

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.04.026

# 水库型堆积层滑坡破坏机理及预报模型研究

丁月双

(中铁第五勘察设计院集团有限公司,北京 102627)

**摘要:** 针对三峡库区地质灾害防治监测预警工程中的某段水库型堆积层滑坡,运用地勘与监测资料,分析滑坡变形与诱发因素之间的关系,进而确定滑坡变形的主控因素;通过三维数值模拟技术,探究水库运行及降雨条件下的变形破坏机理,建立变形预测模型;将强度折减法引入预报模型中,建立该滑坡的适宜性预报判据。结果表明:滑坡变形与库水位具有较好的相关性,而与降雨则相关性不明显;滑坡边界以及滑坡后部以拉张-剪切破坏模式为主,而滑坡中前部主要以剪切破坏模式为主;GPS1和GPS2监测点数值计算位移与实测位移从曲线形态和量值上具有一致性,验证了所建立的预测模型的正确性。

**关键词:** 水库型堆积层滑坡; 滑坡诱因; 破坏机理; 预测模型; 预报判据

中图分类号: TV697.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)04-0211-08

## Failure Mechanism and Prediction Model of Reservoir Type Accumulation Layer Landslides

Ding Yueshuang

(China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 102627, China)

**Abstract:** Focusing on a certain section of reservoir-induced accumulation layer landslide in the geological disaster prevention and monitoring and early warning project of the Three Gorges Reservoir Area, relevant research was conducted to clarify its deformation mechanism and establish an appropriate prediction system. This work adopted geological exploration and monitoring data to analyze the relationship between landslide deformation and inducing factors, thereby determining the main controlling factors of landslide deformation. Through three-dimensional numerical simulation technology, the deformation and failure mechanisms under reservoir operation and rainfall conditions were explored, and a deformation prediction model was established. The strength reduction method was introduced into the prediction model to establish an appropriate prediction criterion for this landslide. The research results show that there is a good correlation between landslide deformation and reservoir water level, while the correlation with rainfall is not obvious. The deformation and failure mode of the landslide boundary and the rear part is mainly tensile-shear failure, while the middle and front part is mainly shear failure. The calculated displacements of the GPS1 and GPS2 monitoring points are consistent with the measured displacements in terms of curve shape and magnitude, verifying the correctness of the established prediction model.

**Keywords:** reservoir-type accumulation layer landslide; causes of landslides; failure mechanism; predictive model; forecast criterion

滑坡作为一种高发地质灾害,长期威胁着周边人民生命财产安全<sup>[1-4]</sup>。三峡工程是世界著名的水利枢纽工程,自三峡库区蓄水以来,水库边坡及岩体

在库水位周期性涨落以及不同降雨量的影响下,其渗流场和岩层物理力学性质的变化<sup>[5-7]</sup>,严重威胁着库区居民的生命财产安全及长江航道的顺畅。

收稿日期:2025-02-11

修稿日期:2025-03-16

基金项目:国家自然科学基金项目“易风化软岩边坡服役性能演变机理与长期稳定性研究”(42077270)

作者简介:丁月双(1983—),男,硕士,高级工程师,主要从事岩土工程勘察、设计及桩基施工等技术工作。E-mail: 122277280@qq.com

据调查,截至目前三峡库区范围内共有近 4 000 余处滑坡<sup>[8]</sup>,涉水滑坡 2 000 余处,主要分布在重庆万州至巫山地段。较为典型的如 2003 年沙镇溪镇千将坪滑坡<sup>[9]</sup>、2012 年奉节县曾家棚滑坡<sup>[10]</sup>、2014 年秭归县杉树槽滑坡<sup>[11]</sup>、2019 年秭归县卡门子湾滑坡<sup>[12]</sup>等。同时,三峡工程修建后库区“消落带”的大幅度水位升降波动,将使库区成为重大地质灾害的多发区和高危区。如何及时有效减缓地质环境的恶化趋势、预防今后可能出现更大、更危险的滑坡灾害险情,已经成为三峡工程不可回避且亟待解决的紧迫课题。

近年来,针对滑坡案例的研究得到广大专家学者的关注,也取得较多的研究成果。Wu 等<sup>[13]</sup>、Xu 等<sup>[14]</sup>分析了库水位波动对滑坡稳定性的影响。Yang 等<sup>[15]</sup>进行了一系列边坡模型试验,模拟水位下降对滑坡的影响。司金波等<sup>[16]</sup>结合多个顺层滑坡案例,分析了该类滑坡特征及形成机制。蒋佩伶等<sup>[17]</sup>、何旭乾等<sup>[18]</sup>利用数值模拟软件,对边坡变形过程进行模拟。与此同时,滑坡预测模型也得到广大学者的关注<sup>[19-21]</sup>。

上述研究揭示了滑坡变形或者稳定性与库水位变化的规律,为研究滑坡灾害提供了技术支撑。为了更深入地了解滑坡变形特征及破坏机制,本文在此基础上,开展水库运行及降雨条件下崩塌滑坡体变形破坏过程的三维数值模拟,以揭示滑坡变形的内在机理,并通过数值计算结果与实测变形的拟合分析,建立基于三维数值模拟的滑坡预测模型与预报判据,以期为研究滑坡变形及预测滑坡灾害提供技术指导。

