



结合InSAR与离散元模拟的岩湾山体变形破坏趋势研究

任开瑀, 姚鑫, 周振凯, 赵小铭, 李凌婧

引用本文:

任开瑀, 姚鑫, 周振凯, 等. [结合InSAR与离散元模拟的岩湾山体变形破坏趋势研究](#)[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2021, 46(10): 1589–1597.

REN Kaiyu, YAO Xin, ZHOU Zhenkai, et al. [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1589–1597.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[利用2016—2020年Sentinel-1数据监测与分析三峡库区树坪滑坡稳定性](#)

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(10): 1560–1568 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210247>

[时序InSAR用于安康膨胀土机场稳定性监测](#)

Time-Series InSAR for Stability Monitoring of Ankang Airport with Expansive Soil

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(10): 1519–1528 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210223>

[InSAR双向矩形角反射器阵列形变监测精度评估与验证](#)

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(10): 1471–1477, 1488 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210101>

[西藏易贡滑坡演化光学遥感分析与InSAR形变监测](#)

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(10): 1569–1578 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210168>

[青藏高原西北缘时序InSAR对流层延迟改正方法评估](#)

Evaluation of Time-Series InSAR Tropospheric Delay Correction Methods over Northwestern Margin of the Qinghai–Tibet Plateau

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(10): 1548–1559 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210254>



结合 InSAR 与离散元模拟的岩湾山体变形 破坏趋势研究

任开瑀¹ 姚 鑫¹ 周振凯^{1,2} 赵小铭³ 李凌婧¹

1 中国地质科学院地质力学研究所新构造运动与地质灾害重点实验室,北京,100081

2 中国地质大学(北京)工程技术学院,北京,100083

3 中国长江三峡移民工作办公室,四川 成都,610041

摘要:金沙江下游溪洛渡库区蓄水后岩湾反倾山体产生变形,两次实地调查了边坡的变形情况,使用合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)识别并比较蓄水前后边坡的变形特征,结合离散元颗粒流方法(particle flow code, PFC)模拟预测其未来的变形破坏趋势,得到以下结论:(1)边坡的变形主要受边坡结构、地应力、岩性和水库蓄水的影响,其变形机制可概括为蓄水后浸水位以下岩体产生压缩变形,上部较软岩体对前缘的变形成应产生倾倒变形和层间错动,折断后岩体在重力作用下挤压前缘岩体,产生沿折断面的切层蠕滑变形。(2)蓄水后边坡视线向变形速率呈现出从 InSAR 变形边界由外向内逐渐递增的特征,PFC 模拟结果与该变形特征相一致,InSAR 监测大变形区的地层岩性为泥质灰岩和页岩互层,力学性质相对上下地层更差、更易变形,与 InSAR 变形特征相对应。(3)预测边坡的失稳趋势是结构面作用下浅层岩体塌方以及坡体上部的裂缝加宽,而不是整体的切层滑动。

关键词:倾倒变形;InSAR;库岸边坡;变形趋势;颗粒流方法(PFC)

中图分类号:P237

文献标志码:A

巨型水库蓄水打破了库岸边坡的自然演化进程,使其呈现出许多与蓄水前不同的滑坡发育机制和规律^[1]。其中之一就是传统上认为稳定的反倾基岩山体短期内出现明显的深层倾倒破坏,其规模、机制、破坏趋势是否可预测等问题是库区地质灾害防治需要掌握的信息。深层倾倒破坏往往容易发育大型甚至巨型滑坡,结构复杂且认识难度大,主要分布在青藏高原东侧的川滇南北构造带及藏东地区^[2]。受人类工程活动的影响,越来越多的由倾倒变形发展演化,最终失稳破坏引发的事故发生^[3]。

国内外学者对倾倒变形的变形机制和稳定性评价研究已有较长历史,文献[4]对倾倒变形的类型进行了系统研究,将倾倒变形破坏形式总结为弯曲倾倒、块体倾倒和块体弯曲倾倒3种基本类型,并首次利用极限平衡法对反倾岩质边坡稳定性进行了评价。文献[5]采用离散元方法分

析了不连续结构面倾向坡内的边坡稳定性,发现岩块产生了倾倒、滑移和剪切破坏等特征。文献[6]分析了广西龙滩边坡岩体弯曲蠕变的条件和影响因素,通过模型试验探讨了该现象的产生机理和过程。文献[7]运用极限平衡法和通用离散元程序(universal distinct element code, UDEC)模拟分析了如美水电站岩质边坡的倾倒变形机理,并采用强度折减法模拟长期荷载作用研究了边坡的稳定性。文献[8]基于工程地质方法并结合离散元模拟了反倾岩质边坡的变形破坏过程,分析了倾倒变形的时效性,将破坏模式总结为弯曲-拉裂变形、弯曲-折断破裂、蠕滑-拉裂变形、表层滑塌和深部滑坡形成。文献[9]运用离散元颗粒流方法(particle flow code, PFC)模拟研究了块裂反倾巨厚层岩质边坡的破坏机制,得出主要有滑移、倾倒和溃曲破坏3种破坏模式,通过持续增加重力加速度法模拟加载分析了边坡稳定性,发

收稿日期:2020-11-06

项目资助:中国长江三峡集团有限公司项目(YMJ(XLD)/(19)110);国家自然科学基金(41672359, 41807299);国家重点研发计划(2018YFC1505002);中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务费专项(JYYWF20181501)。

