

https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.109



# 库水—降雨作用下直线形基覆面堆积层滑坡失稳演化机制

罗世林<sup>1,2,3</sup>, 黄 达<sup>2\*</sup>, 蒋建清<sup>1,3</sup>, 刘华亮<sup>1,3</sup>, 龙 会<sup>1</sup>

1. 长沙学院土木工程学院, 湖南长沙 410022

2. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西西安 710054

3. 公路工程自然灾害风险普查大数据智慧应用湖南省重点实验室, 湖南长沙 410022

**摘要:** 为研究库水—降雨作用下库区直线形基覆面堆积层滑坡响应机制, 以曲尺县塔坪 H1 滑坡为例, 通过地质勘察和监测数据分析, 并结合相关性理论及离散元法, 揭示了滑坡变形特点及失稳演化机制。发现塔坪 H1 滑坡为阶梯式变形模式, 且其变形速率随高程的增加而降低; 库水和降雨均是滑坡变形的重要外部诱发因素, 持续的库水下降产生的渗流作用迫使滑坡前部变形显著; 库水位涨落期间, 持续的降雨入渗作用对滑坡中部变形影响明显。库水—降雨联合作用下, 滑坡前缘表层岩体率先剥落, 发展至坡体前部破坏, 再到坡体中部破坏, 呈多级牵引式破坏演化。目前塔坪 H1 滑坡前部和中部处于持续变形阶段, 亟需开展滑坡防治工程, 提高滑坡稳定性。

**关键词:** 堆积层滑坡; 直线形基覆面; 变形特点; 失稳演化机制; 离散元法; 工程地质。

中图分类号: TU457

文章编号: 1000-2383(2025)06-2330-12

收稿日期: 2024-04-10

## Failure Evolution of Accumulated Landslide with Line-Like Interface between Sliding Mass and Bedrock under Combined Influence of Reservoir Water and Rainfall

Luo Shilin<sup>1,2,3</sup>, Huang Da<sup>2\*</sup>, Jiang Jianqing<sup>1,3</sup>, Liu Hualiang<sup>1,3</sup>, Long Hui<sup>1</sup>

1. School of Civil Engineering, Changsha University, Changsha 410022, China

2. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

3. Hunan Provincial Key Laboratory for Big Data Smart Application of Natural Disaster Risks Survey of Highway Engineering, Changsha 410022, China

**Abstract:** To study the landslide response mechanism of accumulated landslide with line-like interface between sliding mass and bedrock under the coupling action of reservoir water and rainfall. Taking the Taping H1 landslide in Quchi County as an example, the characteristics of landslide movement and instability evolution mechanism are revealed through engineering geological survey

**基金项目:** 国家自然科学基金(Nos.42277187, 42407279); 国家自然科学基金联合重点项目(No.U23A202579); 湖南省自然科学基金(Nos.2023JJ40076, 2022JJ40525); 湖南省重点实验室开放课题(No.BNH2024KFB04)。

**作者简介:** 罗世林(1990—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水动力型滑坡灾害机理研究。ORCID: 0000-0003-2680-2207。E-mail: rosilynn@ccsu.edu.cn

\* **通讯作者:** 黄达, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害防治及稳定性评价等教学与科研工作。ORCID: 0000-0002-2795-1354。E-mail: huangda@chd.edu.cn

**引用格式:** 罗世林, 黄达, 蒋建清, 刘华亮, 龙会, 2025. 库水—降雨作用下直线形基覆面堆积层滑坡失稳演化机制. 地球科学, 50(6): 2330—2341.

**Citation:** Luo Shilin, Huang Da, Jiang Jianqing, Liu Hualiang, Long Hui, 2025. Failure Evolution of Accumulated Landslide with Line-Like Interface between Sliding Mass and Bedrock under Combined Influence of Reservoir Water and Rainfall. *Earth Science*, 50(6): 2330—2341.

and monitoring data analysis as well as combined with correlation theory and discrete element method. Taping H1 landslide has a stepped deformation mode, and the landslide deformation rate decreases with the rising of the elevation. Both reservoir water and rainfall are considered as governed external factors affecting landslide deformation, the seepage effect caused by the continuous drop of reservoir water resulting in obvious slope deformation at the front of the landslide, and during the fluctuation of reservoir water level, uninterrupted rainfall infiltration has a significant positive effect on the slope movement at the middle part of the landslide. Under the combined action of reservoir water and rainfall, the landslide instability will first occur at the surface rock mass at the toe, and then developed from the front of the landslide to the middle of the landslide, showing the landslide exhibited a multi-stage retrogression-type failure evolution. At present, the deformation at the front and middle parts of the Taping H1 landslide is continuous, and it is urgent to carry out landslide prevention and control projects to improve the landslide stability.

**Key words:** accumulated landslide; line-like interface; deformation characteristics; failure evolution mechanism; discrete element method; engineering geology.

## 0 引言

受地质条件、地形地貌和气候等因素多重影响,我国是世界上地质灾害发生最为频繁的国家之一(Liu and Miao, 2018; Zhang *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2023).近年来,随着国民经济的发展与长江经济带的部署和建设,我国陆续建成了三峡、葛洲坝、溪洛渡、向家坝等一批大中型水库.三峡库区位于长江流域中上游,自2003年蓄水以来,库岸长期遭受周期性库水波动和季节性降雨影响,原本稳定的库岸出现变形破坏(Tang *et al.*, 2019; Juang, 2021; Miao *et al.*, 2023; 蒋水华等, 2024).《三峡库区地质灾害防治总体规划》报告中指出在175 m水位范围内涉及到的滑坡共有1 190个,大多数为堆积层滑坡(莫伟伟等, 2006).

堆积层滑坡通常有着较为清晰的基覆面,基覆面按其形态特征可分为直线形、折线形和椅子形等(Luo *et al.*, 2022).直线形基覆面是库区堆积层滑坡中较为常见的形态且通常发育在缓倾角至中等倾角外倾层状斜坡体中(孙永帅和胡瑞林, 2016),其形成过程一般可归纳如下:长江的不断侵蚀下切作用,导致坡体前缘临空面积/范围增加,当上覆岩体的下滑力超过基覆面的抗滑力时,斜坡岩体就会沿岩层面开始滑移变形,一旦后缘拉裂面贯通,滑坡就会迅速下滑.因此,该类滑坡的成因机制一般为滑移-拉裂.直线形基覆面的倾角从滑坡后部到前部变化较小,整个滑坡没有明显抗滑段/阻滑段,因此具有此类基覆面形态的库区堆积层滑坡极易在外部因素(如库水、降雨、爆破以及人工开挖)的影响下产生失稳破坏,较为典型的案例有马家沟滑坡(Han *et al.*, 2021; 李岚星等, 2024)、大面滑坡(汤明高等, 2020)以及胡家沱滑坡(李松林等,

2017)等,严重威胁库岸两侧居民的生命财产安全以及长江航道甚至大坝的安全使用.鉴于直线形基覆面是较为常见的一种基覆面形态,此类滑坡没有明显的抗/阻滑段并在受外部扰动作用下极易失稳破坏,造成严重灾难性后果,因此本文聚焦直线形基覆面堆积层滑坡.

