

考虑基覆面形态影响的堆积层滑坡失稳机制数值模拟

章伟凯¹, 牛佳伦^{1,2*}, 幸金权^{1,2}, 陈会官^{1,2}, 赵程^{1,2}, 姜海西³

1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092

2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092

3. 上海城投公路投资(集团)有限公司, 上海 200335

摘要: 为探究不同基覆面形态堆积层滑坡在降雨-库水作用下的失稳机制, 依据三峡库区堆积层滑坡基覆面几何特征, 建立了直线形、弧形、靠椅形、折线形四种典型基覆面概化模型, 结合离散元数值模拟揭示了其力学响应规律、变形破坏模式及失稳机制。研究表明基覆面形态通过调控应力分布显著影响滑坡失稳模式: 直线形和弧形滑坡表现出典型的牵引式破坏特征, 靠椅形滑坡呈现明显的推移式变形特征, 而折线形则整体呈现混合式变形破坏特点; 降雨通过抬升中后部地下水位, 增加范围内孔隙水压力, 以激励滑坡变形。而库水位则通过调控前缘地下水位重分布, 形成向外渗透水压, 驱动前缘局部牵引变形。研究成果可为类似堆积层滑坡失稳及灾害防治提供依据。

关键词: 堆积层滑坡; 三峡库区; 基覆面形态; 离散元; 失稳机制

中图分类号: P642

收稿日期: 2025-07-23

Numerical simulation study on the instability mechanism of accumulation landslides considering the interface morphology

Zhang Weikai¹, Niu Jialun^{1,2*}, Xing Jinquan^{1,2}, Chen Huiguan^{1,2}, Zhao Cheng^{1,2}, Jiang Haixi³

1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China

3. Shanghai Chengtou Highway Group Co., Ltd, Shanghai 200335, China

Abstract: To investigate the instability mechanisms of such landslides with different interface morphology, four typical interface morphology was established based on the geometric characteristics of accumulation landslides in the three gorges reservoir area, namely, line-like shape, arc-like shape, chair-like shape, and step-like shape. Discrete element methods were conducted to elucidate mechanical response laws, failure modes, and instability mechanisms. Key findings reveal that the failure modes are governed by the interface morphology through its control of internal stress distribution. The line-like shape and arc-like shape exhibit typical retrogression failure characteristics, whereas the chair-like shape manifest pronounced progressive deformation, while the step-like shape landslide has the composite failure characteristics. Rainfall primarily drives deformation by elevating groundwater levels in the mid-rear sections, increasing pore water pressure. Conversely, reservoir water level fluctuations redistribute groundwater pressure near the toe, generating outward seepage forces that induce localized retrogressive deformation. These findings provide a scientific basis for analyzing instability mechanisms and designing prevention strategies for analogous accumulation landslides.

Key words: accumulation landslide; three gorges reservoir; interface morphology; discrete element method; instability mechanism

基金项目: 国家自然科学基金 (No.U22A20597; No.42407227)

作者简介: 章伟凯 (1997-), 男, 博士研究生, 主要从事地质灾害研究. E-mail: 2210406@tongji.edu.cn. ORCID: 0009-0005-1076-5650.

*通讯作者: 牛佳伦, 助理研究员, 主要从事岩土工程方向研究. E-mail: niujialun@tongji.edu.cn. ORCID: 0009-0003-3272-0459.

0 引言

堆积层滑坡是三峡库区极具代表性的滑坡灾害类型之一，广泛分布于河谷两岸缓坡地带，其在降雨与库水作用下易失稳破坏，严重威胁库区人民生命财产及航运安全(黄润秋,2007)。例如，新滩滑坡摧毁了位于其前缘的新滩古镇，约 $3.0\times 10^7\text{m}^3$ 土方涌入长江，对岸形成爬高 49m 涌浪，造成多艘船只损毁，9 人不幸死亡。因此，深入开展库区堆积层滑坡研究，尤其是揭示复杂水文条件下其变形演化特征、渗流响应规律与失稳机制，已成为当前地质灾害防治领域的重点工作。

长期以来，国内外学者借助数值模拟、物理模型试验以及现场监测案例，证实了堆积层斜坡失稳是内外因素共同作用所致(Tu *et al.*, 2015; 陈磊等, 2024)。在外因方面，大量研究表明库水位波动是诱发滑坡失稳的主要因素之一，库水位上升产生的渗透反压可暂时稳定坡体，但长期浸泡导致的岩土体软化会削弱其强度(Dong *et al.*, 2023)，而水位下降不仅消除了水的支撑作用，更会在坡体内外形成显著的水力梯度，产生指向临空面的动水压力，从而驱动滑坡变形(殷跃平等, 2022)。此外，降雨也是除库水以外诱发滑坡的另一大外因。多数研究认为降雨主要通过入渗导致坡体容重增加、地下水位抬升和滑带土抗剪强度削弱，并改变地下水渗流场，进而显著降低边坡稳定性(Miao *et al.*, 2022; 高晨曦等, 2024)。在内因方面，针对滑带土强度影响的相关研究已较为充分(Luo *et al.*, 2024; Wu *et al.*, 2024)，而现有研究进一步表明基覆面几何形态对堆积层滑坡稳定性具有显著的控制作用。如陈红旗等(2005)指出堆积层边坡的稳定性受控于基覆面和内部潜在剪裂面；罗世林等(2024)基于监测数据及数值模拟探讨了靠椅状基覆面堆积层滑坡的稳定性和成因机制。综上所述，目前对降雨-库水作用下堆积层滑坡失稳的共性机理已形成了较为充分的认知。然而，针对不同基覆面形态堆积层滑坡在外部因素作用下的响应特征差异仍缺乏系统性对比，这限制了对不同基覆面滑坡差异化失稳规律的认识，也影响了防治措施的针对性。

鉴于此，本研究以三峡库区堆积层滑坡为研究原型，依据其基覆面形态的几何特征，建立了直线形、弧形、靠椅形、折线形四种典型基覆面概化模型，采用 UDEC 离散元数值方法对比分析降雨-库水作用下堆积层滑坡的力学响应规律、变形破坏模式和失稳机制的差异性，为该类滑坡监测预警与灾害防治提供科学依据，对保障人民生命财产安全和