第一作者:任开瑀,硕士生,研究方向为地质灾害 InSAR 监测。1353712901@qq.com

通讯作者:姚鑫,博士,研究员。yaoxinphd@163.com

现岩层倾角在60°时稳定性相对最差,岩块越大边坡越稳定,并主要受层间裂隙控制。基于非连续介质模型的离散元数值模拟已经成为研究反倾岩体边坡稳定性最常用的手段^[10-15]。

以上研究主要针对自然发育的老倾倒变形体,对于短期内受库水位影响而正在发育的倾倒变形破坏体的研究鲜见报道。这类研究的难点在于:正在发育的反倾岸坡变形体,不易全面掌握其规模边界、发育机制、变形深度、破坏特征等各种变形破坏参数,仅凭地质调查、宏观变形迹象难以准确判断其稳定性和发展趋势。

本文以正在发育的溪洛渡库区岩湾反倾山体为研究实例,使用合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)监测蓄水前后边坡的变形特征,并结合离散元数值模拟预测水库新发反倾岸坡变形破坏趋势。采用先进陆地观测卫星(advance land observing satellite, ALOS)相控阵型L波段合成孔径雷达(phased array L - band synthetic aperture radar, PALSAR)和X波段陆地合成孔径雷达(X-band terrace synthetic aperture radar, TerraSAR-X)数据对蓄水前后滑坡地表位移进行了测量,通过InSAR技术分析了该边坡蓄水前后的变形特征,分析其发展演化机制。以InSAR变形监测为约束条件,采用离散元软件PFC动态模拟岸坡的变形发展,预测岸坡变形破坏趋势,对进一步预测边坡的破坏和灾害预防具有重要意义。

1 研究区工程地质概况

研究区位于金沙江干流下游的溪洛渡水电站库区,地处云贵高原和四川盆地两大地貌单元所接壤的大凉山地带向川中盆地的过渡地段,属强侵蚀高山、中山地貌类型。斜坡海拔高程550~1 050 m,垂直高差500 m,属亚热带气候区,为典型的干热河谷气候,多年平均气温17.4 °C,多年平均年降水量715.9 mm。

斜坡从上到下出露的4组地层岩性依次为志留系下统龙马溪组(S₁)笔石页岩、粉砂岩,奥陶系中上统五峰组(O₂₊₃w)页岩、泥质灰岩,奥陶系下统红石崖组(O₁q)生物灰岩、页岩、石英砂岩,寒武系上统二道水组(ε₃e)灰岩夹页岩、白云质灰岩,岩层产状为220°∠33°~79°,岩层倾向坡内,岩体上覆的第四系沉积物被改造为农田。图1为2019-09无人机航测得到的变形区及周边影像。

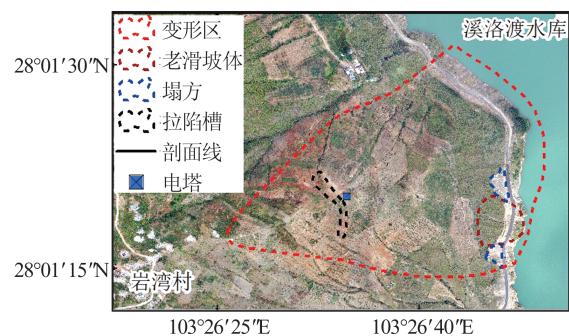


图1 无人机航测影像(拍摄于2019-09)
Fig.1 UAV Aerial Survey Image (Taken in 2019-09)

斜坡整体位于背斜构造的转折端,变形边界南侧发育一小型向斜,如图2(b)所示,岩层产状在150 m内产生反转,岩体挤压揉皱现象显著。整个斜坡岩体为软硬互层状结构,灰岩层和粉砂岩层相对坚硬,泥质灰岩层和页岩层相对软弱。



图2 野外调查照片
Fig.2 Photographs During Field Survey

2 山体变形特征

2013-05溪洛渡水库开始蓄水,正常蓄水位达到600 m,水位抬升约100 m,运行期间水位正常变幅60 m左右。蓄水后坡体出现明显变形,坡上农田出现多处裂缝,最大宽度可达1.5 m,下错高度达1.2 m,造成房屋开裂,坡体变形严重威胁到上方岩湾村居民的生命与财产安全。

在 2019-09—2020-07 进行了两次实地调查, 图 2(a)为在对岸拍摄的岩湾变形体侧面照, 沿公路共发育两处塌方和一处老滑坡体, 从左到右岩体倾倒变形程度逐渐增强, 岩层倾角由正常岩体的 79° 逐渐降至 35° 。通过无人机测绘高分辨光学影像和现场勘察统计, 按照延伸方向将坡体裂缝分为 3 组: 一组垂直于变形体中部坡脊线, 裂缝走向约 326° , 与岩层走向一致, 电塔西侧发育最宽约 50 m 的拉陷槽, 表层土体形成多级台阶下错, 如图 2(c)所示; 另外两组发育在坡脊线两侧, 裂缝走向约 127° 和 25° , 由岩体开裂变形和流水侵蚀切割共同作用, 靠近坡底, 裂缝的深度和宽度逐渐扩大, 侵蚀严重处可见上覆沉积物与基岩的接触面。图 2(d)中, 公路上下岩层产状由 79° 突变为 55° , 岩体产生折断变形, 共发育两组结构面, 产状分别为 $354^\circ \angle 60^\circ$ 、 $64^\circ \angle 47^\circ$, 结构面切割导致了临空面处岩体的塌方。图 2(e)为塌方体右侧浅层岩体的折断变形, 第二次实地调查发现该处有新的崩塌堆积体。

