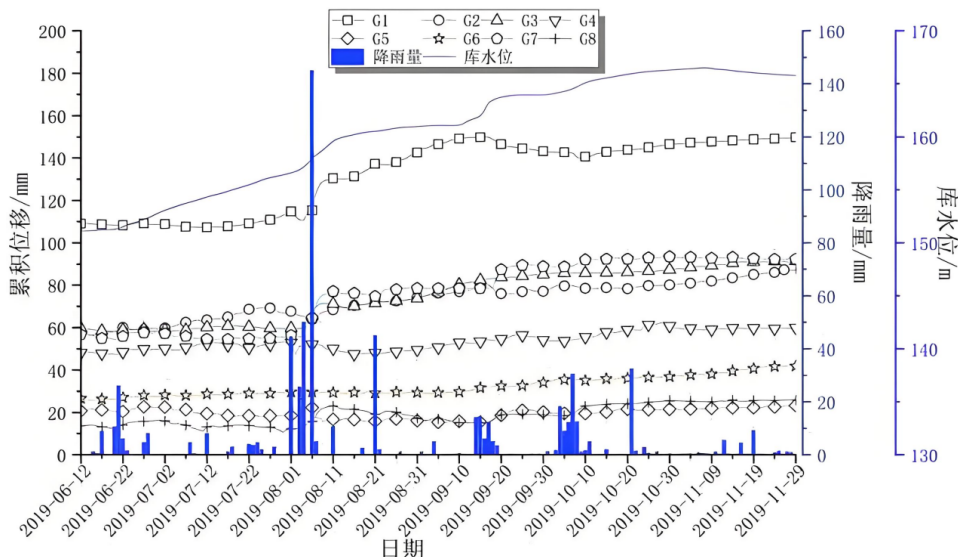


图 1 累计位移曲线 (2023 年 6 月至 11 月)

三、滑坡稳定性数值模拟分析

(一) 模型建立

基于金岗村光伏电站滑坡的地质资料与变形监测数据，构建该滑坡的地质模型，基于典型剖面 2-2' 构建平面应变数值模型（见图 2），模型尺度设定为纵向 280m×垂向 64m。垂向分层结构包含滑动体、滑动带及基岩面三个地质单元：滑动体由含砾黏土构成，滑动带为重塑黏土层，基岩面由砂砾岩构成。岩土体物理力学参数通过室内试验与原测试获取，参数赋值严格遵循地质勘查数据（见表 1），确保数值模型真实反映工程地质条件。为了提高计算精度，模型采用单元格尺寸为 2 m 的网格划分方法，共生成四边形单元和三角形单元共计 2 939 个，节点数量为 3 086 个，有效捕捉滑坡体内部应力场和位移场的变化特征，在保证计算效率的同时，满足数值模拟的精度要求。

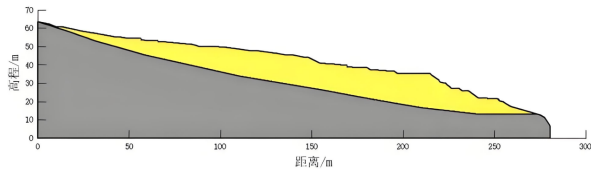


图 2 2-2' 剖面计算模型

表 1 滑坡数值模拟参数设置

参数名称	滑体	滑带	滑床
含水率 W (%)	19.4	23.4	—
泊松比 ν	0.3	0.3	0.25
粘聚力 c (kPa)	27	26	110
内摩擦角 φ (°)	17	16.5	33
重度 γ (kN·m ⁻³)	18.9	18.9	25.3

(二) 边界条件与计算工况

根据表 1 中滑床、滑体的物理力学参数，在模型材料方面进行参数应用，综合考虑坡体自重的影响，进一步提高模型的真实性和准确性。在滑体离散化处理过程中，相邻块体间显著的横向嵌固效应会制约膨胀变形的发展，因此需将块体间相互作用力纳入系统内力平衡分析，仅保留垂直作用于滑动面的有效膨胀分量。数值模拟中，针对饱水工况下的滑动带，施加法向应力边界条件（见图 3），通过设定 26kPa 的膨胀力 P_e 值准确量化膨胀力对边坡稳定性的影响效应，该参数设定严格遵循膨胀土吸水膨胀力学特性。