促进区域可持续发展具有重要意义。

1 堆积层滑坡物质组成及结构形式

1.1 堆积层物质组成

库区堆积层滑坡长期受风化、搬运及沉积等环境营力作用影响，滑体物质发生明显的粒度分选和组构演化，最终形成具有“土-石二元结构”的土石混合物。据前人研究统计，库区堆积层滑坡物质组成主要表现为“土含碎石”或“土夹碎石”的形式(Fu *et al.*, 2024; 谢媛华等, 2024)。

1.2 堆积层坡体结构

库区众多堆积层滑坡案例显示，坡体结构与其稳定性密切相关。见表 1，库区堆积层坡体结构可归纳为逆向坡和顺向坡两种基本类型(Xu *et al.*, 2015)，且顺向坡发育程度最为显著，其占比高达 75.7%(李松林等, 2020)，这主要归因于顺向坡易形成贯通性弱面，且滑面弱化趋势方向与滑动方向一致，这为滑面形成与发展创造了有利的地质条件。

表 1 堆积层坡体结构统计结果

Table 1 Statistical results of the slope structure of the accumulation landslides

结构类型	数量	百分占比	发育程度
逆向坡	142	24.3%	低
顺向坡	442	75.7%	高

2 库区堆积层滑坡典型基覆面形态

堆积层边坡存在清晰的基覆面，按其几何形态可分为以下四类普遍同时存在于库区的典型基覆面形态：直线形、靠椅形、弧形、折线形(Tang *et al.*, 2019; Luo *et al.*, 2022; 罗世林等, 2024)。基于李松林等(2017)的统计结果，不同基覆面形态滑坡数量分布情况如表 2 所示。

表 2 不同基覆面形态滑坡数量分布

Table 2 Statistical results of the numbers of accumulation landslide with different interface morphology

基覆面形态	百分占比	典型案例
直线形	29.2%	马家沟滑坡、三门洞滑坡、塔坪滑坡
靠椅形	25.6%	木鱼包滑坡、峰包岭滑坡、谭家河滑坡
弧形	34.9%	树坪滑坡、白家包滑坡、八字门滑坡
折线形	10.3%	白衣庵滑坡、汪家梁滑坡、兴隆滩滑坡

2.1 直线形基覆面

图 1 所示是马家沟滑坡地质剖面图，地貌形态呈东高西低向展布，前后缘高程分别约为 135m 和 280m，平均坡度约为 15° ，前缘为河流相冲积阶地。基覆面大致呈清晰的直线或近直线形态，平均

倾角约 20° 。下伏基岩面相对平整，由灰色砂岩和紫红色泥岩互层组成，受岩层原生节理或构造裂隙控制，而上覆地层由坡积成因的粘性土夹碎石组成。库区直线形滑坡主要沿秭归沙镇溪青干河流域、奉节安坪段、忠县至丰都段等河段集中分布，常发育于单斜缓中倾外层状斜坡体中。此类滑坡基覆面倾角由后缘至前缘变化幅度较小，呈平缓直线形态，且基覆面平直、延伸性强，其倾向与斜坡整体倾向一致，基覆面倾角在 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间。坡体前缘受长江侵蚀下切影响，临空条件良好，上覆岩体受自重应力和降雨因素影响容易沿基覆面迅速下滑。据此直线形滑坡可概化为如下图 2 所示模型。

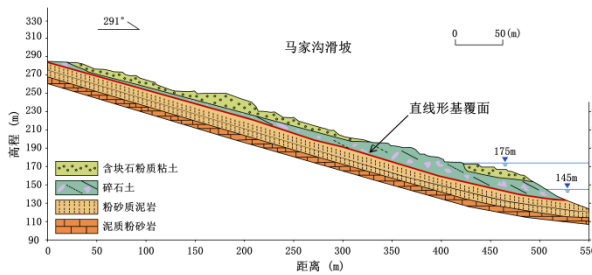


图 1 马家沟滑坡地质剖面图

Fig.1 Geological profile of the Majiagou landslide

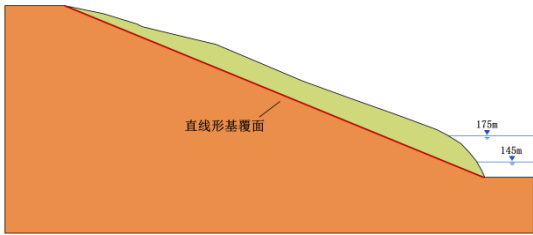


图 2 直线形基覆面堆积层滑坡概化模型

Fig.2 Schematic model of accumulation landslide with line-like interface

2.2 靠椅形基覆面

三峡库区发育一类几何形态表现为“靠椅状”结构特征的堆积层滑坡群。以图 3 所示的木鱼包滑坡为例，该滑坡走向近东西向，前缘剪出口高程约 100m，后缘高程 520m，平均坡度为 20° 。基覆面倾角为 $21^{\circ}\sim 25^{\circ}$ ，前部呈反倾内约 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 。基岩为石英砂岩及碳质粉砂岩，坡体表层多为粉质粘土夹碎石。此类滑坡在库区多沿秭归至巴东段干流、奉节至兴隆滩段干流等流域分布，通常赋存于中陡倾向薄层状斜坡体中。前缘基覆面通常较为平缓，甚至局部出现向上反翘现象，中后部倾角则相对较陡且这种陡坡沿基覆面延伸，即上陡下缓。类似地，如藕塘滑坡前缘倾角在 $18^{\circ}\sim 24^{\circ}$ 之间，反翘区域倾角在 $-15^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 之间。坡体前缘风化程度高，上覆堆积物多呈碎裂状，而中后缘结构稳定且较为完整。在降雨侵蚀及上部岩体自重的共同作用下，上覆岩体