图 3 为岩湾边坡地质剖面图。

3 InSAR 变形特征分析

本文使用了 2007-07—2011-03 蓄水前的 12 景 L 波段 PALSAR-1 升轨数据、2017-07—2019-06 蓄水后的 20 景 L 波段 PALSAR-2 升轨数据和 2016-05 的两景 TerraSAR-X 升轨数据对蓄水前后岩湾山体进行监测。

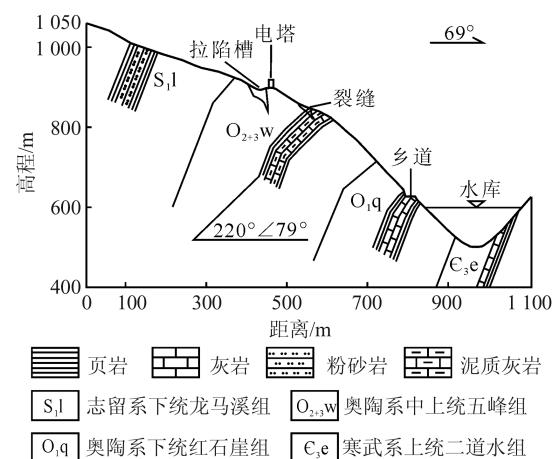


图 3 地质剖面图

Fig.3 Geological Section

3.1 蓄水前后变形对比

利用 GAMMA 软件对星载合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 数据进行干涉处理, 采用自适应滤波算法降低相位噪声, 提高相位解缠和测量精度。采用合成孔径雷达差分干涉测量技术 (differential interferometric synthetic aperture radar, DInSAR) 对研究区不同时段变形进行探测, PALSAR-1 数据的多对结果均显示蓄水前岩湾村下部边坡无明显变形, 图 4(a)为 2007-07-07—2011-03-02 期间 DInSAR 结果的平均形变图, 蓝绿色表示地表稳定区域。图 4(b)为 2016-05-15—2016-05-26 期间 TerraSAR 数据的 DInSAR 结果, 颜色周期变化显示了边坡的变形范围和变形量, 时间间隔仅 11 d, 即 TerraSAR 卫星的重返周期, 说明这段时间边坡变形速率较大。

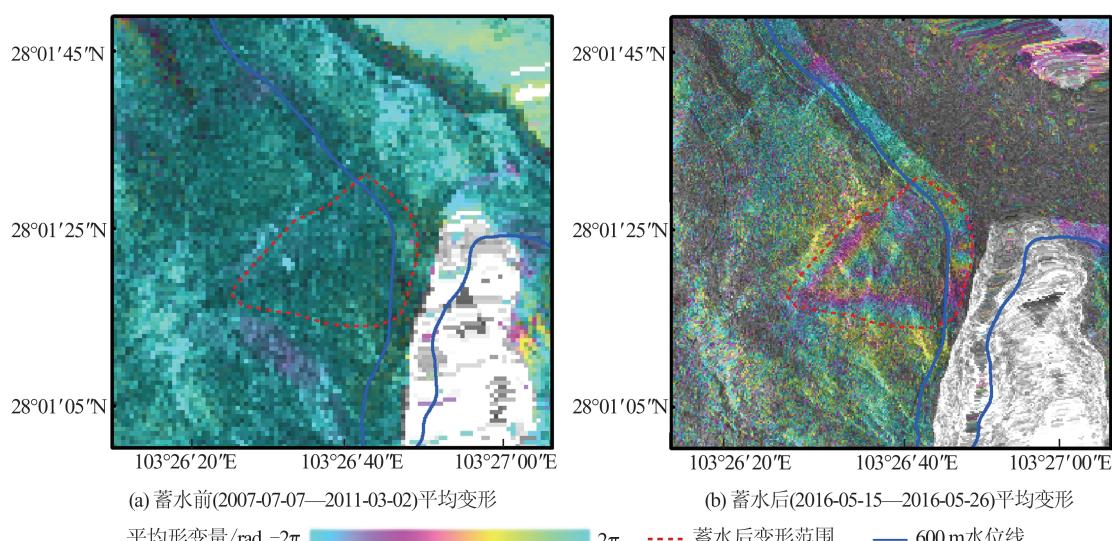


图 4 DInSAR 结果

Fig.4 DInSAR Results

3.2 变形特征精细识别

由于蓄水后 PALSAR-2 数据的 DInSAR 结果显示了连续的变形现象,采用小基线集技术 (small baseline subset, SBAS) 进行了高精度时间序列形变监测,共使用 20 景 PALSAR-2 数据,最终得到边坡在 2017-07—2019-06 期间的年平均形变速率图(见图 5)。主变形区呈现出指向坡顶的箭头状轮廓特征,从下到上边坡的变形特征各不

相同,公路下方岸坡覆盖经过人工清理堆积的松散块石,容易产生局部变形;公路上方临空面坡度较陡,上覆堆积物容易受地表水冲刷,变形严重,变形速率超过了 InSAR 可监测范围,表现为失相干;再往上坡度逐渐减小,观察到变形速率经历了先增大后减小的过渡,变形速率最大处对应坡度由陡变缓的过渡段,该处倾倒变形相对更严重。

