

# 巫山县龙头山滑坡地表位移监测特征与变形机理分析

林高聪<sup>1,2)</sup>, 史学磊<sup>1,2)</sup>, 张雪<sup>1,2)</sup>, 李兴虎<sup>1,2)</sup>

1) 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北保定, 071051;

2) 自然资源部三峡库区地质灾害监测预警野外科学观测基地, 重庆, 404100

**关键词:** 滑坡监测; 地表位移; 变形机理

为探讨三峡库区新日降幅条件对滑坡的影响及其变形机理, 选取巫山县龙山滑坡为例, 通过对其 2007 年至 2022 年期间重点时段地表位移监测数据对比分析, 核验其地表变形特征与库水位升降响应关系, 分析与验证新日降幅试验运行期间变形特征与趋势, 探讨了龙头山滑坡变形破坏机理。分析表明: 库水位上升是巫山县龙头山滑坡变形的主导因素, 2022 年 5 月 20 日至 6 月 15 日库水位消落期日降幅由 0.6 m 提高至 1 m 期间, 监测点变形量未有增大, 数值模拟结果显示滑坡的整体稳定性系数随库水位由 145 m 至 175 m 上升而逐渐减小, 库水位在 175 m 下降至 145 m 阶段, 滑坡的稳定性系数表现出增大的趋势, 总体表现为库水位上升作用下的“浮托减重型”滑坡变形破坏机理。

## 1 龙头山滑坡基本概况

龙头山滑坡位于重庆市巫山县大溪乡长江支流大溪河右岸官田村 1、7 组, 距河口 (到长江) 1.5 km, 为涉水滑坡。地理坐标: E 109°37'11.13", N 30°59'23.27"。

滑坡前缘直抵大溪河, 高程 135~140 m, 后缘高程 270~275 m, 两侧以山脊和冲沟为界。滑坡体纵长 485 m, 宽 205~640 m, 上窄下宽, 平面形态呈“三角箕形”。滑坡主滑方向约 310°, 滑坡体面积  $16.6 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 滑坡体厚度 25~50 m, 平均厚约 40 m, 体积  $664 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑体由灰—灰白色、深灰色、紫红色泥岩, 碎块石土夹粉质粘土及碎块石土构成, 渗透性中等。滑床物质主要为三叠系中统巴

东组浅灰色、灰绿色泥灰岩, 局部夹紫红色、浅灰色中厚层泥岩, 滑面形态呈现后部陡, 前部平缓的“折线型”形态。滑体内威胁居民 11 户 47 人及过往车辆与码头安全。

## 2 滑坡地表位移监测特征

2006 年 9 月在该滑坡体上布设 9 个人工 GPS 地表位移监测点, 监测周期为 2007 年至 2016 年; 2016 年 7 月在滑坡体上布设 7 个自动化 GNSS 监测点 (图 1), 形成 3 条纵向监测剖面, 监测运行至今。