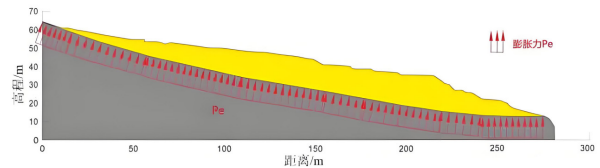


图 3 膨胀力边界条件设置

基于多源监测数据融合分析，构建极端气候与库水位联合作用工况组合^[1]。设定暴雨强度为 120 mm/d（对应百年一遇降雨等级），同步模拟库水位变幅速率 1.68 mm/d 的动态过程，重点研究库水位高位运行与强降雨入渗耦合作用下滑坡体的力学响应特征，真实反映膨胀土地区常见的水文地质条件，研究目前可能引发滑坡失稳的关键因素。

(三) 模拟结果

在膨胀土地区光伏电站滑坡的稳定性数值模拟分析中，针对库水位变化与降雨共同作用下的孔隙水压力分布特征进行研究，该工况模拟设定库水位从初始状态开始快速上升，数值模拟设置库水位在第 12 天达峰后维持该水位至第 35 天，随后叠加降雨边界条件开展耦合效应分析。监测数据显示，在库水位爬升期，坡脚区域因库水入渗作用产生超孔隙水压力显著累积现象，研究库水位骤升对坡体内部渗流场的强烈扰动效应，尤其在临空面附近形成明显的渗透压强梯度^[2]。当库水位运行至第 35 天时，库水已经深入坡体内部，孔隙水压力等值线的弯曲幅度逐渐减小，反映坡体内部水分分布趋于均匀，同时坡体的浸润锋逐渐稳定。随后，在施加降雨边界条件后，至降雨第 5 天时，坡体内的孔隙水压力等值线呈现向上发展的趋势，特别是在坡体后缘出现明显的孔隙水压力集中区域，主要原因后缘坡面形态的影响，局部积水导致下方坡体孔隙水压力进一步增加，从而加剧了滑坡体的不稳定性。在降雨持续至第 25 天及第 40 天时，孔隙水压力场等值线梯度趋于平缓，表明土体介质已接近完全饱和状态，孔隙水压力分布趋于稳定，大幅度降低滑坡体的有效应力，甚至进一步减少抗剪强度，从而加剧滑坡失稳的风险^[3]。

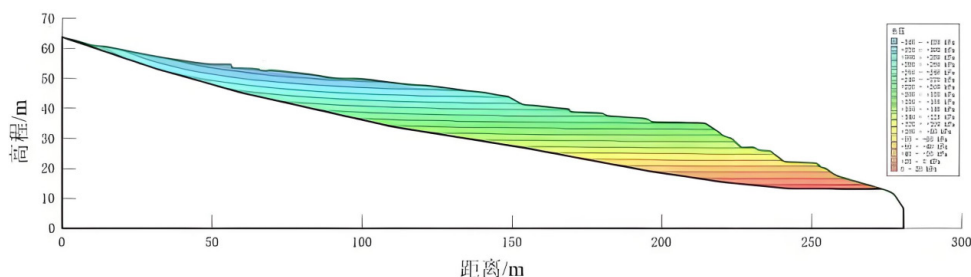


图 4 库水位上升第 5 天

在膨胀土地区光伏电站滑坡的稳定性数值模拟分析中，在滑坡前缘布设监测点 D1 进行连续位移监测，其时程曲线显示，库水位抬升期间该测点位移未发生显著变化，表明滑坡体处于力学平衡状态；当叠加降雨工况后，位移速率显著提升，且随降雨历时呈非线性增长趋势，至模拟终止时累计位移达 689.1 mm^[4]。持续降雨过程中，土体基质吸力持续降低，孔隙水压力场的重构导致有效应力场进一步衰减，滑带土体抗剪强度参数呈现渐进式劣化，最终形成加速变形趋势。同时，坡面径流的冲刷作用加剧坡表土体的侵蚀，导致滑坡前缘区域发生明显变形，监测点 D1 的位移量随之进一步增大。