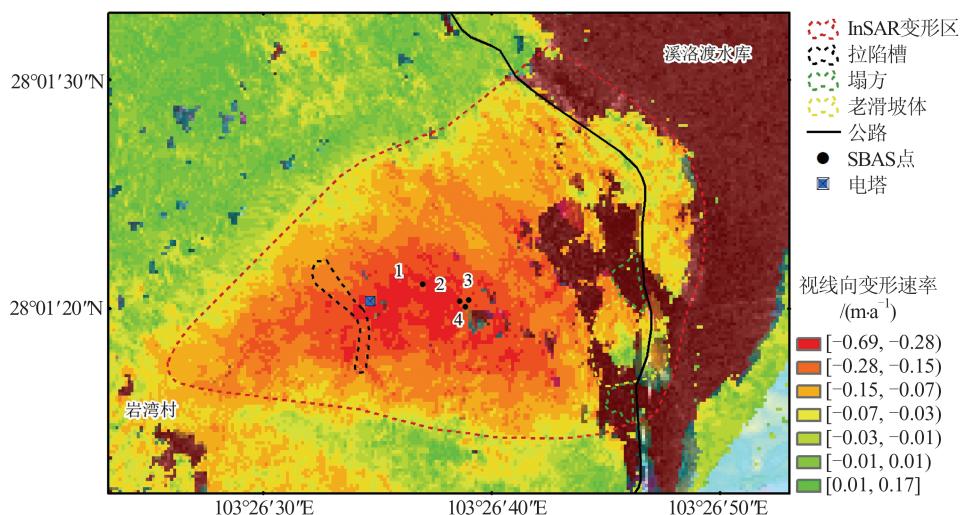


图 5 年平均变形速率图(2017-07—2019-06期间)

Fig.5 Annual Average Deformation Rate Map (from July 2017 to June 2019)

3.3 变形过程监测

按比例提取 SBAS 点,其视线向变形速率绝对值见图 6。从图 6 中可以更直观地观察到边坡变形速率呈现出从 InSAR 变形边界由外向内逐渐递增的特征。

选取变形区中心 4 个变形量最大的 SBAS 点的视线向位移时间序列(见图 7),2017-12-01—

2018-10-05 期间各点均表现为线性变形,在 2018-10-05—2019-02-22 期间各点数据缺失。2019-02-22—2019-06-28 期间各点均监测到明显的加速变形现象,变形量值最大的点 4 在监测期间沿雷达视线向的最大变形速率约 0.53 m/a,标准差为 0.08 m/a,最后 4 个月累计变形约 0.5 m,沿雷达视线向的最大变形速率约 1.5 m/a。

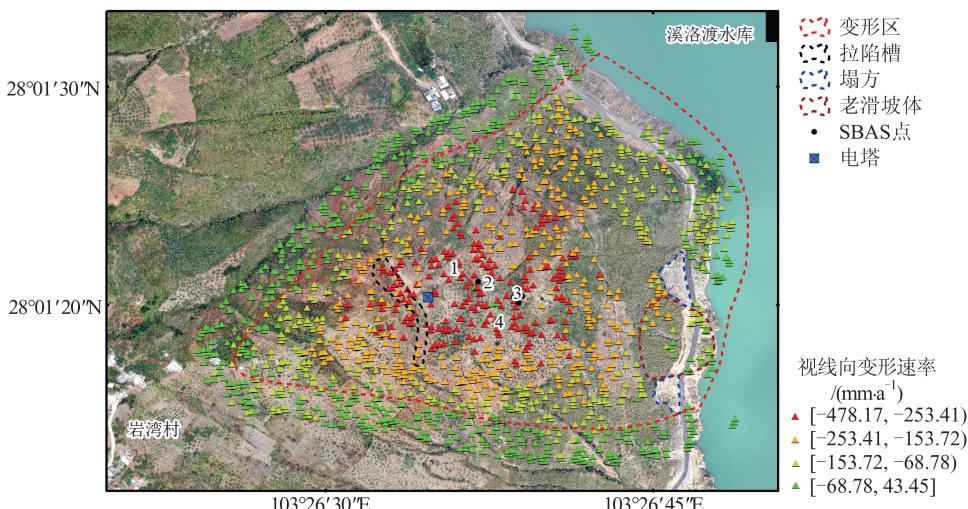


图 6 SBAS 点年均变形速率图

Fig.6 Annual Average Deformation Rate Map of SBAS Points

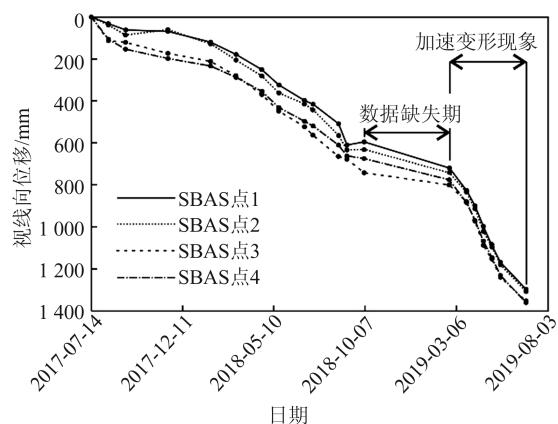


图 7 SBAS 点视线向位移时间序列

Fig.7 Displacement Time-Series of SBAS Points

利用监测数据预测滑坡破坏时间是判断滑坡稳定性的最直观的指标, 使用逆速度法 (inverse velocity method, INV)^[16] 和斜率法 (slope method, SLO)^[17] 对加速变形阶段数据进行分析。SLO 方法偏保守, 而 INV 方法的前提假设是破坏时的变形速率趋于无穷大, 使得预测结果偏不保守, 故同时使用两种方法进行预测可以更合理地对预测结果进行解释^[18]。一次预测至少需要 3 组速率值, 速率通过相邻时间点位移曲线的斜率计算, 故对加速变形阶段 7 次监测位移数据可进行 4 次预测。预测的破坏时间落在当前时间之前则视为无效数据, 将有效预测结果绘制在预测图中 (见图 8)。图 8 中纵坐标为预测结果, 横坐标为用来预测的观测时间, 预测值到实线垂直向的距离表示预测的破坏时间与观测时间的时间差。当多次预测的结果在同一值附近震荡时视为可靠预测, 如图 8 中虚线所示, 预测结果平均值到实线的距离越来越大, 没有在同一值附近震荡, 指示了变形稳定的趋势。最后一次的预测结果全部为无效值, 从位移曲线最后一次监测值也可以直观观察到速率的减小, 变形趋于稳定, 不会在近期发生破坏。