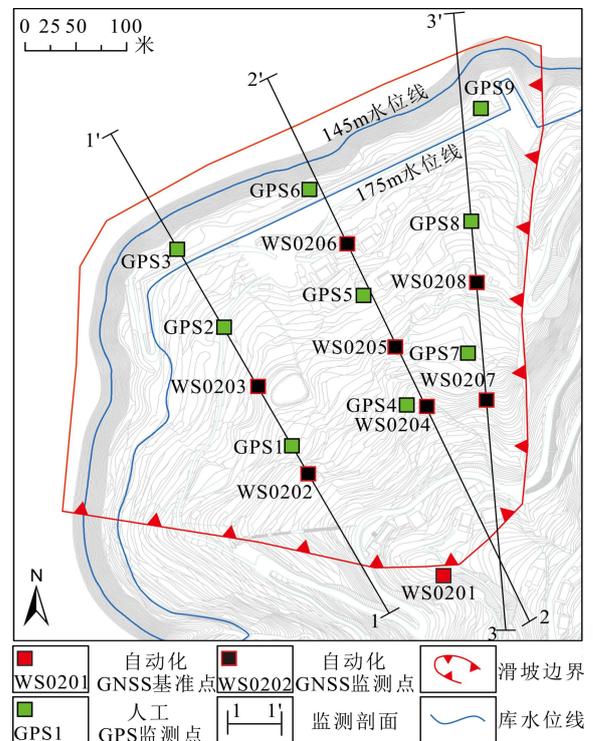


图 1 龙头山滑坡监测平面布置图

注: 本文为中国地质调查局地质调查三级项目《西部陆海新通道地质安全风险调查评价》(编号: DD20221813) 的成果。

收稿日期: 2023-04-10; 改回日期: 2023-04-30; 责任编辑: 方向。DOI: 10.16509/j.georeview.2023.s1.215

作者简介: 林高聪, 男, 1989 年生, 硕士, 工程师, 主要从事地质灾害调查评价与监测预警; Email: lingaocong@mail.cgs.gov.cn。

人工 GPS 监测成果显示 2007 年至 2016 年, 滑坡前缘变形最大, 变形量由前缘至后缘逐渐减小, 后缘和左右边界附近无显著变形, 其中滑坡中部前缘 GPS5 变形最大, 达 516.1 mm, 滑坡左侧前缘 GPS3 位移次之, 达 380.0 mm, 滑坡中部累计变形 258.6 mm, 其余监测点 2007 至 2016 年间变形不明显, 监测结果显示了滑坡前缘部位是受库水消落影响的主要区域。

2008~2016 年龙头山滑坡经历了 9 个库水位升降过程 (通常为每年的 9 月至 11 月), 而 9 个库水上升期间累积位移变形曲线对应出现了 5 次明显的阶跃式增加。其中龙头山滑坡左侧前缘及中部前缘监测点年平均位移量为 38.0~51.6 mm, 5 次跃阶平均位移为 32.5~36.2 mm, 集中在库水位由 145 m 上升至 175 m 期间, 占当年总位移的 43.2%~88.7%, 显示了滑坡前缘变形与库水上升具有较好的相关性 (图 2)。

自动化 GNSS 监测结果显示, 2018 年至 2022 年, 龙头山滑坡主要以滑坡左侧前缘 WS0203、滑坡中部前缘 WS0206 和滑坡中部 WS0205 监测点变形为主, 累计水平位移为 84.5 mm、79.4 mm 和 176.9 mm。这与人工 GPS 监测显示的滑坡主要变形部位特征相同。

对比 2021 年和 2022 年, 5 月 20 日~6 月 15 日三峡库水位快速消落期间, 各监测点变形速率与库水位升降速率的关系 (图 3), 可以看出:

2021 年 5 月 20 日~6 月 9 日, 三峡库水位从 154.20 m 下降到 146.23 m, 下降幅度 7.97 m, 平均下降速率 0.4 m/d, 最大下降速率 1.05 m/d, 在此期间滑坡的变形速率较低, 且未见有明显变化。

2022 年 5 月 20 日~6 月 2 日, 三峡库水位从 160.41 m 下降到 148.34 m, 下降幅度 12.07 m, 平均下降速率 0.93 m/d, 最大下降速率 1.1 m/d, 在此期间滑坡的变形速率未见明显变化; 之后库水位稍有上升, 6 月 5 日上升到 149.38 m, 6 月 5 日~12 日, 库水位进一步下降, 由 149.38 m 下降到 146.28 m, 下降幅度 3.1 m, 平均下降速率 0.44 m/d, 最大下降速率 1.00 m/d, 在此期间滑坡的变形速率未见明显变化。上述两次消落过程表明滑坡变形速率与库水位下降间相关性不明显。

### 3 变形机理及影响因素分析

#### 3.1 滑坡变形机理及影响因素

(1) 地质条件对滑坡变形的控制作用。龙头

山滑坡位于大溪河右岸、巫山向斜南翼, 为三叠系中统巴东组 ( $T_2b$ ) 泥灰岩、泥岩等易滑岩组, 顺向斜坡, 滑坡坡体结构松散, 为中等强度渗透性, 松散堆积体与下伏基岩接触面形成潜在滑动面。大溪河在下切过程中不断侵蚀右岸软岩, 为滑坡的复活和变形提供了条件。从坡体剖面结构角度分析, 斜坡前缓后陡, 滑坡前缘滑体厚度相对较薄, 中后部较厚, 滑坡前缘阻滑效应差, 坡体自身稳定能力较差。滑坡容易受到三峡库水位波动的影响, 容易在滑坡前缘率先产生变形甚至破坏, 呈牵引式滑动破坏的特征。