## 1 滑坡概况及变形监测

### 1.1 屋场湾滑坡概况

滑坡总体形态呈矩形,地形坡度  $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ,坡向  $140^{\circ}$ 。滑坡左侧、右侧边界均为山脊,前缘高程 148 m,后缘高程 310 m。滑坡主轴向长度约 470 m 左右,宽度约 280 m ~ 350 m,滑体平均厚度 25 m,总体滑向  $150^{\circ}$ 。滑坡现有分布面积约  $13.60 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,体积约  $408 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,属二级大型土质滑坡,滑坡如图 1 所示。

滑坡体物质成分空间分布不均匀,物质组成主要为第四系全新统滑坡堆积层,岩性为碎、块石夹粉质黏土。滑带位于第四系滑坡堆积层与基岩的接触面,滑面形态呈折线型,滑面倾角从滑坡后部至滑坡前坡逐渐变缓。滑床为三迭系中统巴东组灰岩和砂岩,岩层产状为  $312^{\circ} \angle 45^{\circ}$ 。



图 1 滑坡全貌

### 1.2 变形监测系统布置

根据滑坡体的空间位置特征,屋场湾滑坡共设置两个 GPS 监测点及 2 个 GPS 基准点,如图 2 所示。

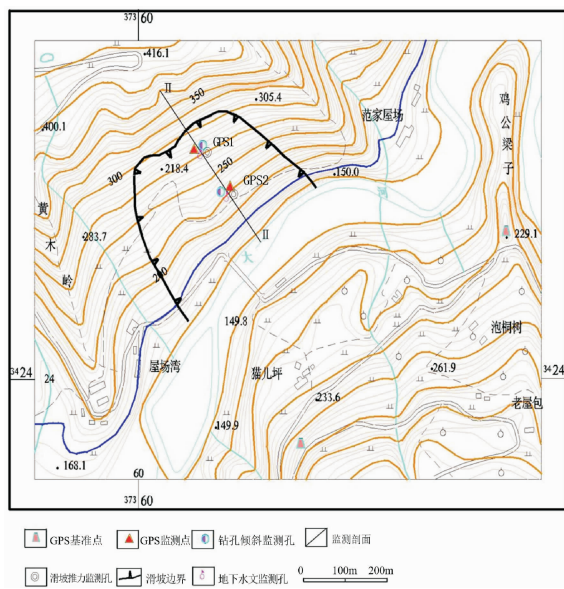


图 2 滑坡监测系统平面布置图

### 1.3 变形特征分析

三峡库区实际水位变化过程具有“骤升缓降”的特点<sup>[22]</sup>。这种特点往往导致在库水位上升过程中滑坡体内的浸润线较陡,而在下降过程中则相对平缓,如图 3 所示。

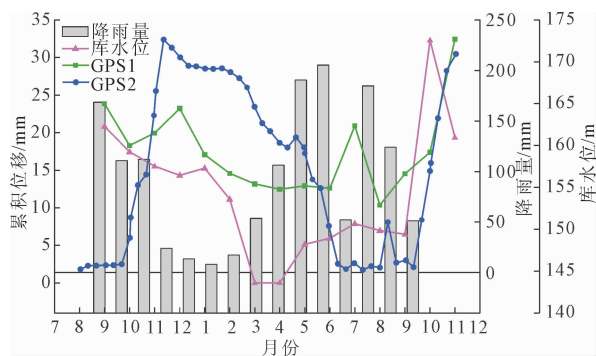


图 3 滑坡监测点位移与库水及降雨间的关系图

滑坡变形与库水位之间的相关性:滑坡变形与库水位之间存在明显的相关性。在库水位骤升过程中,滑坡位移有先急剧增加后缓慢增加的趋势。在库水位缓降过程中,滑坡位移有先急剧增加后缓慢增加的趋势,并具有一定的滞后性。

滑坡变形与降雨量之间的相关性:滑坡 GPS2 监测点在降雨集中季节较非降雨季节位移增大较小,而随着库水的升降呈波动上升,这说明降雨量不是导致该滑坡产生变形的主要原因。

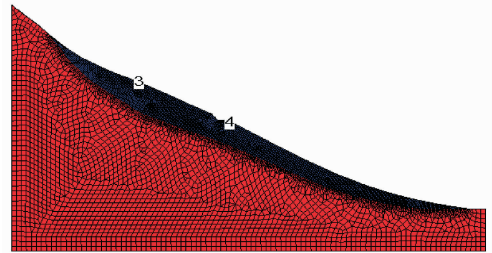
## 2 滑坡三维数值计算模型

### 2.1 滑坡模型建立

根据屋场湾滑坡物质组成及结构特征,运用 SMS3D 建立的滑坡二维数值计算模型,如图 4 所示。计算模型范围,垂直河谷方向( $X$ 轴方向)宽为 470.3 m,模型最大高度( $Y$ 轴方向)344.4 m,底部高程 100 m。

从计算精度的角度出发,滑床网格单元大小取为 5 m,滑体网格单元取为 1 m。计算模型中, $x = 0$  m 以及  $x = 470.3$  m 边界约束  $x$  方向位移;模型底部