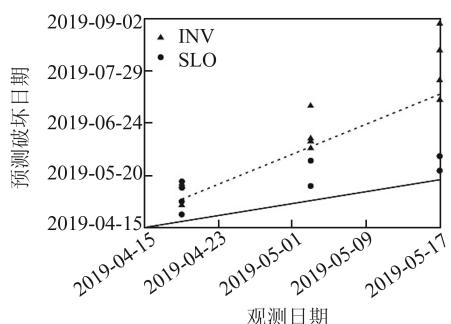


图 8 预测图

Fig.8 Prediction Plot

4 离散元模拟

4.1 建立数值模型

根据图 1 中剖面线建立如图 9 所示的概化地质模型, 模型底边宽 1 176 m, 左侧边界高 711 m, 右侧边界高 272 m, 水位线为蓄水后 600 m 水位线。考虑到颗粒过多导致模型计算时间过长, 将斜坡岩体岩性及厚度进行概化, 通过 PFC 命令 geometry 逐层生成颗粒, 从上到下分别对应粉砂岩页岩互层、泥质灰岩页岩互层、灰岩页岩互层, 结构面为岩层面, 颗粒半径为 2 m, 模型共生成颗粒 36 789 个。

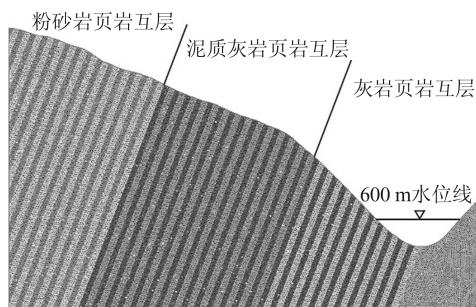


图 9 数值模型图

Fig.9 Numerical Model Map

采用 PFC 程序模拟边坡时, 颗粒细观特性参数的选取是能否成功模拟的关键, 由于细观参数与岩石的宏观力学参数之间没有直接的对应转换关系, 需要通过数值试验, 例如单轴压缩试验、双轴压缩试验、巴西圆盘试验等模拟得出应力应变曲线, 不断调整参数使数值试验的结果与真实岩石的变形模量、泊松比、强度参数等结果相一致, 从而标定出合适的细观参数。

本文采用平缝节理模型模拟岩体, 通过资料收集和综合类比确定了岩体的宏观力学参数 (见表 1), 通过单轴压缩试验、双轴压缩试验标定岩体的细观特性参数 (见表 2)。

表 1 岩体宏观力学参数

Tab.1 Macroscopic Mechanical Parameters of Rock Mass

岩性	页岩	泥质灰岩	灰岩	粉砂岩
变形模量/GPa	7.7	11.9	12.8	12
泊松比	0.27	0.24	0.23	0.23
粘聚力/MPa	2	3	3.5	3.5
内摩擦角/(°)	35	36	39	39

4.2 模拟结果

通过调整浸水位下岩体物理力学参数, 模拟库水位上升引起的下部岩体软化作用对边坡稳

定性的影响。模拟采用的岩体参数不能完全真实反映边坡实际岩体力学性质,而且受颗粒数量约束,模型岩层厚度也不能满足真实的薄层岩体结构,本文旨在通过将浸水位下岩体强度参数折减直到边坡失稳,观察边坡的变形破坏特征。通过文献收集确定了颗粒流参数折减方法,即同时折减切向黏结强度、法向黏结强度和摩擦系数。

表2 岩体细观参数

Tab.2 Microparameters of Rock Mass

岩性	页岩	泥质灰岩	灰岩	粉砂岩	结构面
颗粒密度/(kg·m ⁻³)	2 400	2 250	2 550	2 350	
接触模量/GPa	7	9	10.5	10	0.4
刚度比	2.6	2.5	2.4	2.4	2.6
法向粘结强度/MPa	1.5	1.8	2	2	5×10^{-4}
切向粘结强度/MPa	4.8	7.2	9.6	9.6	8×10^{-4}
摩擦系数	0.34	0.38	0.42	0.42	0.32

图10为PFC、SBAS-InSAR、地质剖面三者对照图。图10(a)为运行至30 000步时边坡的x方向位移图,边坡已经失稳,最大位移量达到22 m,观察到边坡各部位的变形特征各不相同。变形体上部较缓区域以地面开裂为主;坡面陡缓转换处岩层产生强错动变形,同时伴随着地面开裂;下部较陡区域表现为浅表层塌滑和错动。