(2) 库水位升降是龙头山滑坡变形主要诱发因素。库水位上升过程中, 由于渗透作用, 滑体内地下水水位不断抬升, 浮托力随之增大, 浮托减重效应使滑体稳定性降低 (梅军, 2022; 叶小林, 2020); 滑坡体前缘临空面为大溪河, 江水对滑体前缘岸坡不断的冲刷、掏蚀, 构成了滑坡前缘的剪出口; 滑坡体后缘斜坡坡度较陡, 临空条件较好; 滑坡体土体在自重应力长期作用下发生缓慢而持续的变形。

(3) 大气降雨对滑坡变形影响相对较小。尽管库水波动条件下, 降雨可能会加剧滑坡的变形 (谭林云, 2020), 据历年监测数据及现场调查, 选取 2020 年、2021 有月降雨量在 200 mm 以上的 7~9 月, 以及 2022 年 7~8 月持续高温干旱天气, 连续 40 日无降雨作为分析降雨对龙头山滑坡位移阶跃影响的典型时段。监测数据显示在强降雨和持续降雨过后未见累计位移曲线有明显波动, 干旱条件造成的粘性土收缩亦会增大滑坡浅表层土体的变形, 降雨与滑坡的变形相关性不明显。

#### 3.2 滑坡地质力学模式

结合现场勘查、监测数据认为龙头山滑坡的地质力学模式为蠕滑—拉裂型滑坡, 斜坡岩土体在滑体中前缘基覆界面处形成相对较好的渗水通道, 表现为库水位上升条件下形成的小变形。

龙头山滑坡前部稍缓中部及后部陡, 在库水位位于低水位期间, 受汛期降雨补给在滑坡前部缓坡平台形成稳定的地下水, 前缘滑体受地下水浸润土体强度降低, 渗透性较好, 下部基岩渗透性很小, 近乎隔水底板。库水位的升降主要影响滑坡前缘, 库水位从低水位上升到高水位时, 水体由滑坡体外向内入渗, 滑坡体内的饱和流场是向内凹的, 直至滑坡中部稳定后变得比较平缓, 静水压力 (浮托力) 随之增大, 浮托减重效应使滑体前部抗滑力下降,

导致前部稳定性降低,表现位移以滑坡体前部变形为主的牵引式破坏;库水位从高水位下降到低水位初期,水体由滑坡体内向外排泄,滑坡体内的饱和流场是向外凸的,基覆界面中地下水的渗透水压力和空隙水扬压力的联合作用下,滑坡前部持续产生变形,但是滑坡体渗透性较好,外凸不是很明显,滞后现象不明显,滑体中地下水位与库水位高度保持一致,恢复至低水位阶段,前缘静水压力(浮托力)减小,滑坡前缘抗滑力增大,滑坡变形趋缓。

#### 4 稳定性数值模拟分析

运用有限元软件 Geo-studio 在 seep/w 程序中做渗流场分析,将渗流场的结果应用到 slope/w 程序中,采用极限平衡方法中的 Morgenstern-Price 方法进行稳定性计算。

计算结果显示:库水位在 175m 至 145m 下降过程中滑坡的稳定性系数表现出增大的趋势,其中 159~145 m 快速消落阶段稳定性系数上升速率比 175~159 m 大,库水位下降速率越大,龙头山滑坡稳定性增大幅度越大;当库水位在 145 m 稳态过程中,滑坡的稳定性变化不大;库水位在 145~175 m 上升段,滑坡的整体稳定性逐渐下降;在 175 m 稳态过程中,稳定性保持不变。