$y = 0$  m 为固定约束边界; $z$  方向固定约束后后面,坡面设为自由边界,允许发生  $x$ 、 $y$  方向的位移。初始条件计算过程中,不考虑构造应力的影响,仅考虑自重应力产生的初始应力场。模型共由 32 775 个节点,21 418 个单元组成。滑坡体和滑床均按弹塑性材料考虑,破坏准则采用摩尔-库仑强度准则。计算中所需的体积模量、剪切模量由弹性模量和泊松比换算而来,计算模型中各岩组的物理力学参数见表 1。



注:红色部分为三迭系中统巴东组灰岩和砂岩-滑床,蓝色部分为滑坡堆积碎块石土-滑体,编号 3、4 分别代表地表监测点 GPS1 和 GPS2。

图 4 滑坡数值计算模型

表 1 岩土参数

| 材料<br>介质 | 重度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ) |       | 黏聚力/Pa |        | 内摩擦角/( $^{\circ}$ ) |       | 弹性模量<br>/Pa        | 泊松比  | 抗拉强度<br>/Pa       |
|----------|--|-------|--------|--------|---------------------|-------|--------------------|------|-------------------|
|          | 天然                                     | 饱和    | 天然     | 饱和     | 天然                  | 饱和    |                    |      |                   |
| 碎块石土     | 20.85                                  | 21.32 | 40678  | 30765  | 22.91               | 16.94 | $2.01 \times 10^8$ | 0.24 | $2.0 \times 10^2$ |
| 泥灰岩      | 27.00                                  | 28.00 | 400000 | 370000 | 35.20               | 30.10 | $6.94 \times 10^9$ | 0.26 | $2.0 \times 10^7$ |

### 2.2 计算工况

根据屋场湾的工程地质模型可知,库水位波动是导致滑坡产生变形的主要原因,为此本次数值模拟计算工况的选取主要依据该时间段的库水位调度情况以及相应变形特征进行概化。可根据库水位调度曲线突变点的个数将其概化为 8 种计算工况,包含库水位上升初始阶段(工况 1)、上升阶段(工况 2—工况 4)、下降阶段(工况 5—工况 7)以及下降稳定阶段(工况 8)。

### 2.3 滑坡渗流场计算

屋场湾滑坡渗流分析采用 II-II 监测主剖面为计算模型,利用 GEO-SLOPE/SEEP 模块建立的渗流计算网格模型,如图 5 所示,模型共 555 个节点,440 个单元。

由于缺乏实测的非饱和土体的相关渗透参数,本次计算参照类似岩土体材料,用最小二乘法拟合出 Van Genuchten 模型中的参数,从而得到相应的土水特征曲线,如图 6、图 7 所示。

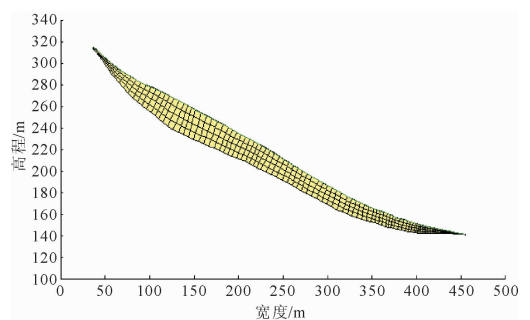


图 5 滑坡渗流计算网格模型

库水位上升稳定阶段作为后续非稳定渗流计算的初始条件。最高库水位之上的坡面节点设置为零流量边界;最高库水位之下的坡面节点设为随时间变化的动水头边界;滑面上的网格节点设置为零流量边界。

根据所建立的渗流计算网格模型,可以得到屋场湾滑坡库水位上升下降阶段的浸润线,如图 8、图 9 所示。由图 8、图 9 可作如下分析:

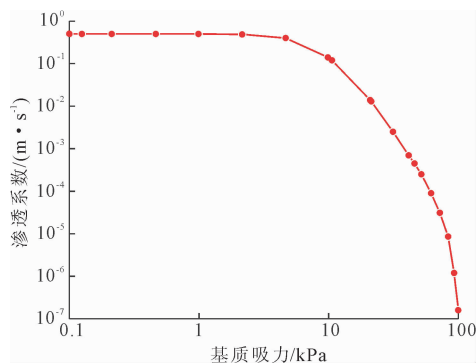


图 6 滑体土渗透系数与基质吸力关系

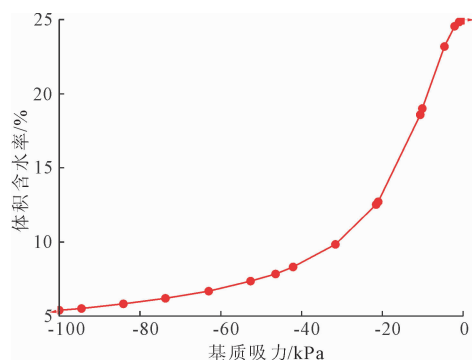


图 7 滑体土体积含水量与基质吸力关系

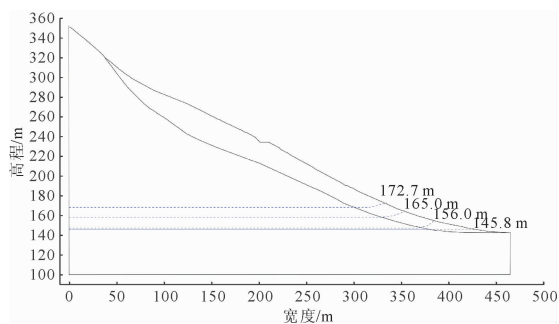


图 8 滑坡库水位上升过程的地下水浸润线

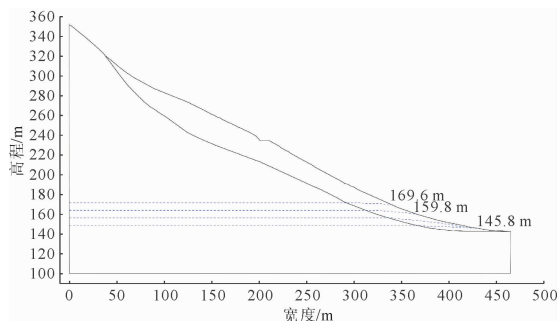


图 9 滑坡库水位下降过程的地下水浸润线

### (1) 地下水浸润线的形态特征

在库水位上升过程中地下水浸润线在坡面一定范围内出现“倒流”现象,浸润线呈“凹”形,且随着库水位的上升凹度逐渐增大,这说明库水补给坡体

内的地下水需要一定的时间;在库水位下降过程中地下水浸润线在坡面一定范围内出现“顺流”现象,浸润线呈“凸”形,且随着库水位的下降凸度逐渐增大,这说明坡体内的地下水向坡外排泄需要一定的时间,这符合已有研究结果<sup>[23]</sup>。

### (2) 地下水动力学的力学机理

在库水位上升过程中,地下水补给使得孔隙水压力增加,降低了滑坡体的稳定性;侧向渗透水压力指向坡体内部,增加了滑坡体的稳定性,且地下水浸润线的凹度越大,前者的作用效应越小,而后者的作用效用越大。在库水位下降过程中,滑坡体内的地下水向库水补给,导致滑坡体内的孔隙水压力减小,增加了滑坡体的稳定性;侧向渗透水压力指向坡体外部,降低了滑坡体的稳定性,且地下水浸润线凸度越大,前者的作用效应越小,而后者的作用效用越大<sup>[24]</sup>。

### (3) 库水作用力学机理与滑坡变形的相关性

由于屋场湾滑坡在库水位上升过程中,尤其 145.8 m 上升至 156.0 m 过程中浸润线的凹度较小,库水产生的渗透压力正效应小于孔隙水压力负效应,故滑坡位移具有增加的趋势;而在库水位下降过程中,浸润线凸度较大,且在库水位从 172.7 m 降至 169.3 m 时尤为明显,即库水产生的渗透压力负效应大于孔隙水压力正效应,故滑坡位移呈急剧增加的趋势。

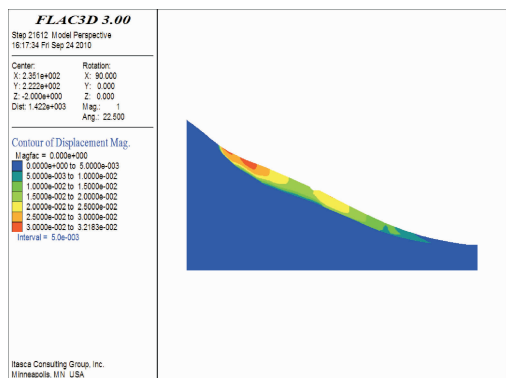
## 3 滑坡变形数值模拟与预测

本次滑坡变形数值模拟分析采用无渗流模式下的渗流场与应力场耦合功能。首先将屋场湾滑坡在不同计算工况下的渗流场转化为 FLAC3D 中的 water table face 数据文件,生成无渗流模式下的孔隙水压力;然后结合屋场湾滑坡数值计算模型进行应力应变计算。根据上述计算原理,求得屋场湾滑坡在不同计算工况下的位移场与破坏状态,如图 10、图 11 所示。图 10、图 11 分别为库水位从 145.8 m 上升到 156.0 m 及库水位从 172.7 m 下降到 169.3 m 时的位移场与破坏状态。

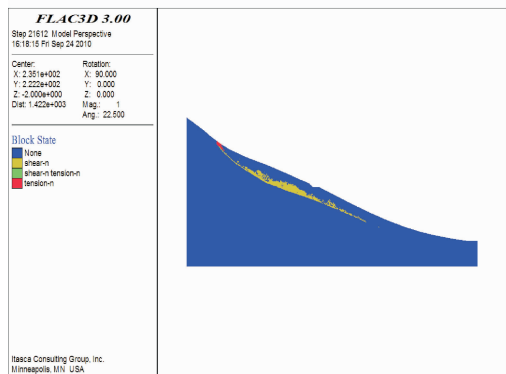
由图 10—图 11 可作如下分析:

### (1) 滑坡变形的空间分布特征

滑坡变形主要集中在中后部(分布高程 170 m ~ 315 m),且后部位移比中部位移要大,但是随着库水位的升降过程滑体的变形由后部逐渐向中前部增大,这说明该滑坡在库水位作用下以推移式破坏为主,即库水位的升降过程对滑体的稳定性影响较大。