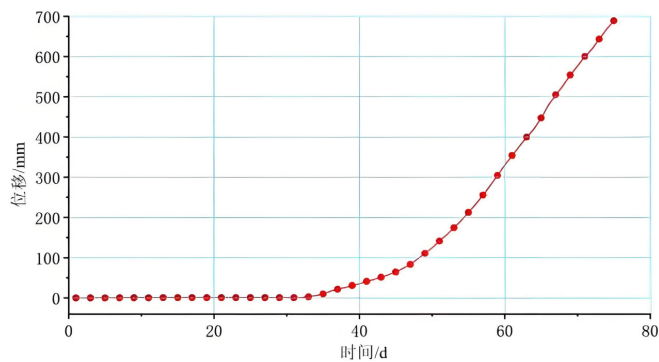


图 5 监测点 D1 位移变化曲线

采用 M-P 法，真实模拟膨胀土地区光伏电站滑坡的稳定性，其变化曲线如图 6 所示。从图中可以看出，在库水位上升阶段滑坡整体稳定性变化相对较小，但其稳定性系数呈现轻微下降趋势，最终稳定在 1.16 左右。研究现象表明，尽管库水位上升给滑坡稳定性产生了一定影响，但由于坡体内部没有达到完全饱和状态，滑带土体的抗剪强度一直维持在稳定性。在降雨事件启动后，边坡安全系数呈现显著劣化趋势，在降雨历时累积效应下，稳定性指标持续衰减，至模拟终止时安全系数跌破 0.854 临界阈值，系统进入失稳状态。该演变过程揭示降雨入渗是触发滑坡系统失稳的核心驱动因素^[5]。综合分析认为，在库水位高水位运行期间，降雨通过渗入坡体增加孔隙水压力，降低滑带土体的有效应力和抗剪强度，急剧下降滑坡的稳定性^[6]。此外，降雨可能引发坡体表层土体的冲刷和侵蚀，进一步加剧滑坡的失稳风险，所以在膨胀土地区的滑坡稳定性分析中，工作人员要充分考虑库水位变化和降雨耦合作用的影响，结合实际地质条件，制定科学的监测和防治措施，有效降低滑坡灾害的发生概率^[7]。针对上述问题，工作人员在防治中要采用挡土墙 + 截排水沟 + 抗滑桩 + 格宾石笼护坡 + 监测工程进行防护。

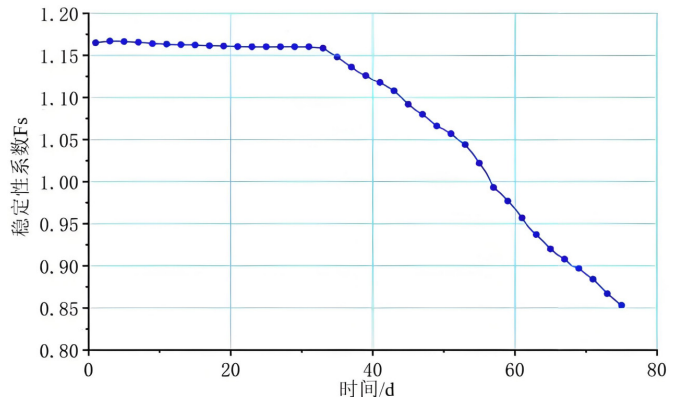


图 6 稳定性系数随时间变化关系曲线

结语

基于数值模拟结果，该膨胀土滑坡体当前变形破坏机制呈现渐进式剪切蠕变特征，局部区域伴随膨胀土的胀缩效应，但整体稳定性仍处于临界状态，没有发生系统性失稳破坏，建议采用“挡土墙 + 截排水沟 + 抗滑桩 + 格宾石笼护坡 + 监测工程”的综合防护措施，进一步提高滑坡体的整体稳定性，科学降低灾害风险。而当前研究仍存在一定局限性，如深入探讨膨胀土特性的长期变化规律及多场耦合作用下的滑坡演化机制。因此，在未来研究中，进一步结合现场监测数据技术，优化滑坡稳定性分析模型，研究高效、经济的治理方案，为类似工程提供科学的实践指导。

参考文献

- [1] 王海明, 朱殿之, 丁玉涛, 等. 强降雨作用下黄土-泥岩接触面滑坡模型试验及稳定性研究[J]. 地震工程学报, 2025, (2): 361-369, 392.
- [2] 胡文奎, 薛明华, 刘卫卫, 等. 滑坡稳定性可靠度及岩土参数敏感性研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2025, (1): 156-162.
- [3] 覃晓晖. 山区公路多级滑面条件下的堆积体滑坡稳定性分析[J]. 交通世界, 2025 (7): 59-61.
- [4] 马文成, 高建强. 西藏 G318 升级改造工程中的深层古滑坡稳定性分析及治理措施[J]. 交通世界, 2025 (4): 102-104.
- [5] 邹安兴, 曾勇, 郑付刚. 牙根一级水电站章给寨滑坡稳定性分析[J]. 水电站设计, 2025, (1): 39-43.
- [6] 负凌焱, 王俊亚. 响水社区堆积层滑坡形成机制和稳定性分析[J]. 能源技术与管理, 2025, (1): 131-134.
- [7] 王芷琪, 杨建华, 王永刚, 等. 营上变电站滑坡暴雨工况下稳定性分析及支护方案研究[J]. 科技创新与应用, 2025, 15 (1): 91-96.