#### 5 结论

龙头山滑坡滑面前部倾角为  $4^\circ$ ,是滑坡的阻滑段,但滑体厚度相对较薄,阻滑效应差,中部剖面倾角为  $12^\circ \sim 20^\circ$ ,后部倾角约为  $32^\circ \sim 43^\circ$  为下滑段。滑体为渗透性中等的碎块石土滑体,滑床为弱透水性的三叠系中统巴东组二段泥岩。坡体结构和岩土体组合特性是滑坡变形的基础。

监测数据与数值模拟结果均显示库水位上升

是龙头山滑坡变形的主导因素。2008~2016 年,9 个库水位升降过程,滑坡前缘监测点累计位移出现了 5 次阶跃式增加。库水位的上升,使基覆界面中孔隙水浮托力增大,滑坡体产生明显的变形,导致滑坡稳定性下降,随着库水位的下降,滑坡失去了地下水浮托力的作用后,变形一定程度便会自动停止,稳定性增大。

2022 年 5 月 20 日至 6 月 21 日库水位消落期日降幅由 0.6 m 提高至 1 m,期间龙头山滑坡变形量未见明显增大,2022 年度总位移量也未见明显增大,变形趋势与前期变化趋势一致。

龙头山滑坡受坡体结构特征制约,在库水位升降作用下每年滑坡左侧及中前部坡体会反复变形,且变形量随库水位上升而变形增大,属“浮托减重型”滑坡,提高库水下降速率不会降低滑坡的稳定性。

#### 参 考 文 献 / References

- 付小林, 汤明高, 叶润青, 李九乾, 马新建, 向育才. 2020. 不同库水消落方式下水压力型滑坡变形与稳定性响应研究. 水利水电技术(中英文), 2(1): 201~211.
- 梅军, 卢书强, 朱智杰, 徐锦宏. 2022. 库水位—降雨联合作用下木鱼包滑坡变形与稳定性分析. 水电能源科学, 40(11): 163~166+128.
- 谭淋耘, 黄润秋, 冯晓亮, 裴向军, 张锦程. 2020. 三峡重庆库区典型滑坡监测特征与诱发机制. 地质论评, 66(S1): 171~174.

**LIN Gaocong, SHI Xuelei, ZHANG Xue, LI Xinghu:**  
**Characteristics of surface displacement monitoring and deformation mechanism analysis of Longtoushan landslide in Wushan County**