位于重庆市巫山县的塔坪滑坡,是一个典型的堆积层滑坡,其基覆面形态为直线形.前人对塔坪滑坡的变形特征、破坏模式以及稳定性等方面开展了详细的研究,取得了丰硕的研究成果.如杨雨亭等(2024)基于长达9年的多源监测数据发现,降雨主要影响塔坪滑坡浅层稳定性,库水位上升和下降分别对滑坡的深层和浅层稳定性产生不同影响;殷跃平等(2022)采用数值模拟和解析解相结合的方法探索了库水位快速下降期滑体内水力梯度和滑坡安全系数演化规律;进一步,史绪国等(2019)基于InSAR技术认为降雨和水位变化是坡体稳定性最大的两个影响因素;谢韬(2019)基于InSAR技术获取了塔坪滑坡2015年至2017年时间序列形变信息,揭示了滑坡的形变时空特性,认为滑坡在降雨-库水位涨落耦合作用下将呈现出渐进式破坏特征.但在涉及滑坡不同部位变形主控因素以及滑坡失稳破坏演化方面还有待进一步分析.因此本文在详细地质勘察的基础上,基于长达8年GPS监测数据厘清了滑坡变形的分区和多期次特点;基于此,采用相关性理论进一步探明了滑坡变形的主控影响因素,最后采用离散元软件UDEC重现了在主控影响因素(库水和降雨)作用下塔坪滑坡失稳破坏演化的全过程.研究成果为三峡库区直线形基覆面堆积层滑坡的系统研究与防治以及为准确辨识此类堆积层滑坡的稳定性提供一定参考依据.

### 1 滑坡工程地质背景

塔坪滑坡位于重庆市巫山县曲尺乡,长江北岸,滑坡区后缘高程为 310 m,前缘高程 80 m 左右,总体积约为  $3.08 \times 10^7 \text{ m}^3$ . 勘察资料显示塔坪滑坡是一个古滑坡,目前处于整理稳定状态,其前部存在 2 个次级滑坡,其中西南区域的 H1 滑坡为塔坪滑坡的主要复活变形区,因此本文仅研究 H1 滑坡,即塔坪 H1 滑坡.

塔坪 H1 滑坡平面形态为敞口形(图 1),西侧边界为绞滩沟,东侧边界为沙湾子沟,该边界也是 2 个次级滑坡的分界处. 滑坡的前缘高程在 145 m 之下,但后缘高程却高达 300 m,长度范围在 530~580 m,宽度范围在 480~550 m,总面积为  $2.83 \times 10^5 \text{ m}^2$ ,滑坡总体量约为  $1.270 \times 10^7 \text{ m}^3$ . 位于滑坡前缘,靠近长江水域的坡度为  $17^\circ \sim 37^\circ$ ,而处于滑坡后缘的坡度范围在  $2^\circ \sim 5^\circ$ .

根据地勘报告结果绘制的工程地质剖面图如



图 1 塔坪 H1 滑坡航拍

Fig.1 The aerial photo of Taping H1 landslide

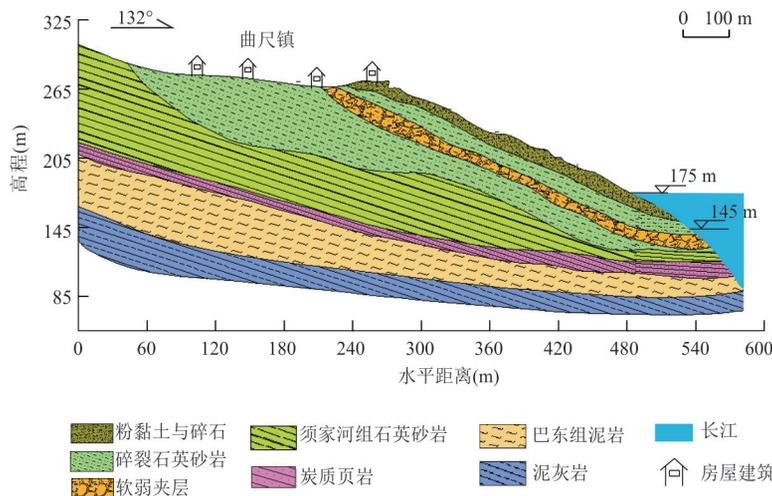


图 2 滑坡地层岩性横断面图(1-1 剖面, 图 1)

Fig.2 Geological cross-section about subsurface stratigraphy of the instability(1-1 profile in Fig.1)

图 2 所示,塔坪 H1 滑坡堆积体浅表层主要覆盖有粉质黏土夹碎块石,下部为碎裂石英砂岩. 粉质黏土夹碎块石的层厚约为 13 m,其中粉质黏土呈黄色,稍湿且具有硬塑性特点,碎块石主要由砂岩和页岩组成,含量为 10%~40%. 滑坡堆积体范围内的碎裂石英砂岩层厚度范围在 26~60 m,从坡顶到坡脚厚度逐渐降低,其中块石尺寸大小集中在 0.3~1.1 m 范围内. 此外,塔坪 H1 滑坡碎裂石英砂岩中发育有碎石土层(弱夹层),该弱夹层的平均厚度为 14 m. 基岩主要为三叠系上统的砂岩和页岩,以及三叠系中统的泥岩和灰岩. 滑坡后缘基岩露头显示岩层产状为  $130^\circ \sim 143^\circ / 20^\circ \sim 25^\circ$ ,而在坡脚处,岩层倾角则近乎水平. 考虑到该水平段的长度较短,塔坪 H1 滑坡可视为一个典型的直线形基覆面堆积层滑坡.

### 2 滑坡变形特点及影响因素

#### 2.1 滑坡宏观变形特征

在库水长期浸润软化及降雨共同作用下,塔坪滑坡靠近长江水域范围内的坡体从 2002 年起至今发生了多起不同规模大小的坡体局部崩塌失稳事件(图 3a). 且由于库区蓄水的影响,滑坡变形程度逐步加剧,破坏范围不断拓宽. 通过现场实地踏勘,发现在滑坡中部区域广泛发育有羽状裂缝,其裂缝延伸长度在 3 m 左右,深度在 20~40 cm 范围内分布(图 3b),此外,巫山—曲尺公路出现多条长逾 300 m,宽 5.0~10.0 cm 的连续拉裂缝(图 3c)且公路附近部分房屋也出现不同程度的地基错动(图 3d)和墙体开裂(图 3e). 全库容运行后,在库水位涨落

和雨季旱季更迭的双重作用下,滑坡变形程度进一步加剧,一方面,裂缝的宽度不断扩张,另一方面,裂缝长度不断变长并向滑坡体后缘延伸,最终引发坡体中上部出现高度约为 3.5 m 的陡坎以及宽度达 24 cm 的裂缝(图 3f).