持续下滑并顺势挤压，导致前缘抗滑段发生弯曲、隆起现象。因此靠椅形滑坡可概化为图 4 所示模型。

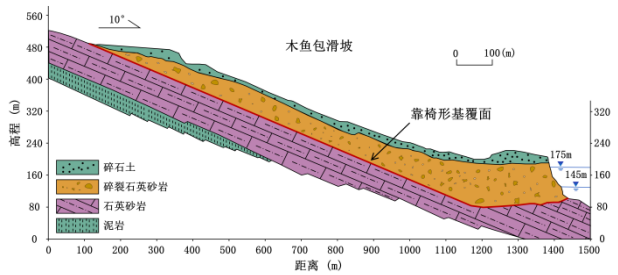


图 3 木鱼包滑坡地质剖面图

Fig.3 Geological profile of the Muyubao landslide

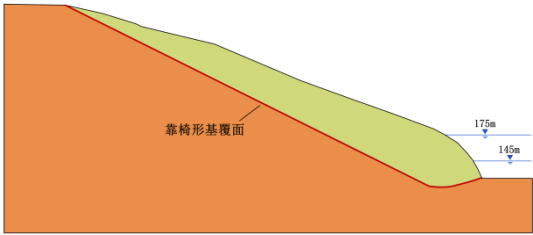


图 4 靠椅形基覆面堆积层滑坡概化模型

Fig.4 Schematic model of accumulation landslide with chair-like interface

2.3 弧形基覆面

树坪滑坡是库区典型弧形基覆面滑坡之一，其地质剖面图如图 5 所示。该滑坡近东西走向，前缘高程紧贴水位线，后缘高程约 370m，平均坡度为 25° 。基覆面呈明显的弧形弯曲，前缘倾角较缓，约为 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ，中后部逐渐变陡，倾角约 30° 。下伏基岩主要为灰岩、粉砂岩夹泥岩，表层堆积物以粉质粘土以及碎块石土为主。此类滑坡于逆向及顺向层状斜坡体中均有发育，主要集中分布于香溪河口、奉节至云阳段等区域，在发育过程中滑体顺着基覆面向外扩展，在几何形态上呈现出明显弧形特征。在自重或者构造应力的作用下，后缘形成拉裂缝并沿斜坡外缘逐渐向内部延伸，随后此滑面逐渐转变为对斜坡变形起主导作用的控制面。总体而言，此类滑坡基覆面倾角由后缘至前缘逐渐降低，例如卧沙溪滑坡 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ，树坪滑坡 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ，八字门滑坡 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。据此可将该类滑坡概化如图 6 所示模型。

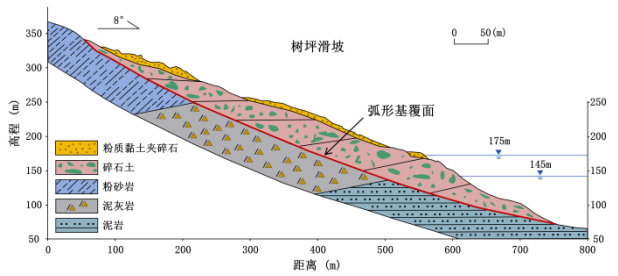


图 5 树坪滑坡地质剖面图

Fig.5 Geological profile of Shuping landslide

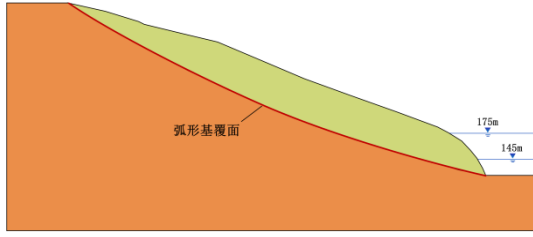


图 6 弧形基覆面堆积层滑坡概化模型

Fig.6 Schematic model of accumulation landslide with arc-like interface

2.4 折线形基覆面

白衣庵滑坡是典型折线形基覆面滑坡，如图 7 所示。该滑坡前缘高程为 120m 左右，后缘高程约 410m，滑体整体向南东倾斜。基覆面整体呈折线形分布，其倾角由后缘至前缘呈阶梯状变化特征，较陡处约 40° ，这主要归因于斜坡体的非均质性(赵德君等, 2018)。基岩以泥灰岩、泥岩、泥质灰岩为主，而坡表层堆积物组成物质为粘性土夹碎块石。该类滑坡集中分布于巫峡至瞿塘峡段的部分库岸，通常发育于中陡倾外层状斜坡体中。由于长期受到地质构造和江水侵蚀切割的双重影响，促使折线形基覆面形成与滑坡多级发育，地形起伏较大，其基覆面在几何形态上呈独特的阶梯状。这种阶梯状倾角变化使得滑坡体各部位受力状态产生差异，导致陡倾坡面岩体破碎，而缓倾台阶岩体相对较完整。在自重作用和库水等因素下，易发生多级滑动，数量相对较少。综上可将折线形滑坡概化为图 8 所示模型。

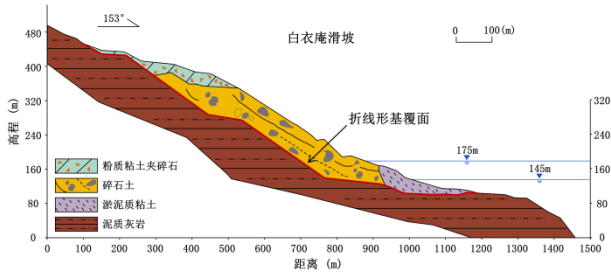


图 7 白衣庵滑坡地质剖面图

Fig.7 Geological profile of Baiyian landslide

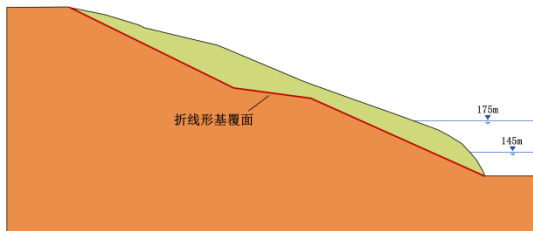


图 8 折线形基覆面堆积层滑坡概化模型

Fig.8 Schematic model of accumulation landslide with step-like interface

3 UDEC 数值模型

本文重点探讨基覆面形态对堆积层滑坡的潜在影响，而非真实水文年下滑坡失稳过程的数值再现。鉴于实际滑坡中高程分布、地下水位波动、基岩倾角及岩性组合等参数存在显著差异，难以直接对比分析基覆面形态的独立影响。故控制上述参数一致，仅考虑基覆面形态这一变量。本模型在初始重力平衡后，再进行工况模拟。以靠椅形滑坡为例，图 9 为数值模型示意图，而形态几何差异对比参见图 2、图 4、图 6 与图 8。建模详细依据如下：