**Keywords: landslide monitoring; surface displacement; deformation mechanism**

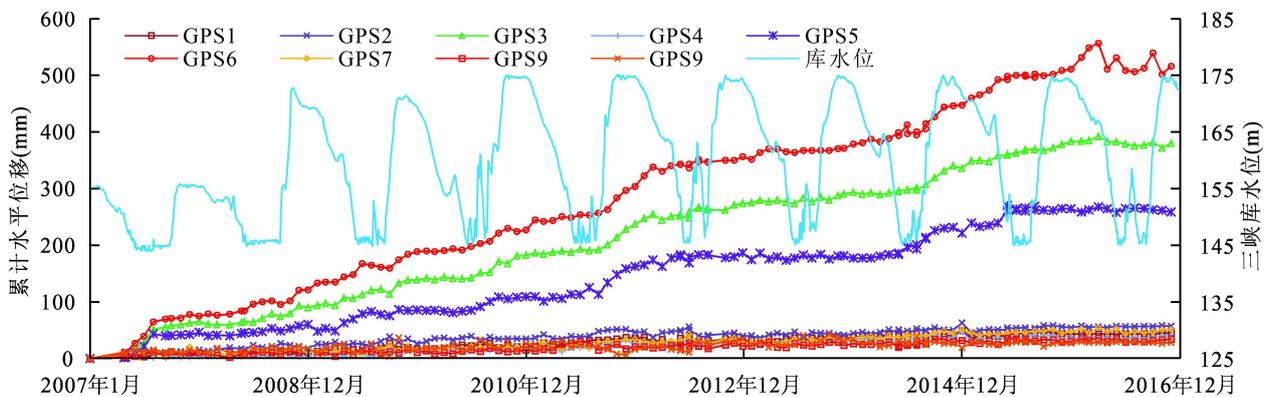


图2 龙头山滑坡人工 GPS 监测点 2007 年~2016 年累计水平位移曲线与库水位相关性分析图

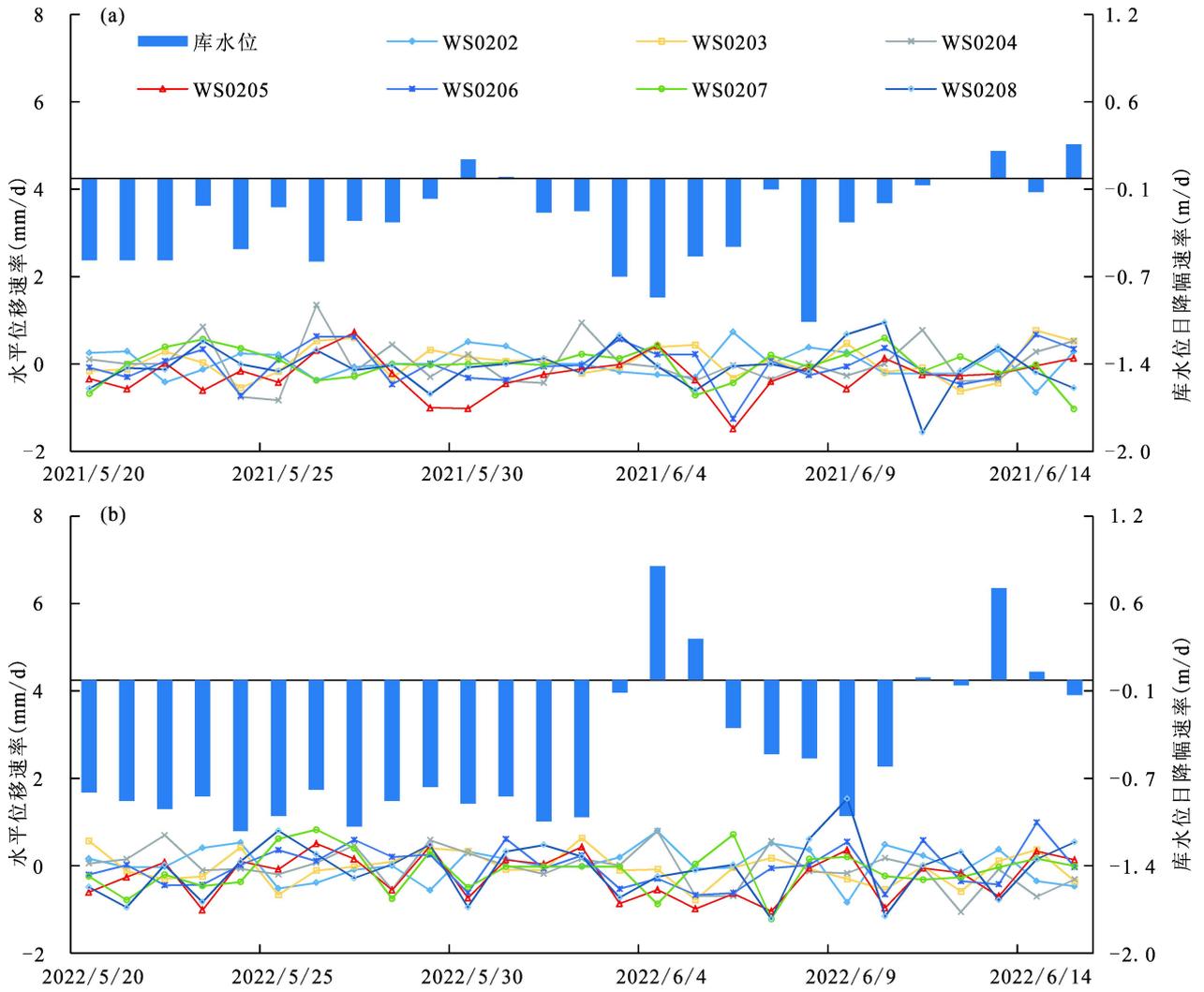


图3 龙头山滑坡自动化 GNSS 监测点 2021 年 (a) 和 2022 年 (b) 库水快速消落期间位移速率与库水位升降速率相关性分析图