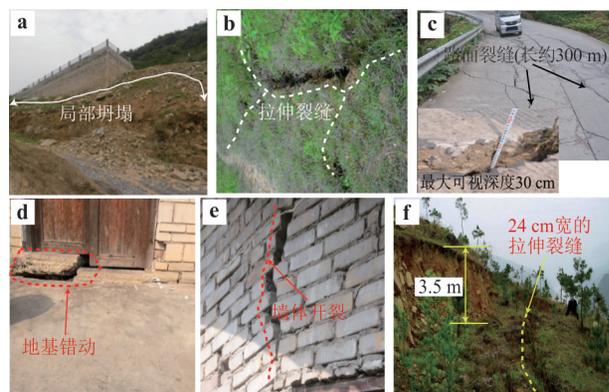


图 3 现场勘察滑坡变形破坏特征

Fig.3 Field observations of the activities in the Taping H1 landslide

a. 坡脚局部破坏①; b. 中部坡体的拉伸裂缝②; c. 路面破坏③; d. 房屋地基错动④; e. 房屋墙体开裂⑤; f. 后缘陡坎⑥; 滑坡宏观变形破坏位置见图 1

### 2.2 滑坡变形分区特征

通过图 4 可以发现,处于滑坡体上部的 GPS 测站如 JC16、JC23、JC37~JC39,其箭头所指方向即运动方向皆与其所在区域的等高线保持近乎垂直的关系,这是受到了滑坡区域微地貌的影响.根据 GPS 测站监测所得的滑坡体各区域变形速率可以发现滑坡体东南部测点的滑坡变形速率要明显大于其他区域,其最大变形速率位于滑坡体前缘 JC26 测点处,高达 8.79 mm/月,因而滑坡体东南部区域(坡脚至坡体中部(高程约为 247 m))可视作滑坡的强变形区,图 4 中通过淡紫色渲染表示.然而,滑坡体上部 GPS 测站监测所得的滑坡变形速率大体上均小于滑坡中下部东南区域的运动速率,说明滑坡上部处于准稳定状态.

### 2.3 滑坡变形多期次特征

选取滑坡上 8 个监测时间段为 2009 年 11 月—2017 年 11 月的 GPS 测点数据,进一步展开分析阐述滑坡在库水-降雨联合作用下滑坡变形的多期次特点,相应结果见图 5.通过图 5 可以发现,滑坡累计位移随时间的变化曲线形状呈“阶梯状”,具体表现为随着时间的延长,滑坡位移变化速率在快慢之间交替变化,总变形量逐步上升.到 2017 年 11 月,

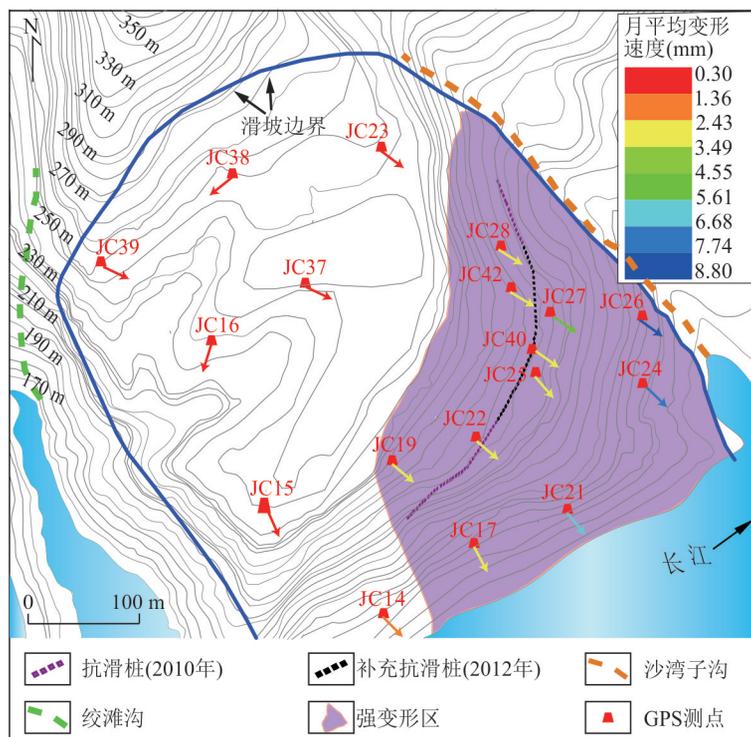


图 4 滑坡变形分区特点(2009-11—2017-10)

Fig.4 The zoning characteristics of landslide movement(2009-11—2017-10)

箭头的颜色代表滑坡的运动方向和大小

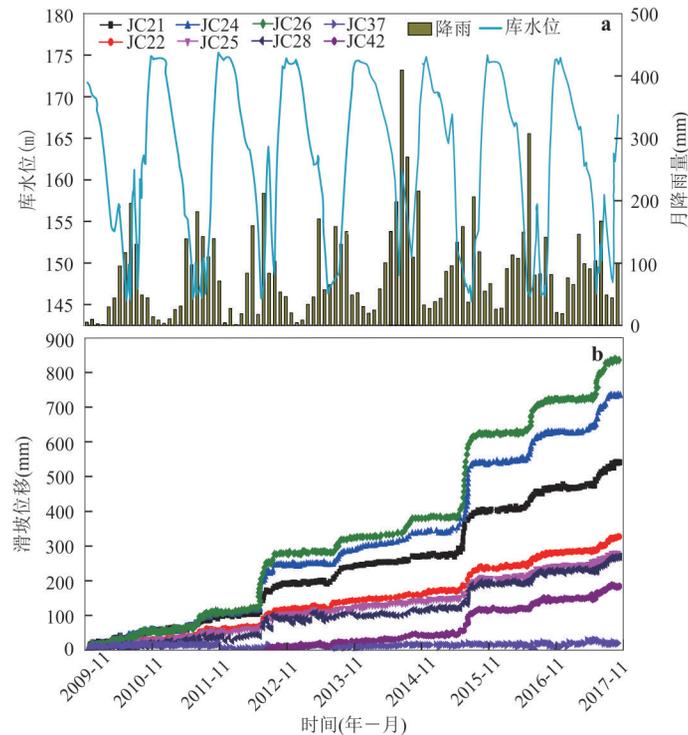


图5 滑坡变形与库水和降雨监测数据

Fig.5 The monitoring data on slope movement, reservoir water level and precipitation

各测点的累计位移量达到最大值,其中坡脚处的累计位移量最大.以滑坡坡脚处测点 JC26 为例,自 2009 年 11 月—2017 年 11 月该点的累计位移高达 835.3 mm.

为了进一步分析塔坪 H1 滑坡的多期次变形特点,聚焦图 5 中累计位移快速上升阶段,即以滑坡快速变形阶段为研究对象,计算出上述 8 个不同空间位置测点在每一个快速变形阶段的变形速率与位移增量,所得结果如图 6 所示.由图 6 可知,2012 年—2014 年,由于滑坡补充治理工程对边坡的加固作用,滑坡变形速率极大放缓,呈现出明显的下降趋势.然而在 2015 年,滑坡的变形速率却急剧上升,达到最大值,这或许与“东方之星”号客轮打捞所造成的库水位快速下降有关.此后的两年(2016、2017 年),滑坡快速变形阶段的平均变形速率虽相比于 2015 年极大程度降低,但仍明显大于 2013 年的滑坡平均变形速率,且此期间的滑坡位移增量相较于 2013 年也更大(图 6b),倘若滑坡在后期的变形无法得到有效控制,滑坡平均变形速率进一步上升(图 6a 中红色箭头),滑坡变形加剧,可认为滑坡有很大几率产生失稳破坏;反之则反(图 6a 中绿色箭头).