(1) 几何建模。采用 CAD 绘制模型轮廓，水平距离设为 700m，垂直高程设为 300m。使用 UDEC 内置 cut 系列命令对基岩进行网格划分，保持相同尺寸，岩块长厚比控制在 2.5(Yu *et al.*, 2020)，基岩倾角为 25° 。采用泰森多边形命令离散化块体尺寸(滑带 4m、滑体 3m)。

(2) 参数赋值。计算参数包含三部分，分别基岩、滑带、滑体强度参数。块体假设为刚体且不透水，块体密度参考室内试验及地质勘察资料取值范围进行调整(黄达等, 2019; Gong *et al.*, 2022)。而节理采用库伦滑移模型，基于前人数值模拟调试结果(Huang *et al.*, 2020; 杨雨亭等, 2024)，节理参数通过工程类比获得。鉴于 UDEC 官方手册指出模型中裂隙宽度难以准确测定，故该参数参考手册建议取值范围及前人结论(Guglielmi *et al.*, 2005)，采用试错法确定。所有参数取值如表 3 所示。

(3) 边界条件。坡面及坡顶为自由边界，左右边界限制水平位移，底边界限制法向位移。渗流场采用稳态流计算模式。滑坡后缘地下水位设定为 200m。底边界则定义为不透水边界。基于 9-12 月蓄水及库水上升，1-5 月库水下降的库水调节方案，依据库水位监测数据(Song *et al.*, 2018)，采用 fish 语言编程将水压作用于模型右侧模拟库水周期性变化，库水变化速率为 0.8m/d。而 6-9 月以集中降雨为主，为了简化计算，采用 domain 结构在坡表等间距节理域(15m)内均匀注入恒定流量($Q=0.6\text{L/s}$)，以实现降雨入渗。该流量依据研究区 2012 年 7 月 2 日记录的最大降水数据，每小时最大降雨量 140mm(Huang *et al.*, 2018)，以模拟最不利情况。恒定流量通过公式 1 换算获得。

$$Q = \frac{p_{\max}}{t} \times l_{\text{domain}} \times d \quad (1)$$

式中， $p_{\max}$ 为最大降雨量(140mm)， t 为降雨时长(1h)， l_{domain} 为流量注入的节理域间距(15m)， d 为 Z 方向单位厚度(1m)。

Fig.9 Schematic diagram of numerical model

Table 3 Material Parameters for Numerical Model

类型	参数	基岩	滑带	滑体
块体	密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2450	2150	2150
	剪切刚度($\text{GPa}\cdot\text{m}^{-1}$)	3.4	1.2	1.2
	法向刚度($\text{GPa}\cdot\text{m}^{-1}$)	8	1.0	1.0
	内摩擦角($^{\circ}$)	22	11	15
节理	黏聚力(MPa)	2.2	1.8	2.1
	抗拉强度(MPa)	2.1	1.2	1.3
	最小裂隙宽度(m)	0.002	0.01	0.01
	初始裂隙宽度(m)	0.005	0.03	0.03
	最大裂隙宽度(m)	0.01	0.4	0.4

4.1 位移变化规律

Fig.10 Displacement curve of accumulation landslide with line-like interface

Figure 10 is a line graph showing the displacement (位移, m) of the rear edge of the rock body over 40,000 calculation iterations (计算迭代(步)). The y-axis ranges from 0.0 to -0.6 m, and the x-axis ranges from 30,000 to 40,000 iterations. Five data series are plotted: S1 (blue circles), S2 (orange squares), S3 (red triangles), S4 (green inverted triangles), and S5 (purple diamonds). All series show a downward trend, with S1 and S4 being the most negative, followed by S3, S2, and S5. A red box highlights the region between 33,000 and 34,000 iterations, with an arrow pointing to the text "S1-S4变形趋势几乎重叠, 表明后缘岩体沿着基覆面发生整体推移式变形。" (S1-S4 deformation trends are almost overlapping, indicating that the rear edge rock body undergoes overall thrust deformation along the base cover surface). The graph is divided into two regions: "陡增段" (steep increase segment) from 30,000 to 31,500 iterations, and "持续变形段" (continuous deformation segment) from 31,500 to 38,000 iterations.

Fig.11 Displacement curve of accumulation landslide with chair-like interface

而弧形滑坡与直线形滑坡具有一定相似性, 坡体前缘均表现出率先启滑特点, 其监测点 S1-S5 的

位移曲线如图 12 所示。S1-S5 监测点位移虽然表现出不断增加的趋势，但变形走向却不尽相同。由于外界水文环境的影响，一开始各监测点出现位移陡增现象，但随后影响降低，各监测点位移增加较为缓慢，变形速率趋于平缓。而后，随着边坡变形渐渐发展，S5 监测点位移变形速率突然陡增，这意味着坡体前缘开始加速下滑。随后，中后缘监测点 S3-S4 和 S1-S2 先后出现加速下滑现象，且位于坡体中部 S3-S4 监测点位移略大于坡体后部 S1-S2，反映出该弧形堆积层滑坡以分段滑移为主要运动模式，同时越接近前缘区域受到的影响更为显著，这一现象与直线形滑坡较为类似，受库水下降的影响明显。此外，由于弧形堆积层滑坡的基覆面分布相对更长，其受抗滑承载能力下降的影响更为显著，因此其位移变形量较直线形堆积层滑坡更大。整体来说，树坪滑坡现场位移监测数据与数值模拟结果具有较高相似性(汪发武和宋琨, 2021)。