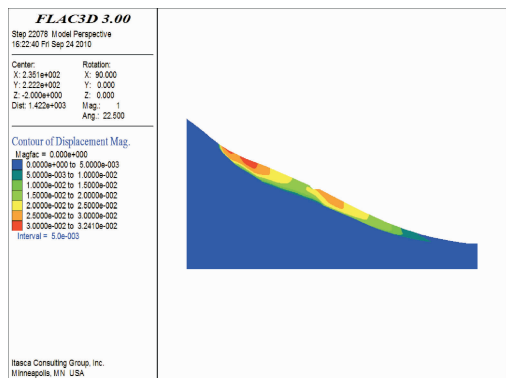


(a) 位移云图

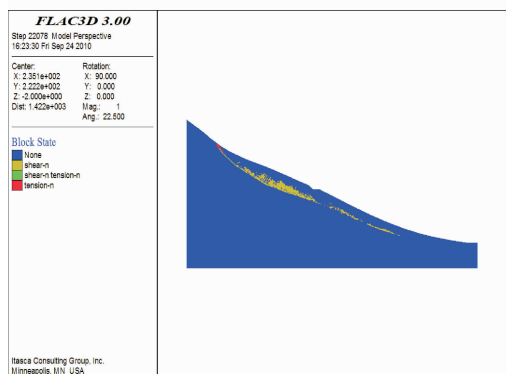


(b) 塑性分布图

图 10 水位 145.8 m 升至 156.0 m 时的位移场与破坏状态



(a) 位移云图



(b) 塑性分布图

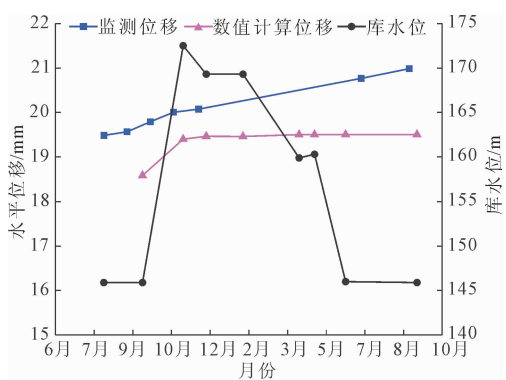
图 11 水位 172.7 m 降至 169.3 m 时的位移场与破坏状态

### (2) 滑坡变形的破坏特征

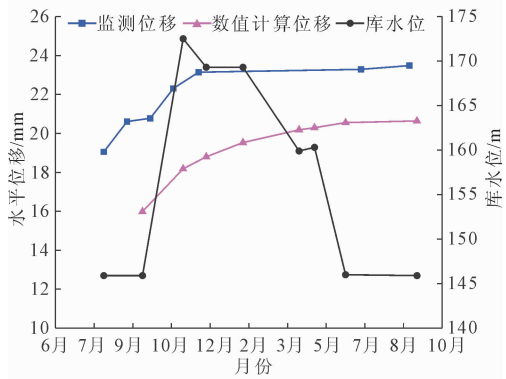
在库水位上升过程中,库水位从 145.8 m 上升至 156.0 m 过程,滑坡变形破坏区域范围较大,这主要是由于在库水位上升过程中,由库水产生的渗透压力正效应小于由地下水产生的孔隙水压力负效应所致,即库水位上升对该滑坡的稳定性是有不利的,其它库水位的上升对滑坡的稳定性还是有利的;在库水位下降过程中,库水位从 172.7 m 下降至 169.3 m 过程滑坡变形破坏区域较大,这主要是由于在库水位下降过程中,由库水产生的渗透压力负效应大于由地下水产生的孔隙水压力正效应所致,即库水位下降对该滑坡的稳定性是不利,而其它的库水位的下降对滑坡的稳定性相对是有利的。

### (3) 滑坡失稳模式

该滑坡边界以及滑坡后部以拉张-剪切破坏模式为主,而滑坡中前部主要以剪切破坏模式为主,当滑坡后部的拉张-剪切破坏区与中前部的剪切破坏区贯通时,该滑坡即将产生失稳。为进一步验证数值模拟计算结果的可靠性,在此将 GPS1 和 GPS2 监测点数值计算收敛位移与实测位移进行了对比分析,如图 12 所示。