#### 2.4 滑坡变形影响因素

为进一步探究滑坡变形影响因素,本文选取 8

个不同坡体部位的典型 GPS 测点监测数据开展分析,其中 JC26 和 JC24 以及 JC21 位于坡体前部, JC22、JC25、JC28 和 JC42 位于坡体中部, JC37 则位于坡体后部.基于相关性理论,采用 Python 语言进行编程,探究库水位波动、降雨作用与滑坡变形速率的相关性程度.文中相关性程度由皮尔逊相关系数( $P$ )和显著性水平( $Sig$ )共同决定,皮尔逊相关系数的绝对值越靠近 1,则说明两个变量的相关性越强,反之则越弱.需要注意的是判定两个变量具有明显相关性,即相关性程度高的充分必要条件是: $P$  的绝对值较高且  $Sig$  值较小( $<0.05$ ).皮尔逊相关系数定义为两个变量之间的协方差和标准差的商,其计算公式为:

$$p = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{D(X)} \sqrt{D(Y)}} = \frac{E((X - EX)(Y - EY))}{\sqrt{D(X)} \sqrt{D(Y)}}, \quad (1)$$

式(1)中: $P$ 表示相关性系数; $E$ 为数学期望值; $D$ 为方差, $D$ 开根号为标准差, $E((X - EX)(Y - EY))$ 表示随即变量  $X$  和  $Y$  的协方差,记为  $\text{Cov}(X, Y)$ .

图 7 和图 8 分别为库水位波动、降雨与滑坡变形速率的相关性计算结果.如图 7 所示,滑坡前、中部各测点的滑坡变形速率与其所对应的库水下降速率呈正相关且对应的显著性数值  $Sig$  基本是零

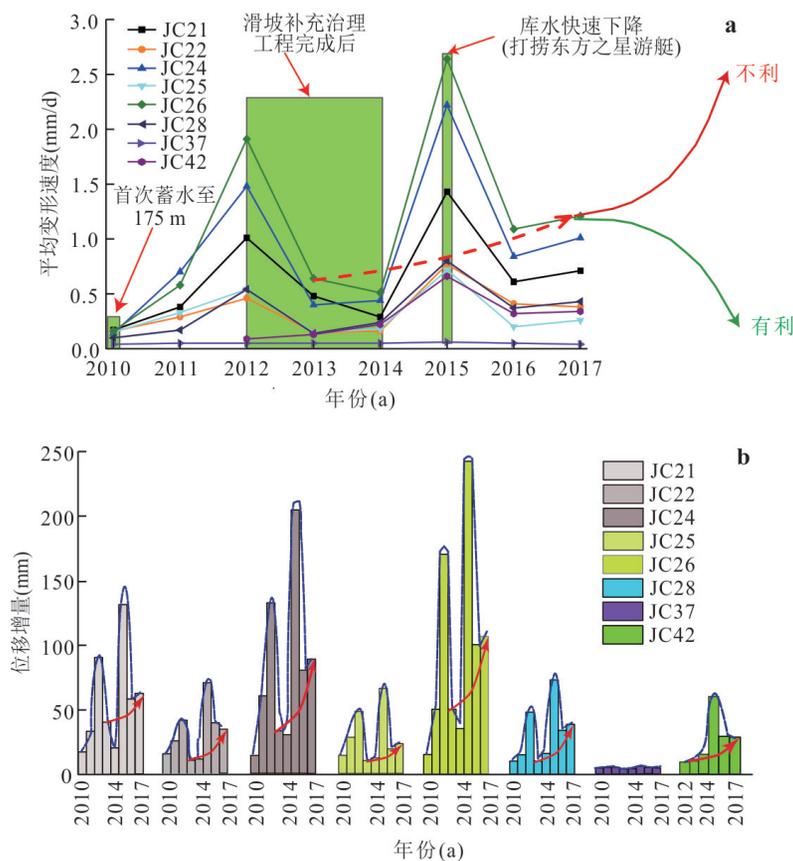


图 6 快速变形阶段中的平均速度(a)和位移增量(b)

Fig.6 The average displacement velocities (a) and displacement increments (b) during faster movement periods

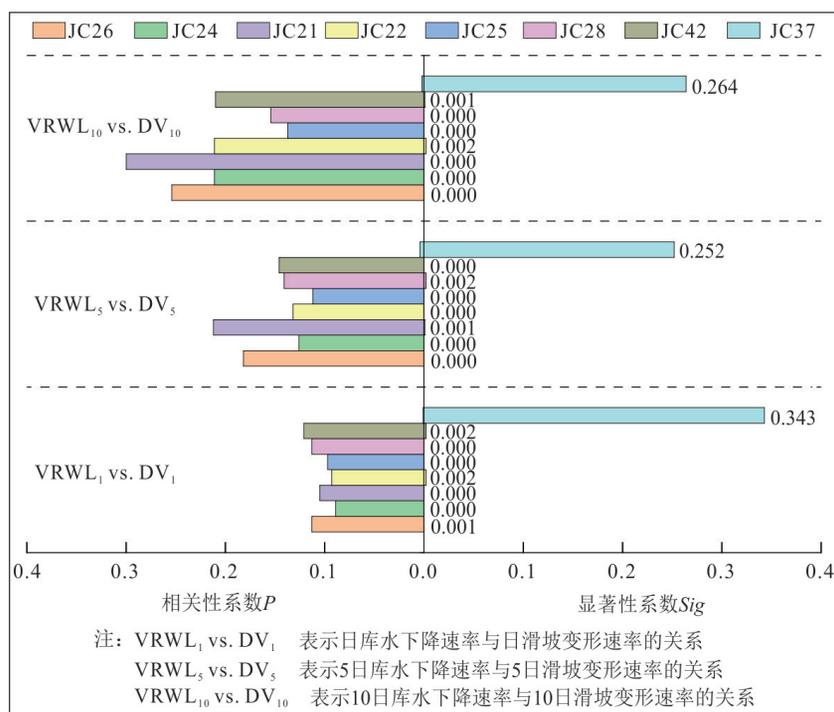


图 7 库水波动与滑坡变形相关性计算结果

Fig.7 The correlation between reservoir water fluctuation and landslide deformation