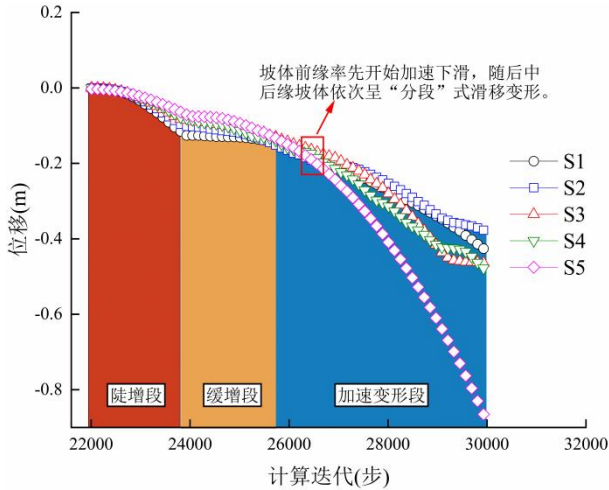


图 12 弧形堆积层滑坡位移曲线

Fig.12 Displacement curve of accumulation landslide with arc-like interface

相较于前述的直线形、弧形、靠椅形三种形态滑坡，折线形滑坡表现出更复杂的位移变化特征。从图 13 所示的监测点 S1-S5 的位移曲线来看，初期监测点 S4-S5 与 S1-S3 的变形趋势大体保持一致，位移变形量均处于较低水平。然而，在降雨和库水作用的持续影响下，岩体节理强度逐渐劣化，S4-S5 监测点的位移增速由缓变陡，并呈快速上升趋势，该现象表明堆积层前缘坡体率先发生破坏并产生滑移，其最大位移量约为 $2.53 \times 10^{-1} \text{m}$ 。此后，缓坡段处监测点 S3 变形也开始出现快速增加，这反映出缓坡段因前缘坡体失稳而处于临空状态，在中后部岩体推力作用下被迫发生挤出变形。而后，后缘监测点 S1-S2 保持相似的位移趋势发生下滑变形。可见折线形堆积层滑坡的运动趋势以转折位置为界，

可以近似看成前缘为牵引式破坏，后缘呈推移式破坏，整体呈现混合式变形破坏特点。数值模拟结果与白衣庵滑坡监测数据在位移变化趋势上保持较高吻合度(李晓等, 2004)。

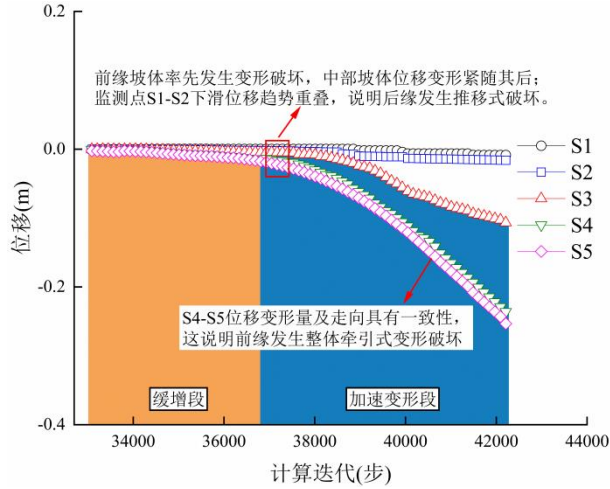


图 13 折线形堆积层滑坡位移曲线

Fig.13 Displacement curve of accumulation landslide with step-like interface

4.2 位移及渗流特征分析

图 14 和图 15 所示分别为直线形堆积层失稳后的位移和渗流云图。该类滑坡长期受水力侵蚀及软化浸泡作用影响，岩土体力学强度逐渐丧失，尤以前缘坡体劣化最为明显。特别是在库水下降过程中，由于地下水下降速度滞后于库水下降速度，从而在坡体内部产生“拖曳”效应，这在很大程度上加剧了前缘坡体的剪切下滑趋势，促使拉张裂缝的出现，进而形成初始滑动区，并伴随局部范围微小节理裂隙的发育。如图 14 所示。这种前缘坡体持续下滑为中后部坡体提供了变形空间，后缘逐渐出现拉张应力集中区，形成坡脚位移最大、向后部逐渐减小的连续变化特征，直观反映出前缘坡体下滑的牵引效应。而图 15 显示前缘坡脚区域渗流速度大于后缘坡体，这也进一步印证前缘变形受库水下降的主导影响较大。受坡体自重和降雨综合作用，中后部坡体的孔隙水压力升高削弱了节理强度，进一步促进后缘坡体持续向前下滑，最终引发后缘拉裂破坏。上述变形过程表明，该直线形堆积层边坡的失稳破坏始于前缘坡体的滑移启动，通过牵引作用逐步向后扩展，最终形成“滑移-拉裂”的整体失稳模式。因此，针对直线形堆积层滑坡的防治应重点加强前缘坡体的稳定性。