(a) 滑坡前部GPS1



(b) 滑坡中部GPS2

图 12 监测点计算位移与实际监测位移对比图

从图 12 可知,滑坡 GPS1 和 GPS2 监测点数值计算位移与实测位移无论从曲线形态还是从位移变

化量值上均具有较好一致性,验证了计算模型的正确性。在位移变化量值上数值计算位移要明显小于实测位移,这主要是由于滑坡中部受到大气降雨和后山地下水的补给所致。

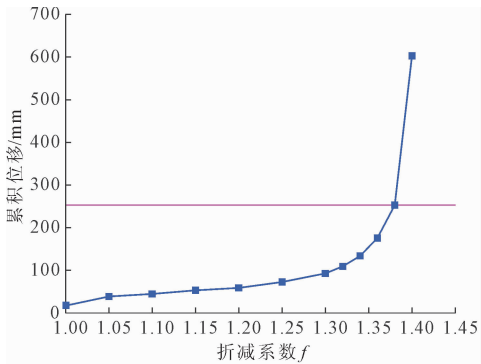
#### 4 基于三维数值模拟的滑坡预报判据

本文滑坡预报判据指标的选取以滑坡抗剪强度参数的折减为计算方法,以最危险工况下的折减系数、特征部位位移、位移变化切线角为预报判据指标。

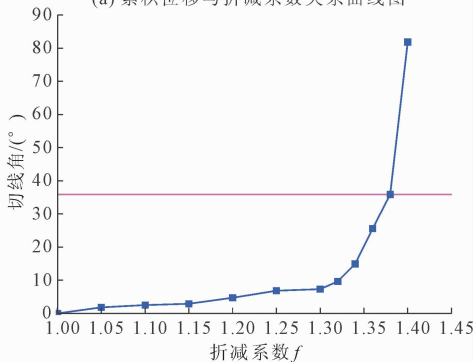
危险工况为库水位从 145.8 m 下降到 156.0 m、从 172.7 m 下降至 169.3 m,特征变形部位为滑坡中后部,与之对应的敏感监测点为 GPS2 监测点(数值计算中的 4 号跟踪点)。取折减系数的取值范围为 1.0~1.4,利用危险工况下的数值计算模型为预测模型,计算的敏感监测点 GPS2 监测点在不同折减系数下的累积位移变化曲线和位移切线角变化曲线。

##### 4.1 库水位上升

库水位从 145.8 m 上升到 156.0 m 条件下的临界位移和临界位移切线角,如图 13 所示。



(a) 累积位移与折减系数关系曲线图



(b) 累积位移切线角与折减系数关系曲线图

图 13 GPS2 监测点累积位移和累积位移切线角

从图 13 可以发现:当折减系数  $f$  从 1.00 增至 1.38 时,监测点累积位移随折减系数的增加而缓慢增加;当折减系数  $f$  大于 1.38 时,监测点位移陡增,这说明之前滑坡还处于稳定状态,此时滑坡发生整体

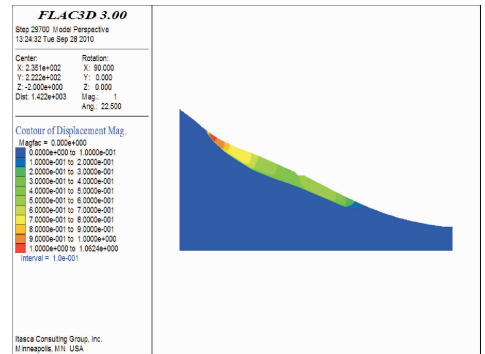
性破坏,即屋场湾滑坡的临界折减系数为 1.32,与之相对应的 GPS2 监测点临界位移量为 253 mm。当折减系数  $f$  从 1.00 增至 1.38 时,监测点累积位移变化切线角随折减系数的增加而呈减速增长趋势  $0 \sim 25.6^\circ$ ;当折减系数  $f$  大于 1.38 时,监测点累积位移变化切线角随折减系数的增加变化而呈加速增长趋势大于  $25.6^\circ$ ,这说明前者的变形受内动力物质系统的控制,是静态变形,而此时的变形则是动态变形,滑坡体已脱离原来的位置,即屋场湾滑坡位移变化的临界切线角为  $25.6^\circ$ 。

通过上述分析建立的屋场湾滑坡综合预报判据指标见表 2 所示。

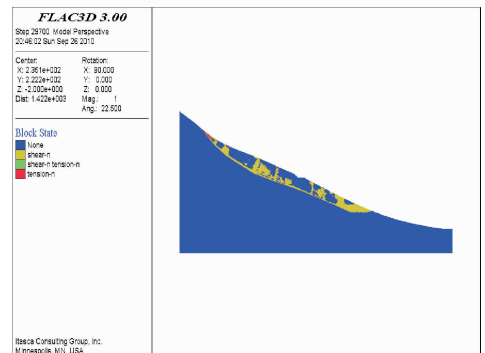
表 2 滑坡预报判据指标成果表

| 预报指标      | 预报判据                                    |
|-----------|---|
| 最危险工况     | 工况 2:库水位从 145.8 m 上升到 156.0 m           |
| 特征部位监测点   | GPS2                                    |
| 临界折减系数    | 1.38                                    |
| 临界抗剪强度参数  | 饱和值: $C=22.3$ kPa; $\varphi=12.6^\circ$ |
| 临界位移(累积值) | 253 mm                                  |
| 临界位移切线角   | $25.6^\circ$                            |

根据上述预报判据指标成果表,在库水位从 145.8 m 上升到 156.0 m 条件下,通过给定的折减系数,屋场湾滑坡失稳时的位移云图与破坏区域,如图 14 所示。