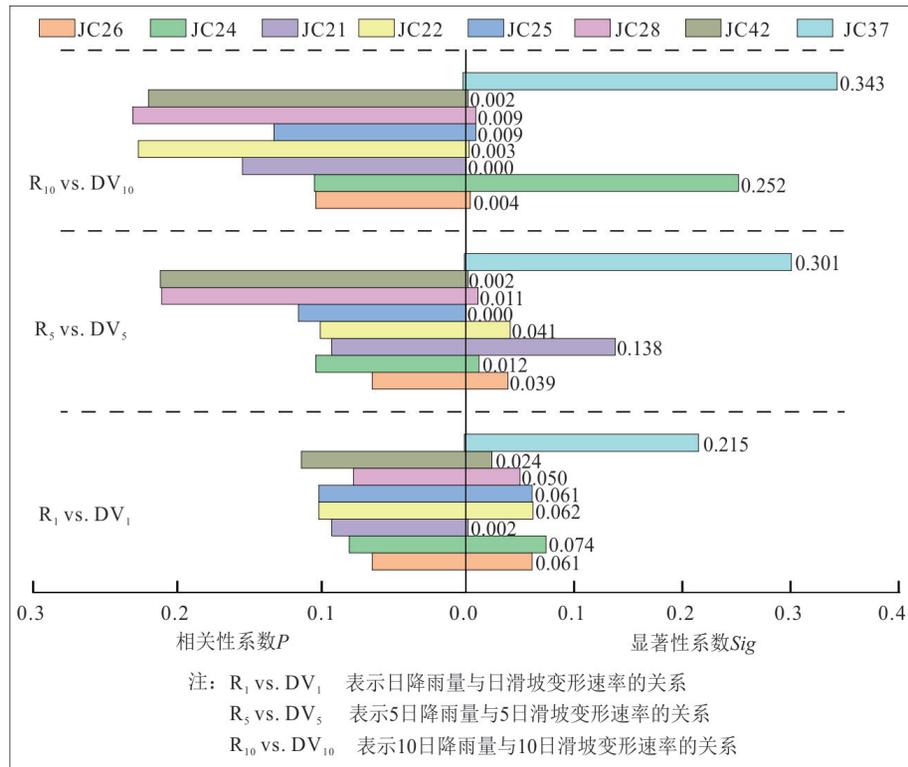


图8 降雨与滑坡变形相关性计算结果

Fig.8 The correlation between rainfall and landslide deformation

(最大仅为0.002),这说明库水位的下降对复活区滑坡的变形存在促进作用.然而坡体近坡顶端的变形受库水位波动的影响较小,两者相关性较弱,以坡体后部JC37测点的计算结果为例,其相关系数 $P$ 值极小,均近似为零,但显著性数值 $Sig$ 皆大于0.05.此外,计算结果表明库水位下降的持续时间越长,其与坡体变形的相关性也越明显,且显著性也非常强,因此,可以认为持续的水位下降会促使滑坡变形进一步加剧,尤其是滑坡体前部的变形,受库水下降的影响明显.

由图8可以发现,降雨与滑坡变形相关性系数 $P$ 值大小均为正值,且对于几乎所有的GPS测点,相关性系数 $P$ 与降雨时长呈正相关,显著性 $Sig$ 与降雨时长呈负相关,具体表现为相关性系数 $P$ 随着降雨时长的增加而增大,显著性 $Sig$ 随着降雨时长的增加而降低,这表明随着降雨的持续时间延长,其所导致的滑坡变形也越明显(相关性系数增大),且此种情况下的显著性也相应越强.除此之外,降雨作用下,滑坡不同区域的相关性表现出一定的差异,滑坡中部的 $P$ 值通常要比滑坡前部大,而 $Sig$ 值则相反,这表明降雨条件下,坡体的变形会进一步加剧,尤其是滑坡体中部受降雨入渗的影响较大,

雨水的入渗对坡体的变形起到了促进作用.

### 3 滑坡失稳演化离散元数值模拟

#### 3.1 模型建立和参数确定

通用离散元程序(universal distinct element code, UDEC)作为一款岩土工程数值分析首选工具,具有的突出优势是能为物理不稳定问题提供稳定解.基于离散单元法理论特点,UDEC特别适用于模拟具有大变形和流动的物质.特别地,UDEC中内嵌的渗流模块为本次研究流-固耦合作用下藕塘滑坡变形破坏机制特征提供了有力保障.本次数值模拟中滑体中的块石用block表示,连接块石的土体则用contact表示.

根据滑坡地层岩性横断面图(图2),采用AutoCAD软件提取滑体,滑带和基岩边界坐标点并导入UDEC中.在UDEC模型中采用多种方法对滑坡进行网格划分:对于基岩,考虑其完整性较好且强度较高,综合使用UDEC中的Jset、Jregion和crack命令对其进行网格划分,并使得基岩中的不连续块体(block)具有基本相同的长度和宽度,本文基岩中的块体尺寸(长宽比)约为2.2.滑体和滑带的组成物质基本为碎石和土,且碎石形态不一.考虑到UDEC

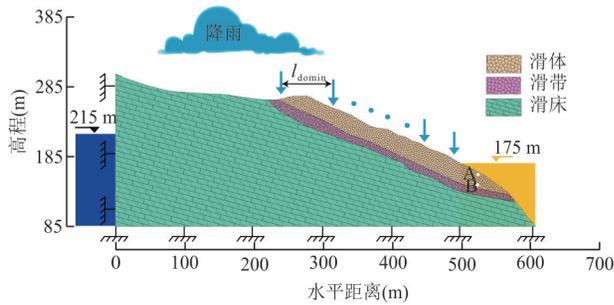


图9 滑坡离散元数值模型

Fig.9 DEM model of Taping H1 landslide

表1 滑坡数值模型中材料细观参数

Table 1 The micro parameters in numerical model

类型	参数	基岩	滑带	滑体
岩块	$d$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2 400	2 200	2 200
	$Jk_s$ (GPa/m)	6	4	4
	$Jk_n$ (GPa/m)	10	7	7
	$J_f$ ( $^\circ$ )	22	13	17
节理	$J_c$ (MPa)	2.1	0.41	0.43
	$J_t$ (MPa)	2.1	0.21	0.26
	$a_{\text{res}}$ (m)	0.003	0.006	0.006
	$a_{\text{zero}}$ (m)	0.004	0.02	0.02
	$a_{\text{max}}$ (m)	0.06	0.2	0.2

注: $d$ :密度; $Jk_s$ 和 $Jk_n$ 分别指节理剪切和法向刚度; $J_f$ 、 $J_c$ 和 $J_t$ 分别指节理内摩擦角、内聚力和抗拉强度; $a_{\text{res}}$ 、 $a_{\text{max}}$ 和 $a_{\text{zero}}$ 分别指最小、最大以及零法向压力下节理宽度。

中的Voronoi(泰森)命令具有将模型划分为不同形态的block功能,并且滑带的碎石尺寸通常要大于滑体的碎石尺寸,因此本文在使用Voronoi(泰森)命令时,将滑体和滑带的块体边长平均值分别设定为3.2 m和2.0 m.为研究降雨和库水联合作用下的滑坡失稳演化,综合使用模型中‘domain’结构和fish语言,实现降雨从坡面注入和库水从模型右侧表面流入.为模拟最不利条件并加快计算速度,以2014年8月27日记录的最大日降雨量(105 mm),即恒定流量为0.5 L/s作为数值模型中雨季期间的雨水注入速率.图9为塔坪H1滑坡离散元数值模型.