5 变形破坏趋势分析

5.1 影响因素

根据边坡的变形特征判定岩湾变形体为深层倾倒变形,而影响反倾岩质边坡变形的因素有很多,主要有如下几类:边坡结构(坡角、岩层倾角、坡高和层厚)、岩体及层面力学参数、初始地应力、人类活动等。文献[19]研究得出岩层倾角、风化程度、水平地应力、地下水及地震是边坡倾倒的主要影响因素,而边坡坡角和岩层厚度是次要影响因素;文献[20]研究得出当坡角大于40°时,岩层倾角在60°~70°之间是优势倾倒区间,当有地应力时边坡坡角和岩体倾角均>30°即可发生倾倒变形,边坡高度增加、岩层厚度越小,倾倒特性越明显,当结构面强度参数减倍时,变形量呈数量级增加。

图3为沿岩湾变形体中部的地质剖面,变形体坡高约500 m,按坡角大小可分为上下两段,上段坡角约22°,下段坡角约44°,未发生变形岩层倾角为69°。边坡下半段的角度组合正好处于优势

倾倒区间,而且边坡整体位于一背斜构造的转折端,处于拉张应力环境,有利于倾倒变形。

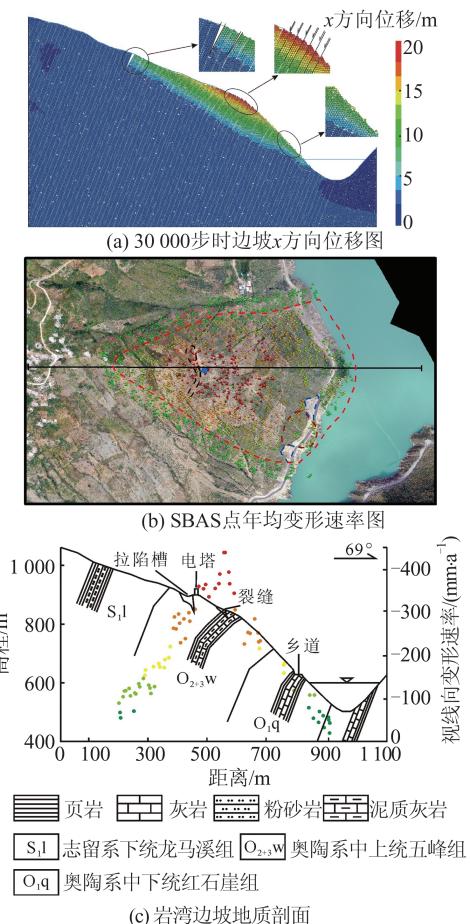


图10 PFC、SBAS-InSAR、地质剖面三者对照图

Fig.10 Comparison of PFC, SBAS-InSAR and Geological Section

变形体主要是由下部的灰岩页岩互层以及上部的泥质灰岩页岩互层构成的软硬相间地层组合。层间结构面力学强度较弱,降雨后形成地表水沿坡体裂缝下渗,进一步弱化了岩石及结构面强度,软硬岩层间容易产生滑移错动。水库的蓄水以及库水位升降更是将坡脚岩体的强度减弱,造成灰岩的溶蚀以及结构面的软化。

综上所述,边坡结构、地应力、岩性组合等是岩湾边坡变形的内在因素,水库蓄水则是诱发因素,诱发并加快边坡的变形。

5.2 发展演化机制

分析岩湾变形体的变形特征和变形影响因素可知,该边坡的反倾结构以及软硬相间的薄层状岩体为深层倾倒变形提供了有利条件。

蓄水前下部灰岩页岩互层可以起到支撑作用,边坡在重力作用下缓慢演化形成倾倒体的特征,没有出现快速变形迹象;蓄水后页岩易软化,

层间黏结减弱,灰岩的溶蚀作用等使得浸水位以下岩体容易产生压缩变形和层间错动;由于边坡上部泥质灰岩页岩互层较下部灰岩页岩互层更软,上部岩体容易响应前缘变形,变形逐渐向后缘发展,形成层间错动和地表开裂,表层容易产生浅层折断;岩层内部的张裂伴随着倾倒变形的过程,弯曲到一定程度时形成折断面,折断后岩体在重力作用下对前缘岩体形成挤压,形成沿折断面的切层蠕滑变形。

图 11 所示为变形体变形过程示意图。图 11(a)为蓄水前原岩;图 11(b)为蓄水后软化前缘岩体;图 11(c)为上部较软岩体响应前缘变形,形成层间错动和地表开裂;图 11(d)为沿深部折断面产生切层蠕滑变形。

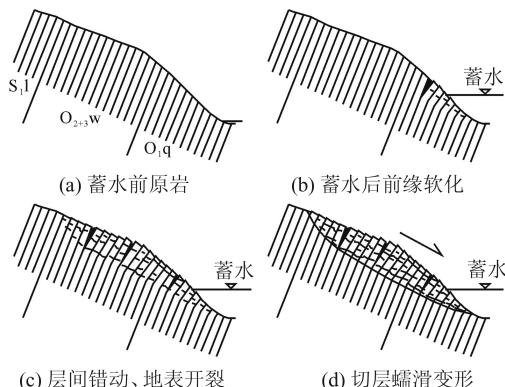


图 11 变形过程示意图

Fig.11 Diagram of Deformation Process

5.3 趋势分析

将模拟结果(图 10(a))与 SBAS 点年均变形速率图(图 10(b))和地质剖面(图 10(c))进行对照。PFC 模拟得到的边坡变形特征与 InSAR 监测到的变形特征具有一致性,变形最大值都位于变形区中心,并向两侧递减。根据弧长=半径×夹角的计算公式,可以理解为坡体中部的岩体倾倒深度最大,向坡脚和坡顶逐渐减小。根据地质图绘制岩湾边坡的地质剖面,大变形区正好对应泥质灰岩页岩互层,如图 10(b)中虚线所示。该地层岩性遇水最易软化产生变形,而下部的灰岩则起到了阻挡支撑作用,合理地解释了中部变形大向两侧递减的变形特征。