(a) 滑坡失稳时破坏区域位移云图



(b) 滑坡失稳时破坏区域分布图

图 14 滑坡失稳时破坏区域位移及分布图

### 4.2 库水位下降

库水位从 172.7 m 下降到 169.3 m 条件下的临界位移和临界位移切线角,如图 15 所示。

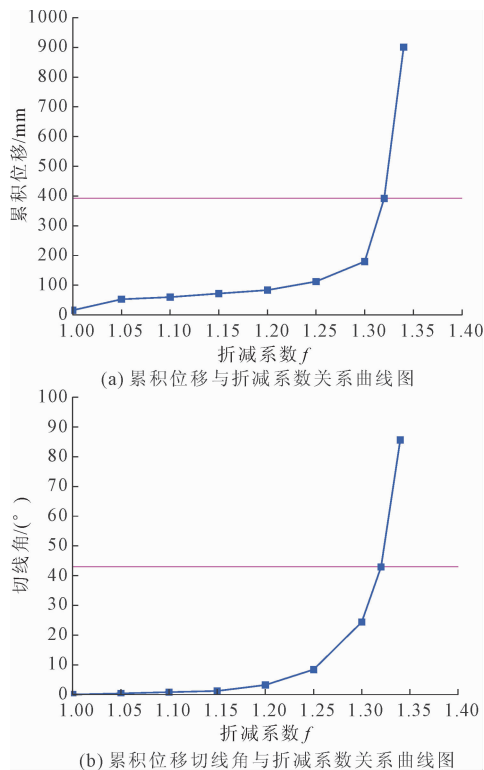


图 15 GPS2 监测点累积位移和累积位移切线角

从图 15 可以发现:当折减系数  $f$  从 1.00 增至 1.32 时,监测点累积位移随折减系数的增加而缓慢增加;当折减系数  $f$  大于 1.32 时,监测点位移陡增,这说明之前滑坡还处于稳定状态,此时滑坡发生整体性破坏,即屋场湾滑坡的临界折减系数为 1.32,与之相对应的 GPS2 监测点临界位移量为 392 mm。当折减系数  $f$  从 1.00 增至 1.32 时,监测点累积位移变化切线角随折减系数的增加而呈减速增长趋势  $0 \sim 43^\circ$ ;当折减系数  $f$  大于 1.32 时,监测点累积位移变化切线角随折减系数的增加变化而呈加速增长趋势大于  $43^\circ$ ,这说明前者的变形受内动力物质系统的控制,是静态变形,而此时的变形则是动态变形,滑坡体已脱离原来的位置,即屋场湾滑坡位移变化的临界切线角为  $43^\circ$ 。

通过上述分析建立的屋场湾滑坡综合预报判据指标见表 3 所示。

根据上述预报判据指标成果表在库水位从 172.7 m 下降到 169.3 m 条件下,通过给定的折减系数,屋场湾滑坡失稳时的位移云图与破坏区域,如图 16 所示。

表 3 滑坡预报判据指标成果表

| 预报指标      | 预报判据  |
|-----------|---|
| 最危险工况     | 工况 5:库水位从 172.7 m 下降到 169.3 m                     |
| 特征部位监测点   | GPS2  |
| 临界折减系数    | 1.32  |
| 临界抗剪强度参数  | 饱和值: $C = 23.3 \text{ kPa}; \varphi = 13.1^\circ$ |
| 临界位移(累积值) | 392 mm  |
| 临界位移切线角   | $43^\circ$  |

从图 16 可以发现:屋场湾滑坡在失稳模式下,其位移等值线与斜坡坡向基本平行,且自前向后、自上而下滑坡位移量值逐渐减小,即滑坡表层位移较深部位移要大,前部位移较后部位移要大。屋场湾滑坡在库水位作用下以整体失稳为主,其失稳部位主要位于高程在 200 m ~ 315 m 之间的滑坡中后部,且失稳周界以拉张-剪切破坏模式为主,其余部位则以剪切破坏模式为主。

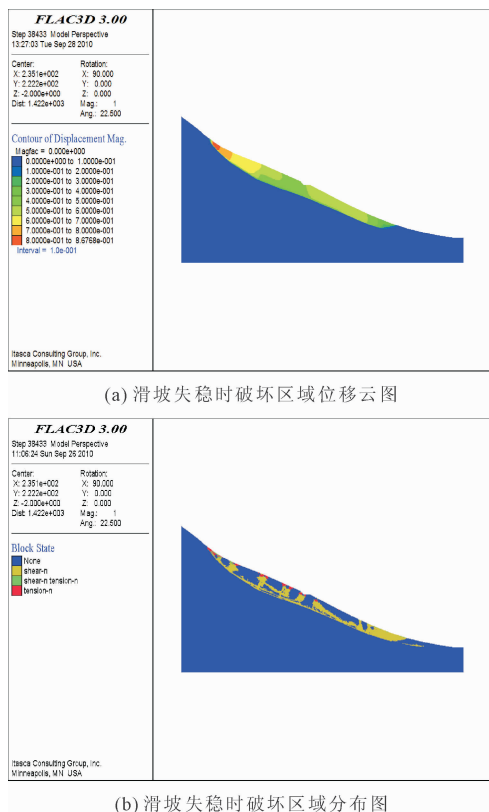


图 16 滑坡失稳时破坏区域位移及分布图

## 5 结论

本文根据地质与监测资料开展水库运行及降雨条件下滑坡变形破坏机理的三维数值分析,对不同水库水位调度下滑坡变形的位移场与破坏状态进行了研究,得到以下结论:

(1) 滑坡变形与库水位具有较好的相关性,而与降雨则相关性不明显,滑坡变形主要受控于库水位作用。

(2) 在库水位作用下滑坡变形主要集中在高程 170 m~315 m 的中后部,库水位升降对该滑坡的稳定性是不利的,促使滑坡中前部的破坏区显著扩大。

(3) 滑坡 GPS1 和 GPS2 监测点数值计算位移与实测位移从曲线形态和量值上具有一致性,在量值上要明显小于实测位移。

(4) 屋场湾滑坡变形以最危险工况下的折减系数、特征部位位移、位移变化切线角为预报判据指标。失稳部位主要位于高程在 200 m~315 m 之间的滑坡中后部,以推移式破坏为主,其余部位则以剪切破坏模式为主。

### 参考文献:

- [1] 孙晓云,段 焯,王明明,等. 基于 VMD 模型和 BSA-KELM 模型的高陡边坡位移预测模型研究[J]. 中国矿业,2022,31(2):78-85.
- [2] 唐维凯,王利岗,赖鹏辉,等. 高寒地区露采高边坡合成孔径雷达在线监测预警研究[J]. 中国矿业,2022,31(2):99-103.
- [3] 李聪聪,王 佟,赵 欣,等. 边坡监测与治理技术在高寒矿区露天煤矿生态修复中的应用研究[J]. 中国矿业,2024,33(4):122-131.
- [4] 史立群,金 鹏,刘青和,等. 可种植式截水盲沟作用下边坡降雨入渗规律特征研究[J]. 中国矿业,2023,32(7):62-71.
- [5] 王 力,南芳芸,王世梅,等. 三峡库区降雨型滑坡入渗特征及变形机制—基于一维和二维模型试验研究[J]. 岩土力学,2023,44(5):1363-1374.
- [6] 朱鸿鹄,王 佳,李厚芝,等. 基于数据挖掘的三峡库区特大滑坡变形关联规则研究[J]. 工程地质学报,2022,30(5):1517-1527.
- [7] 孙文铎,王世梅,王 力,等. 前缘塌岸对三峡库区淹锅沙坝滑坡变形影响分析[J]. 科学技术与工程,2023,23(4):1424-1435.
- [8] 杨 何,汤明高,许 强,等. 长江三峡库区滑坡变形统计特征研究[J]. 灾害学,2021,36(2):37-42.
- [9] 肖诗荣,刘德富,胡志宇. 世界三大典型水库型顺层岩质滑坡工程地质比较研究[J]. 工程地质学报,2010,18(1):52-59.
- [10] 张怡悦,殷坤龙,陈丽霞,等. 奉节县曾家棚滑坡时空

差异性变形特征与成因机制分析[J]. 地质科技通报,2020,39(2):148-157.

- [11] 周 剑,邓茂林,李卓骏,等. 三峡库区杉树槽滑坡成因及视向滑动机制分析[J]. 防灾减灾工程学报,2020,40(6):860-866,883.
- [12] 齐 干,张鸣之,马 娟. 湖北省宜昌市秭归县泄滩乡卡门子湾滑坡[J]. 中国地质灾害与防治学报,2020,31(3):116.
- [13] 吴 琼,唐辉明,王亮清,等. 库水位升降联合降雨作用下库岸边坡中的浸润线研究[J]. 岩土力学,2009,30(10):3025-3031.
- [14] Xu Ling, Dai Fuchu, Chen Jian, et al. Analysis of a progressive slope failure in the Xiangjiaba reservoir area, Southwest China[J]. Landslides, 2014,11(1):55-66.
- [15] Yang Hufeng, Wang Fawu. Influence of water level drawdown on landslide movement in reservoir[C]//Proceeding of the 3rd World Landslide Forum: Landslide Science for a Safer Geoenvironment, 2014:703-708.
- [16] 司金波,来有邦,叶会师,等. 露天矿薄层状岩质边坡顺层滑坡特征和形成机制[J]. 中国矿业,2023,32(4):81-90.
- [17] 蒋佩伶,王志松,蒋 越,等. 基于 MatDEM 对高陡边坡裂隙岩体失稳演化机制的研究[J]. 中国矿业,2023,32(2):51-60.
- [18] 何旭乾,卢才武,李 萌,等. 基于无人机调查的露天矿滑坡运动特征数值研究[J]. 中国矿业,2022,31.
- [19] 刘佳意,陈春利,付昱凯,等. 降雨诱发的浅表堆积层滑坡成因机理与稳定性预测模型[J]. 水文地质工程地质,2024,51(2):183-191.
- [20] 李仁江,魏明奎,赵小铭,等. 考虑滞后性变化的滑坡位移预测模型研究[J]. 人民长江,2023,54(11):99-105.
- [21] 江文金,冷小鹏,林 祥,等. 基于时间序列与时间卷积网络的滑坡位移预测[J]. 科学技术与工程,2023,23(9):3672-3679.
- [22] 高连通,易夏玮,李 喜,等. 三峡库区典型滑坡变形与高水位涨落关系研究[J]. 地质科技情报,2011,30(4):132-136.
- [23] 王 鹏,殷坤龙,孟颂颂. 增大库水位日降幅联合降雨条件下张家祠堂滑坡稳定性分析[J]. 安全与环境工程,2016,23(5):36-42.
- [24] 李新卫,晏鄂川,朱大鹏. 库水作用下含挡墙滑坡的抗滑桩加固空间位置优化研究[J]. 科学技术与工程,2016,16(11):86-92.