数值模型参数由基岩、滑体和滑带强度参数3部分组成.构成基岩的块体与节理的细观参数以及滑体的细观参数取值是基于地质勘察资料并采用强度校核的手段确定的.需要说明的是,目前几乎没有论文涉及如何在UDEC模型中获取最小、最大以及零法向压力下节理宽度( $a_{\text{res}}$ 、 $a_{\text{max}}$ 和 $a_{\text{zero}}$ )值以及这3个参数大小以及它们对建模结果的影响.事

实上,UDEC的使用手册也说明了这3个参数几乎不能被测出.本文从两个方面来确定这3个参数的取值:首先通过UDEC的使用手册确定3个参数的取值范围和数量级,随后通过试错法调整3个参数,直到模拟结果接近监测结果.所有参数取值如表1所示.

### 3.2 塔坪滑坡失稳演化机制

库水-降雨联合作用下塔坪H1滑坡的变形失稳具有明显的牵引式特点,其演化阶段可概括为:坡脚表层剥落阶段、坡体前缘破坏阶段和坡体中部破坏阶段,各阶段特点如下.

(1)坡脚表层剥落阶段.如图10a所示,坡体的变形程度由内至外逐渐增大,且顺坡向下随着坡体高程的降低,越靠近坡脚,坡体变形量越大,其最大变形区域位于边坡下部坡脚处,位移量达到了 $4.79\text{e-}4$  m,数值模拟结果与前文所述的滑坡现场GPS监测数据相吻合.图10b为坡体内的渗流场计算结果,可以发现坡体下部坡脚处近坡表区域的渗流速度要明显大于坡体内的渗流速度,这表明近坡表处块体的变形量也在相应增大.

图11显示的是坡脚不同高程处位移监测点A、B(具体位置见图9)所监测的X向水平位移量随计算时步的变化曲线.可以发现,在第一个水文年即第一个库水循环周期内,坡脚A、B测点X向位移量在初期急剧增大,位移曲线呈直线上升,但在后期,位移量逐渐减小至近乎为0,其位移水平与初始状态相当,这说明在此期间坡体的变形主要为弹性变形;而在第二个库水循环周期内,坡脚A、B测点处X向位移量同样先增大后减小,但A、B两测点X向位移在达到峰值后的下降程度明显要小于第一个库水循环周期,位移量并没有恢复至第二个库水循环周期开始时的水平,尤其是近坡表处的A测点,其X向位移恢复程度显著降低,说明在此期间内坡体的变形主要为塑性变形,这可能是因为坡脚处的岩体在库水-降雨联合作用下,受到水流持续的冲刷、软化作用,尤其是库水的长期浸泡,导致岩体强度不断降低,损伤不断累积,因而坡体变形程度加剧,进而产生了不可逆的塑性变形.随着库水循环次数的增加,塔坪H1滑坡坡脚处浅表层局部范围内的岩体开始出现剥落、掉块(图12),这与现场调查的结果相吻合(图3a).

(2)坡体前缘破坏阶段.与图12相比,进入该阶段后,处于库水影响范围内的坡脚岩体在受到自身

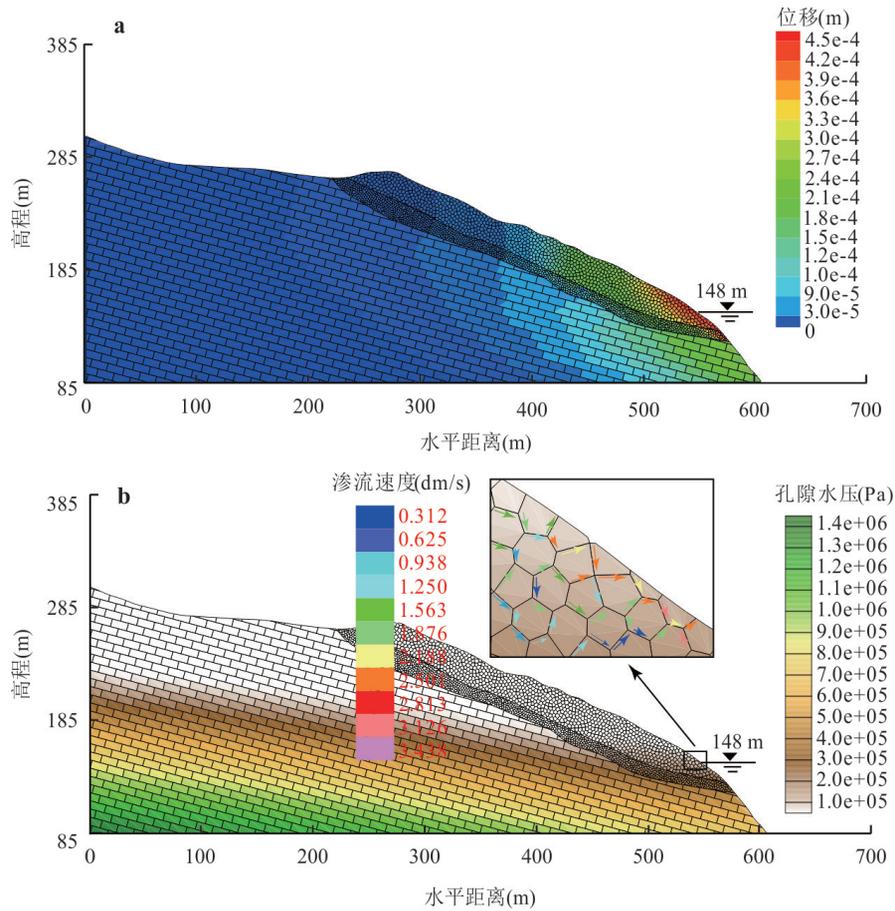


图 10 蓄水初期坡体位移场(a)和渗流场(b)

Fig.10 The characteristics of landslide deformation (a) and seepage (b) during the initial impoundment

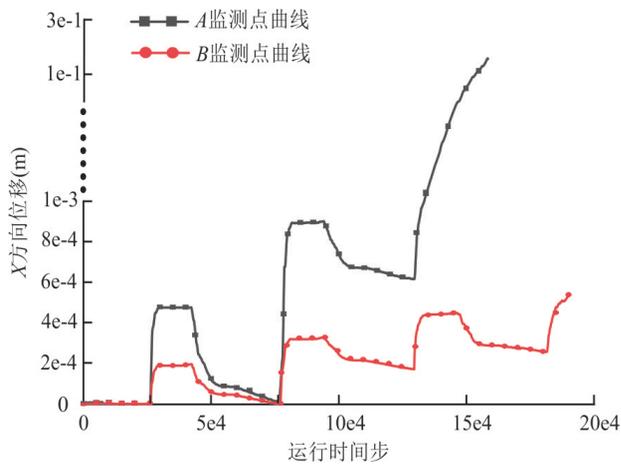


图 11 滑坡测点 X 方向变形

Fig.11 X-displacement data of the monitoring points

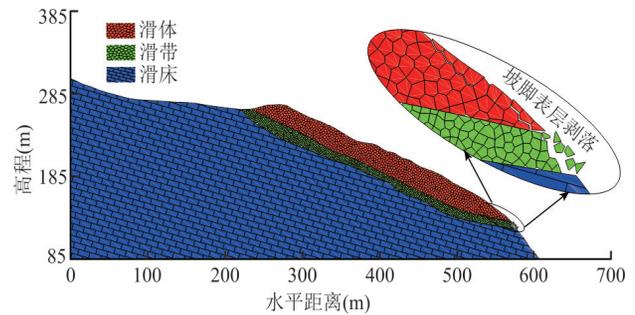


图 12 滑坡坡脚表层块体变形剥落

Fig.12 The surface block of the toe was deformed and detached

的自重应力与外部库水作用下,变形进一步加剧,原先发育于坡脚浅表层岩体的节理裂隙进一步张开,并向坡体深部延展(图 13),随着时间的推移,坡脚处岩体的变形持续增大,这也为其上坡体中部的岩体提供了变形空间.尽管坡体中部的岩体并未受