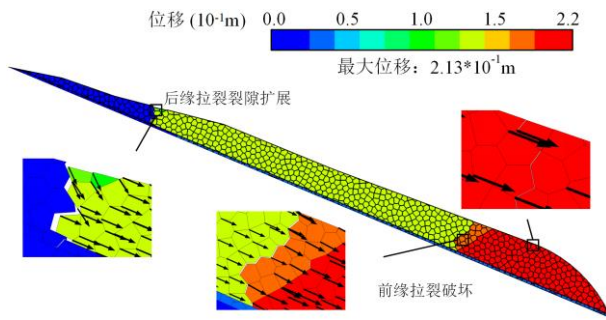


图 14 直线形堆积层滑坡位移云图

Fig.14 Displacement nephogram of accumulation landslide with line-like interface

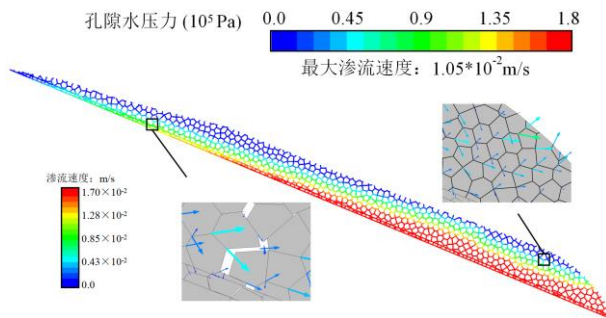


图 15 直线形堆积层滑坡渗流云图

Fig.15 Seepage nephogram of accumulation landslide with line-like interface

靠椅形滑坡失稳后的位移及渗流云图，如图 16 和图 17 所示。该类滑坡基覆面倾角呈后陡前缓的靠椅形，前缘平缓段形成阻滑段，后缘为促滑段。如图 17 所示，在库水上升过程中，前缘阻滑段因水位抬升产生浮托减重效应，阻滑段的高孔隙水压力削弱了岩体抗剪强度，促使前缘区域抗滑能力降低，从而引起整体坡体稳定性持续降低。后缘滑体作为促滑段，降雨入渗使岩土体强度降低，加强了对下部岩体的持续挤压作用，进而加剧了后缘块体顺坡下滑的态势。此后，随着前缘块体变形不断加剧，最终阻滑段丧失抗滑承载能力，前缘阻滑段岩体被挤出，坡脚岩体出现微微隆起现象。原先发育于坡脚岩体的节理裂隙进一步张开，并向坡体浅表层及上部岩体延伸扩展，最终引发滑坡体的整体变形。由图 16 可知，靠椅形堆积层边坡滑坡变形始于坡体后缘，通过推动滑体向前发展，导致前缘发生挤压破坏，呈现出推移式破坏的特点，其失稳破坏模式为“后缘挤压-前缘隆起-整体滑动”。因此，应关注前缘抗滑与后缘促推的协调控制。

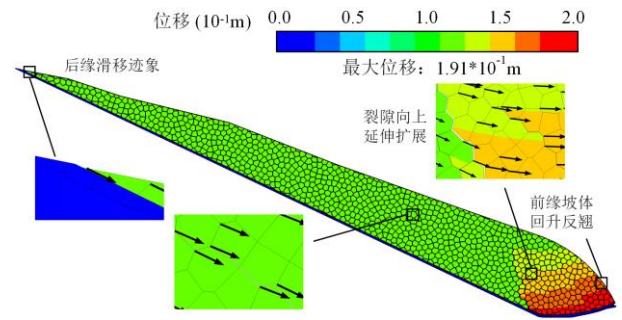


图 16 靠椅形堆积层滑坡位移云图

Fig.16 Displacement nephogram of accumulation landslide with chair-like interface

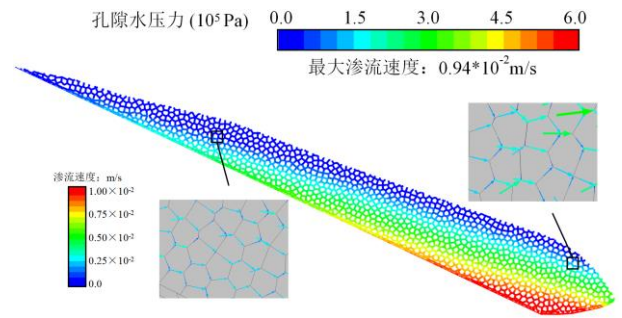


图 17 靠椅形堆积层滑坡渗流云图

Fig.17 Seepage nephogram of accumulation landslide with chair-like interface

尽管弧形滑坡在基覆面形态上与直线形有一定类似，但其岩体涉水程度更高，且抗滑力分布范围更广。如图 19 所示，坡体前缘水位率先下降，导致作用于坡面的渗透压力逐渐消失，与此同时，由于坡内孔隙水排出不充分，在坡脚范围产生了不稳定瞬态渗流，最大渗流速度为 $1.37 \times 10^{-2} \text{m/s}$ 。这些瞬态渗流形成指向坡外的拖曳力，导致前缘抗滑能力急剧降低，前缘逐渐出现下滑的趋势。随着坡内拉应力的逐渐增大，前缘局部区域率先发生变形，形成拉张裂缝。并且降雨导致坡内地下水位持续抬升，孔隙水压力随之增加，岩体强度逐渐降低，促使这些裂缝沿坡面垂直方向或与坡面呈一定角度发展并进一步贯通，从而形成牵引区。如图 18 所示，随着裂缝不断延伸，滑坡体变形逐步向后、向上扩展，最终发展成为多次级块体的独立滑动，最大位移量出现在坡脚区域，为 $3.47 \times 10^{-1} \text{m}$ 。与直线形滑坡相比，这类弧形边坡虽同样呈渐进性后退式破坏特征，表现出一定牵引式破坏特点，但其滑坡体量更大，影响范围更广。其失稳过程表现为前缘区域牵引变形带动后缘区域的拉裂，形成多级坡体分段变形，最终导致整个边坡的失稳破坏。因此，对于弧形堆积层滑坡应重点关注前缘抗滑能力，同时考虑布设排水工程。