根据数值模拟结果,边坡失稳模式表现为强倾倒变形,山谷地形没有给变形体足够的运移空间,下部灰岩的支撑又提供了较大的抗剪强度,故推测该边坡的失稳趋势是结构面作用下浅层岩体塌方以及坡体上部的裂缝加宽,而不是整体的切层滑动。

尽管本文结合 InSAR 和离散元数值模拟预测了新发反倾岸坡的变形破坏趋势,由于水位升降对坡脚岩体的软化作用以及深部岩体的变形破坏程度并不能精确定量掌握,简化模型的模拟结果自然有缺陷,因此预测结果的可靠性仍然需要时间验证以及其他案例的佐证。

6 结语

本文通过 InSAR 技术识别并比较溪洛渡库区蓄水前后岩湾边坡的变形特征,结合 PFC 模拟了其未来的变形破坏趋势,InSAR 监测结合离散元数值模拟可以预测水库新发反倾岸坡的变形破坏趋势。(1)岩湾变形体为深层倾倒变形,主要影响因素包括边坡结构、地应力、岩性组合和水库蓄水。其变形机制可概括为:蓄水后浸水位以下岩体产生压缩变形;上部较软岩体响应前缘变形,产生倾倒变形和层间错动;岩层弯曲到一定程度时形成折断面,折断后岩体挤压前缘岩体,产生切层蠕滑变形。(2)蓄水后边坡视线向变形速率呈现出从 InSAR 变形边界由外向内逐渐递增的特征,PFC 模拟结果与该变形特征相一致。其中,InSAR 监测大变形区对应地层岩性为泥质灰岩页岩互层,相对上下岩性力学性质更易变形,与 InSAR 变形特征对应。(3)预测边坡的失稳趋势是结构面作用下浅层岩体塌方以及坡体上部的裂缝加宽,而不是整体的切层滑动。

参 考 文 献

- [1] Zhang Shishu, Pei Xiangjun, Mu Jianqiao, et al. Evolution Mechanisms Analysis of Xingguangsanzu Toppling Deformation Bodies Under Condition of Impound Water of Xiluodu Hydropower Station[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(2):4 091-4 098(张世殊,裴向军,母剑桥,等. 溪洛渡水库星光三组倾倒变形体在水库蓄水作用下发展演化机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2):4 091-4 098)
- [2] Huang Runqiu. Large-Scale Landslides and Their Sliding Mechanisms in China Since the 20th Century [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3):433-454 (黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3):433-454)
- [3] Huang Runqiu, Li Yusheng, Yan Ming. The Implication and Evaluation of Toppling Failure in Engineering Geology Practice[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(5):1 165-1 181 (黄润秋,李渝

生,严明.斜坡倾倒变形的工程地质分析[J].工程地质学报,2017,25(5):1 165-1 181)

[4] Goodman R E, Bray J W. Toppling of Rock Slopes [C]//The ASCE Specialty Conference: Rock Engineering for Foundations and Slopes, Boulder, Colorado, 1976

[5] Hsu S C, Nelson P P. Analyses of Slopes in Jointed Weak Rock Masses Using Distinct Element Method [C]//Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Vienna, Austria, 1995

[6] Wang Sijing, Xiao Yuan, Du Yonglian. The Mechanism of Bending Creep of Bedded Rock Mass in the Slope on the Left Bank of Longtan Dam Site [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1992, 27(S):342-352 (王思敬,肖远,杜永廉.广西红水河龙滩水电站坝址左岸边坡层状岩体弯曲蠕变机理分析[J].地质科学,1992,27(S):342-352)

[7] Liu Shunchang. Study on Toppling Failure Mechanism of Rock Slope in Rumei Hydropower Station [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013 (刘顺昌.如美水电站岩质边坡倾倒破坏机理研究[D].武汉:中国地质大学,2013)

[8] Zhang Zelin, Wu Shuren, Tang Huiming, et al. Time Dependent Deformation of Antithetic Dip Rock Slope [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2014, 33(5):181-187 (张泽林,吴树仁,唐辉明,等.反倾岩质边坡的时效变形破坏研究[J].地质科技情报,2014,33(5):181-187)

[9] Cen Duofeng, Huang Da, Huang Runqiu. Simulation of Deformation and Failure for Blocky Anti-dip Thick-Layered Rock Slopes Using Particle Flow Code and Analysis on Its Stability [J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2016, 47(3):984-993 (岑夺丰,黄达,黄润秋.块裂反倾巨厚层状岩质边坡变形破坏颗粒流模拟及稳定性分析[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(3):984-993)

[10] Pang Bo. Study on the Mechanical Mechanism and Evolution Characteristics of Toppling Deformation in Thin Anti-dip Slate Slope [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017 (庞波.反倾薄层板岩边坡倾倒变形力学机理及演化特征研究[D].成都:成都理工大学,2017)

[11] Tan Ruijiao, Yang Xuchao, Hu Ruilin. Review of Deformation Mechanism and Stability Analysis of Anti-dipped Rock Slopes [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(S2):479-484 (谭儒蛟,杨旭朝,胡瑞林.反倾岩体边坡变形机制与稳定性评价研究综述[J].岩土力学,2009,30(S2):479-484)

[12] Zuo Baocheng. Study on Failure Mechanism of Reverse Rock Slope [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Geotechnical Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2004 (左保成.反倾岩质边坡破坏机理研究[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2004)