到库水的影响,但由于受到降雨作用,一方面,雨水由坡表向坡体内入渗,渗透水流作用于岩体上的动水压力助长了坡体的下滑力;另一方面,持续的降雨入渗导致坡体内的地下水位不断上升,作用于岩体节理间的孔隙水压力不断增大,导致节理粘结强度不断降低,甚至失效发生断裂,最终促使坡体中部的部分岩体也发生破坏(图 14).

总的来说,坡体整体的变形破坏受到库水、降

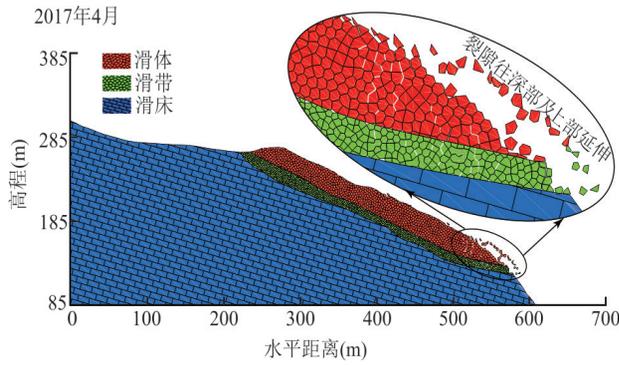


图 13 滑坡前部变形及裂隙发展

Fig.13 Slope movement and fractures development in front of landslide

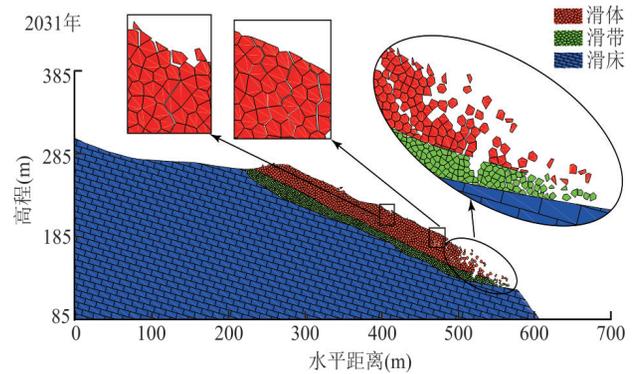


图 15 坡体前缘破坏图

Fig.15 The failure at the front part

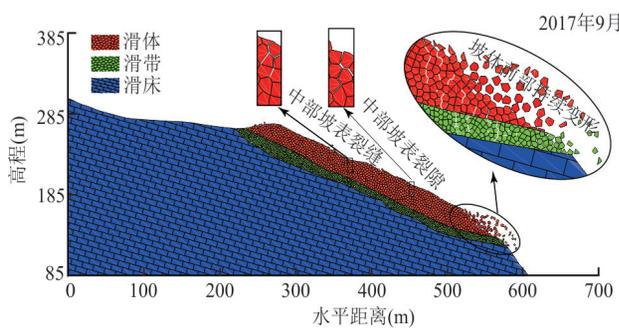


图 14 坡体前部持续变形及中部裂隙发育

Fig.14 The successively slope movement at the front part and the fractures presented occasionally at the middle part

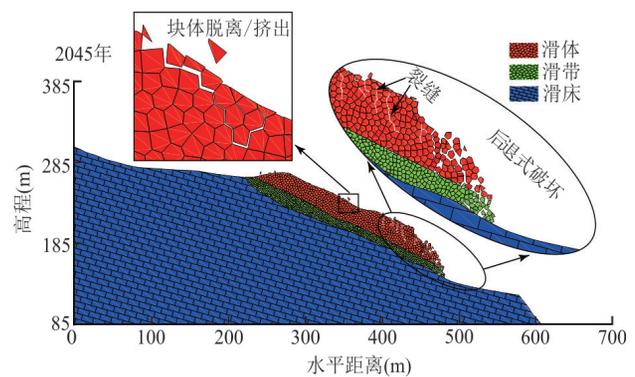


图 16 坡体中部破坏图

Fig.16 The slope failure at the middle part

雨入渗以及坡体自重的联合影响,多重因素的联合作用导致坡体不同部位的岩体产生不同程度大小的变形.通过现场实地踏勘所获取的坡体浅表层的破坏迹象(图 3b)与数值模拟结果相符,印证了本次数值模拟结果的可靠性.根据数值模拟的计算结果,坡体变形最强烈的区域位于坡体前部,当坡体变形发展到一定程度时,坡体前部岩体节理裂隙进一步贯通,极有可能形成潜在滑动面,促使坡体前部产生滑坡.图 15 显示的数值模拟结果预测了坡体到 2031 年的破坏状态,如图 15 所示,坡体前缘的岩体出现了大规模的破坏,其岩体间的节理粘结已完全失效,除此之外,坡体中部岩体的节理破坏也在进一步发展,但其破坏程度要远小于坡体下部.

(3)坡体中部破坏阶段.到 2045 年,坡体的破坏状态如图 16 所示,不同于 2031 年坡体的破坏状态(图 15),其破坏特征具有明显的牵引式特点,这是因为坡体前缘岩体的破坏脱落不仅为坡体中部岩体的变形提供了充足的空间,而且块体脱落所产生的扰动促使坡体前部的裂隙进一步向坡体后部延

伸发育.通过图 16 可以看到,随着坡体变形破坏的发展,坡体中前部原有张拉裂缝不断扩展与搭接,甚至出现块体脱落.总的来说,坡体内裂隙的发育与坡体的变形破坏是相互作用影响,一方面,坡体变形破坏不断发展,会导致坡体内裂隙数量不断增加,裂隙尺寸不断扩张;另一方面,坡体内裂隙数量的增加与裂隙尺寸的扩张会促使库水、雨水渗流速度增大,填充于岩体节理内的水流对节理的粘结强度产生软化作用,进一步加剧了坡体的变形.除此之外,堆积体坡体结构在持续性的往复循环作用下,密实度大大降低.当潜在的破坏面形成后,滑坡再一次发生.最终,塔坪 H1 滑坡整体产生多级牵引式破坏,即坡体前部率先发生滑动破坏,紧接着滑动破坏向坡体中部及后部逐级发展.

### 4 结论

本文以三峡库区塔坪 H1 滑坡为研究对象,在对滑坡现场调查、监测数据分析和相关性分析和数值研究的基础上,分析滑坡在降雨和库水位波动共

同影响下变形规律及失稳演化机制,主要结论如下.