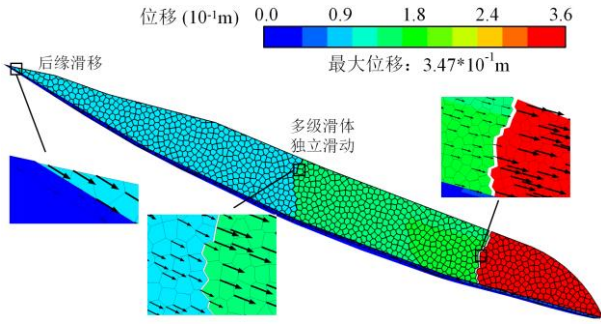


图 18 弧形堆积层滑坡位移云图

Fig.18 Displacement nephogram of accumulation landslide with arc-like interface

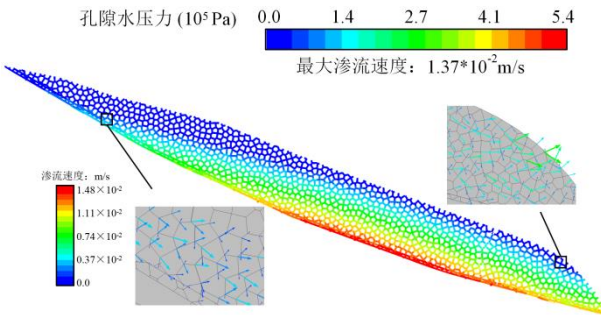


图 19 弧形堆积层滑坡渗流云图

Fig.19 Seepage nephogram of accumulation landslide with arc-like interface

相比前述,折线形滑坡的前缘与后缘坡体在失稳过程中表现出显著的差异性,转折位置附近的岩体因受到不同方向的应力作用,形成了局部应力集中带。如图 20 所示,该类滑坡最显著的变形特征在于以中部缓坡段为界,发生位移变形的空间变异性。前缘坡体在库水位变动产生的动水压力作用下,沿着基覆面发生变形滑移。随着前缘变形持续加剧,中部缓坡段出口处形成局部节理开裂并发育贯通拉伸裂缝,不仅降低中部阻滑段对上部岩体的支撑作用,而且产生的裂隙可为地表水下渗提供通道。由图 21 可见,由于缓坡段渗流速度相对低于周边岩体,地下水在缓坡段逐渐汇聚,致使地下水位不断抬升,孔隙水压力急剧增加,进而削弱转折位置块体节理强度。在后缘坡体推力作用下,阻滑段受到挤压逐渐被剪断推出。结合位移及渗流云图可知,折线形堆积层滑坡呈现后缘推移、前缘牵引的协同变形特征,中部在前后缘变形共同影响下发生剪切变形,形成贯通滑面,其失稳破坏模式可概括为“前缘牵引-后缘推移并向中部传递”的混合式破坏过程。因此,对于折线形滑坡的防治,需重点关注缓坡段排水及前缘加固。

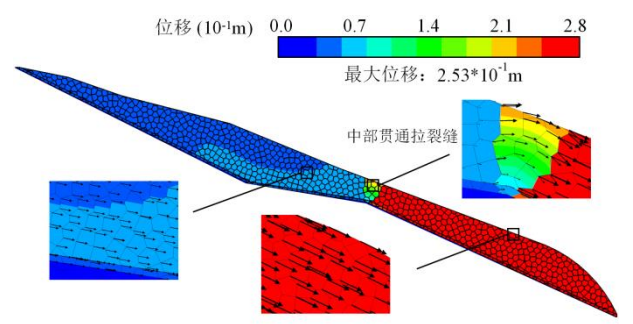


图 20 折线形堆积层滑坡位移云图

Fig.20 Displacement nephogram of accumulation landslide with step-like interface

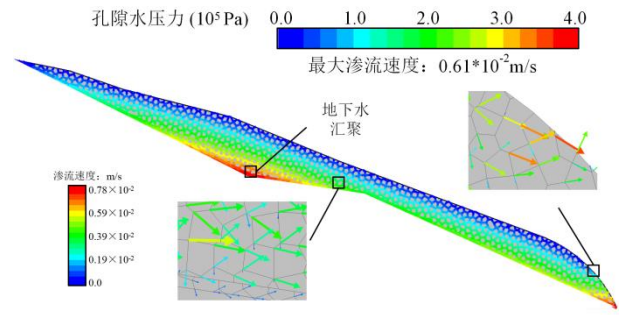


图 21 折线形堆积层滑坡渗流云图

Fig.21 Seepage nephogram of accumulation landslide with step-like interface

5 不同基覆面形态滑坡失稳机制及防治建议

降雨与库水位变动作为外部诱发因素,其是通过激发并加剧基覆面形态预设的破坏趋势而起作用。如图 22 所示,其共性失稳机制表现为降雨沿着裂缝或节理裂隙入渗至坡体内部,导致中后部地下水位抬升,使该区域孔隙水压力变大,最终沿着基覆面发生滑移。这一规律与许艺林等(2024)通过物理模型试验观测到的“降雨增大水力梯度以诱发变形”的现象相符。而库水对滑坡稳定性的影响呈动态变化,上升期动水压力形成的扶壁效应可暂时加固前缘,但水位持续上升形成的浮托效应会因降低有效应力而弱化岩体强度,而消落期动水压力形成的拖曳效应,通过孔隙水压力重分布改变岩土体应力状态,最易驱动渐进变形。这一观察与谷建永等(2023)的离心模型试验结论一致,其研究明确揭示了水位骤降期间深部动水压力效应尤为强烈,并主导了前缘至后部的牵引式变形。此外,囿于本研究数值模拟方法限制,未能考虑潜蚀、饱水软化、雨水冲刷、饱和容重等作用影响,但其对岩体的劣化效应不容忽视(Gu et al., 2019)。

基覆面形态作为滑坡的内在结构控制因素,通

过调控应力分布和潜在滑移路径，从根本上决定了不同基覆面形态堆积层滑坡的失稳机制差异。近年试验研究表明，基覆面角度显著影响坡体的变形破坏特征，例如孙永帅等(2023)利用大型推剪仪发现，随着基覆面角度增加，剪切面与基覆面的夹角和距离均增大，且最大剪应力在 45° 下达到峰值，这从机理上解释了不同基覆面形态对应力分布路径的控制作用。直线形与弧形基覆面具有连续顺畅的几何特征，促使剪应力向前缘临空区集中，在库水下降产生的动水压力驱动下前缘率先发生剪切滑移，进而通过应力重分布引发后缘拉裂，形成自前向后的牵引式破坏。汤明高等(2020)的离心模型试验亦表明，直线形滑面形态滑坡在水位下降条件下表现出典型的牵引式破坏，这与本文的数值模拟结果相互印证。两种形态细微差异在于，弧形基覆面因曲率变化且滑面更长，更易出现应力集中和多级滑动，但其“前缘驱动、向后牵引”的力学本质与直线形一致。靠椅形基覆面受“上陡下缓”结构控制，中后部基覆面成为重力势能主要转化区，其产生的下滑推力传递至前缘，当前缘抗滑段因库水浸泡软化或浮托减重效应而强度衰减时即发生整体挤压隆起，呈现典型的自后向前、自上而下传递的整体性推移式破坏。而李鹏飞等(2025)对巨型堆积体的研究同样表明了水位上升导致的土体软化及结构改变为推移式滑坡创造了前提条件，与本研究结果一致。相较前述三种形态基覆面，折线形基覆面的阶梯状形态导致坡体应力分布不连续，在转折点处易产生应力集中，致使其失稳机制最为复杂，表现为混合式破坏。其过程始于前部较陡段在库水影响下的局部牵引式滑移，这使得中部缓坡段临空并成为应力与地下水的汇集区。在后部推力和孔隙水压力升高的共同作用下，中部缓坡段发生剪切破坏，最终形成前缘牵引与后缘推移的复合失稳模式。