[13] Chen Xi. Research on Mechanism of Stability and Deformation of Rock Slope Failure [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018 (陈玺.岩质边坡倾倒破坏稳定与变形机理研究[D].西安:西安理工大学,2018)

[14] Li Lu. Research on Progressive Fracture of Anti-dip Layered Rock Mass Based on DDA [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019 (李璐.基于DDA的反倾层状岩体渐进式断裂研究[D].兰州:兰州大学,2019)

[15] Wu Libin, Ji Zheng. Model Analysis of Deformation and Damage on Flare Slope in Tangkou-Tunxi Expressway and Its Support Design [J]. *Technology of Highway and Transport*, 2007(5):6-15 (吴利彬,季征.汤屯高速公路某反倾边坡变形破坏模式分析及支护设计[J].公路交通技术,2007(5):6-15)

[16] Fukuzono T. A Method for Predicting the Failure Time of a Sandy Soil Slope Using the Inverse Number of Velocity [C]//The 23rd Meeting of Japan Landslide Society, Tokyo, Japan, 1984

[17] Mufundirwa A, Fujii Y, Kodama J. A New Practical Method for Prediction of Geomechanical Failure-Time [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47: 1 079-1 090

[18] Ren Kaiyu, Yao Xin, Zhao Xiaoming, et al. Study of Landslide Failure Prediction Based on TS-InSAR, GPS and Image Offset Monitoring [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(S2):3 421-3 431 (任开瑀,姚鑫,赵小铭,等.基于时序InSAR、GPS、影像偏移测量三种监测数据的滑坡失稳破坏预测研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(S2):3 421-3 431)

[19] Wang Liwei, Xie Mowen, Yin Yanli, et al. Analysis on Dumping Deform Influent Factors of Reverse Dumping Rock Slope [J]. *Yellow River*, 2014, 36(4):132-134 (王立伟,谢博文,尹彦礼,等.反倾层状岩质边坡倾倒变形影响因素分析[J].人民黄河,2014,36(4):132-134)

[20] Cheng Dongxing, Liu Daan, Ding Enbao, et al. Analysis on Influential Factors and Toppling Conditions of Toppling Rock Slope [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(11): 1 362-1 366 (程东幸,刘大安,丁恩保,等.层状反倾岩质边坡影响因素及反倾条件分析[J].岩土工程学报,2005,27(11):1 362-1 366)

Deformation and Failure Trend of Yanwan Mountain Combining InSAR and Discrete Element Simulation

REN Kaiyu¹ YAO Xin¹ ZHOU Zhenkai^{1,2} ZHAO Xiaoming³ LI Lingjing¹

1 Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

2 School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

3 China Three Gorges Resettlement Office, Chengdu 610041, China

Abstract: **Objectives:** The natural evolution process of bank slope is broken by the impoundment of giant reservoir, showing many different development mechanisms and laws of landslide from those before impoundment. One of them is that there is obvious deep-seated toppling failure in a short period of time for the traditionally believed stable anti-dumping bedrock mountain. The scale, mechanism and failure trend of the landslide are the information needed to be grasped for the geological disaster prevention and control in the reservoir area. **Methods:** After the impoundment of Xiluodu reservoir area in the lower reaches of Jinsha River, the deformation of Yanwan reverse slope occurred. The deformation of the slope was investigated on site twice. The objective is to compare the deformation characteristics of slope before and after impoundment, analyze its deformation mechanism and predict its future deformation and failure trend. Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technology and particle flow code (PFC) method are used. **Results:** The prediction results show that the failure trend of the slope is the collapse of the shallow rock mass and the widening of the cracks on the upper part of the slope under the action of the structural plane, rather than the overall shear sliding. **Conclusions:** The deformation of slope is mainly affected by slope structure, in-situ stress, lithology and reservoir impoundment. The deformation mechanism can be summarized as follows: After impoundment, the rock mass below the water level produces compression deformation; the deformation response of the upper soft rock mass to the front edge produces toppling deformation and interlayer dislocation; the fractured rock mass compresses the front rock mass under the action of gravity, resulting in the shear creep deformation along the fracture surface. After impoundment, the line of sight deformation rate of the slope gradually increases from the outside to the inside. The PFC simulation results are consistent with the deformation characteristics. The formation lithology in the large deformation area monitored by InSAR is argillaceous limestone and shale interbedding, and its mechanical properties are worse than that of the upper and lower strata, and it is easier to deform, corresponding to the deformation characteristics of InSAR.

Key words: toppling deformation; InSAR; slope of reservoir bank; deformation trend; particle flow code (PFC)

First author: REN Kaiyu, postgraduate, specializes in geological hazards InSAR monitoring. E-mail: 1353712901@qq.com

Corresponding author: YAO Xin, PhD, professor. E-mail: yaoxinphd@163.com

Foundation support: China Three Gorges Project Co. Ltd (YMJ(XLD)/(19)110); the National Natural Science Foundation of China (41672359, 41807299); the National Key Research and Development Program of China(2018YFC1505002); Fundamental Scientific Research Business Expenses of the Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences(JYYWF20181501).

引文格式: REN Kaiyu, YAO Xin, ZHOU Zhenkai, et al. Deformation and Failure Trend of Yanwan Mountain Combining InSAR and Discrete Element Simulation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(10): 1589–1597. DOI: 10.13203/j.whugis20200474(任开瑀, 姚鑫, 周振凯, 等. 结合 InSAR 与离散元模拟的岩湾山体变形破坏趋势研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(10):1589-1597.DOI:10.13203/j.whugis20200474)