(1)塔坪 H1 滑坡是典型的二元结构堆积层滑坡,其基覆面形态为直线形.根据滑坡区域的变形程度大小,滑坡上部区域可视为准稳定状态,而滑坡东南部区域被认为是强变形区.滑坡变形速率随时间呈现出快慢交替的变化特征(阶梯式变形模式),在雨季与低水位阶段,滑坡变形速率较快,而在旱季与高水位阶段,其变形速率相对放缓.地表多期次变形特点显示如果滑坡变形无法得到控制,滑坡失稳趋势非常明显.

(2)塔坪 H1 滑坡变形主要受库区水位下降与降雨作用.皮尔逊相关性系数和显著性水平的计算结果表明库水和降雨是促使滑坡变形的重要诱因,滑坡体中部的变形主要受持续性降雨影响,而滑坡体前部的变形则主要受持续的库水下降的影响.在周期性的库水—降雨联合作用下,滑坡破坏模式表现为多级牵引式破坏:坡体前缘表层岩体剥落,然后坡体前部发生破坏,紧接着滑坡破坏向坡体中部发展.

## References

- Han, H. M., Shi, B., Zhang, L., 2021. Prediction of Landslide Sharp Increase Displacement by SVM with Considering Hysteresis of Groundwater Change. *Engineering Geology*, 280: 105876. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105876>
- Jiang, S. H., Xiong, W., Zhu, G. Y., et al., 2024. Probabilistic Analysis of Reservoir Landslides Considering the Spatial Variation of Seepage Parameters under the Conditions of Rainstorm and Sudden Drop of Water Level. *Earth Science*, 49(5):1679—1691(in Chinese with English abstract).
- Juang, C. H., 2021. BFTS-Engineering Geologists' Field Station to Study Reservoir Landslides. *Engineering Geology*, 284: 106038. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106038>
- Li, L. X., Hu, X. L., Huang, Y. T., et al., 2024. Seepage-Consolidation Deformation Characters of Sliding-Zone Soils under Water Level Fluctuation. *Earth Science*, 49(12): 4690—4700(in Chinese with English abstract).
- Li, S. N., Peng, L., Wang, X. H., et al., 2023. Do Geohazards Inhibit Urban Expansion at the Regional Scale? Evidence from a Counterfactual Analysis in Southwest China. *Cities*, 142: 104558. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104558>
- Li, S. L., Xu, Q., Tang, M. G., et al., 2017. Response Patterns of Old Landslides with Different Slipsurface Shapes Triggered by Fluctuation of Reservoir Water Level. *Journal of Engineering Geology*, 25(3):841—852(in Chinese with English abstract).
- Liu, X. L., Miao, C., 2018. Large-Scale Assessment of Landslide Hazard, Vulnerability and Risk in China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1): 1037—1052. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1502690>
- Luo, S. L., Huang, D., Peng, J. B., et al., 2022. Influence of Permeability on the Stability of Dual-Structure Landslide with Different Deposit-Bedding Interface Morphology: The Case of the Three Gorges Reservoir Area, China. *Engineering Geology*, 296: 106480. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106480>
- Miao, F. S., Zhao, F. C., Wu, Y. P., et al., 2023. Landslide Susceptibility Mapping in Three Gorges Reservoir Area Based on GIS and Boosting Decision Tree Model. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(6): 2283—2303. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02394-4>
- Mo, W. W., Xu, P., Ding, X. L., 2006. Research Advances on the Influences of Reservoir Water Level Fluctuation on Slope Stability. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2(6):997—1002(in Chinese with English abstract).
- Shi, X. G., Xu, J. H., Jiang, H. J., et al., 2019. Slope Stability State Monitoring and Updating of the Outang Landslide, Three Gorges Area with Time Series InSAR Analysis. *Earth Science*, 44(12):4284—4292(in Chinese with English abstract).
- Sun, Y. S., Hu, R. L., 2016. Experimental Study of Different Shape Bedrock Surfaces about Deformation and Failure of Soil and Rock Mixture. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(S1):2907—2914(in Chinese with English abstract).
- Tang, H. M., Wasowski, J., Juang, C. H., 2019. Geohazards in the Three Gorges Reservoir Area, China: Lessons Learned from Decades of Research. *Engineering Geology*, 261: 105267. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105267>
- Tang, M. G., Li, S. L., Xu, Q., et al., 2020. Study of Deformation Characteristics of Reservoir Landslide Based on Centrifugal Model Test. *Rock and Soil Mechanics*, 41(3): 755—764(in Chinese with English abstract).
- Xie, T., 2019. Monitoring and Research of Taping Landslide Based on InSAR Technology(Dissertation). Chang'an University, Xi'an(in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. T., Dai, Z. W., Lu, Y. S., et al., 2024. Deformation Characteristics and Stability Changes Characteristics of

Reservoir Landslides with Double-Sliding Zones. *Earth Science*, 49(4): 1498–1514(in Chinese with English abstract).

Yin, Y. P., Zhang, C. Y., Yan, H., et al., 2022. Research on Seepage Stability and Prevention Design of Landslides during Impoundment Operation of the Three Gorges Reservoir, China. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 41(4): 649–659(in Chinese with English abstract).

Zhang, S., Sun, P., Li, R., et al., 2022. Distribution Feature and Development Characteristics of Geohazards in Wudu District, Gansu Province, Northwest China. *Geoenvironmental Disasters*, 9(1): 23. <https://doi.org/10.1186/s40677-022-00226-1>

### 中文参考文献

蒋水华,熊威,朱光源,等,2024.暴雨及水位骤降条件下渗流参数空间变异的水库滑坡概率分析. *地球科学*, 49(5): 1679–1691.

李岚星,胡新丽,黄悦庭,等,2024.水位波动下滑带土的渗

透-固结变形特征试验. *地球科学*, 49(12):4690–4700.

李松林,许强,汤明高,等,2017.库水位升降作用下不同滑面形态老滑坡响应规律. *工程地质学报*, 25(3):841–852.

莫伟伟,徐平,丁秀丽,2006.库水位涨落对滑坡稳定性影响研究进展. *地下空间与工程学报*, 2(6):997–1002.

史绪国,徐金虎,蒋厚军,等,2019.时序InSAR技术三峡库区藕塘滑坡稳定性监测与状态更新. *地球科学*, 44(12): 4284–4292.

孙永帅,胡瑞林,2016.土石混合体变形破坏的不同形态基覆面效应试验研究. *岩石力学与工程学报*, 35(增刊1): 2907–2914.

汤明高,李松林,许强,等,2020.基于离心模型试验的库岸滑坡变形特征研究. *岩土力学*, 41(3):755–764.

谢韬,2019.基于InSAR技术的塔坪滑坡监测与研究(硕士学位论文).西安:长安大学.

杨雨亭,代贞伟,陆愈实,等,2024.库岸古滑坡复活变形特征及双滑带稳定性响应. *地球科学*, 49(4):1498–1514.

殷跃平,张晨阳,闫慧,等,2022.三峡水库蓄水运行滑坡渗流稳定和防治设计研究. *岩石力学与工程学报*, 41(4): 649–659.