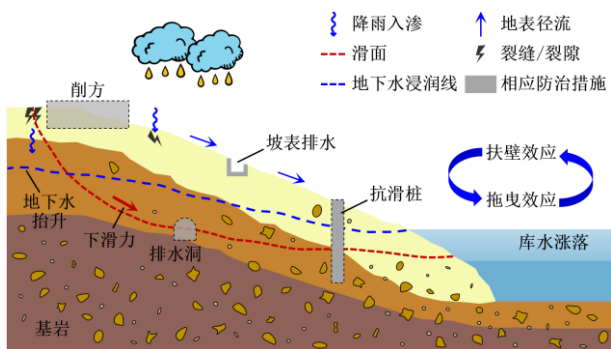


图 22 堆积层滑坡失稳机制及防治措施概念示意图

Fig.22 Conceptual diagram of the instability mechanism and prevention measures of accumulation landslides

堆积层滑坡具有数量多，破坏性强，影响范围

广的特点，目前尚难以对所有滑坡实施全面的工程防治与监测预警。本文基于数值模拟结果，仅从破坏模式的角度探讨防治措施。直线形基覆面具有较高的平直延伸性，前缘坡体更易受库水下降影响，特别是指向坡外的渗透水压引起前缘坡体启滑产生位移突变，表现为牵引式破坏特征。此类基覆面滑坡应优先考虑前缘坡体防护和加固，例如设置微型抗滑桩群，以抑制滑体牵引力的进一步发展。而弧形滑坡基覆面分布相对较长，滑体厚度较大，岩体涉水程度较高，坡体前缘受库水下降影响率先启滑，同时坡体中后缘受降雨影响，强度降低。针对该类基覆面建议采取削方压脚并配合中后缘排水工程的方式，以有效控制局部失稳向整体滑动的扩展。靠椅形基覆面滑坡由于中后缘较陡，具有挤压助推作用，向前推移下滑，而前缘作为抗滑段受库水上升显著影响，导致抗滑能力降低，呈现典型的推移式破坏模式。针对该类滑面形态应注重整体坡体的稳定性提升，建议采取分级开挖与抗滑桩联合支挡的方式，以有效遏制滑体的整体推移趋势，同时需强化中后缘地表截水与地下排水措施。折线形滑面缓坡段渗流速度相对较低，雨水易汇聚，致使孔隙水压力增加，进而削弱坡体中后缘块体节理强度，导致变形过程存在明显分段性，即前缘坡体率先启滑，后缘变形滞后，形成混合式变形破坏特点。该类基覆面形态治理关键在于控制缓坡段渗流影响，如设置抽水井防止孔隙水压力升高，且前缘可设置支挡结构，以增强局部抗滑能力。但需说明的是，文中对四种典型基覆面形态的滑坡防治建议，仅从破坏模式角度出发进行探讨，存在一定局限性。实际在制定具体防治方案时，除几何形态外，还需结合滑坡的具体特征，综合考虑防治成本、稳定性、实际地质条件、人类活动、影响程度等多种影响因素，且一般选用传统防治（支挡结构、锚固工程等）结合新型工艺（生态防护、微生物改性等）多种形式在内的联合治理方案。

此外，针对不同基覆面形态滑坡的破坏特征及治理措施，还需进一步结合遥感、无人机、地表监测等多源信息融合技术，动态分析不同基覆面形态滑坡的关键部位位移规律、裂缝扩展及渗流变化等关键参数，实现对整体变形趋势与局部异常变化的同步跟踪，并根据监测预警需求，建立长期、短期、临滑的阈值预报，从而有效提升滑坡治理的针对性与实效性，为滑坡灾害的科学防控提供更坚实技术保障。

6 结论

本研究基于库区不同基覆面形态堆积层滑坡,采用 UDEC 离散元数值方法建立概化模型,探讨了基覆面形态对堆积层滑坡的力学响应、变形破坏模式及失稳机制的影响。主要得出如下结论:

(1) 基覆面形态是滑坡差异化失稳模式的内在决定因素。在降雨-库水作用下,直线形与弧形由于其基覆面连续顺畅,易促使剪应力向前缘传递并集中,最终形成牵引式破坏;靠椅形基覆面因其“上陡下缓”结构,使中后部成为下滑集中区,发生自后向前挤压的推移式破坏;而折线形基覆面的阶梯状形态导致应力分布不连续,引发前缘牵引与后缘推移的混合式破坏。

(2) 水文外因通过激发基覆面形态预设的破坏趋势而起作用。具体表现为降雨通过抬升滑体中后部孔隙水压力,降低抗滑力,而库水下降则主要在前缘产生动水压力,形成牵引作用,最终沿基覆面发生变形破坏。

(3) 防治对策需依据基覆面形态所主导的失稳机制而制定。基于上述机制差异,直线形和弧形滑坡可采用排水工程结合前缘支挡等联合措施;靠椅形滑坡应重点考虑前缘抗滑与后缘助推的协同控制;折线形滑坡需加强转折部位排水并辅以前缘加固。

作者贡献度: 章伟凯: 数值计算、论文撰写; 牛佳伦: 思路及宏观指导; 幸金权: 论文修改, 基金支持; 陈会官: 图件绘制; 赵程: 审核文章内容, 基金支持; 姜海西: 参与文章内容修改

References

- Chen, L., Zhang, Q., Jia, C. j., et al., 2024. Centrifugal Modeling and Numerical Simulation on Stability of Reservoir Bank Accumulation Slope Caused by Heavy Rainfall. *Rock and Soil Mechanics*, 45(5): 1423-1434.(in Chinese with English abstract).
- Deng, M. L., Yi, Q. L., Han, B., et al., 2019. Analysis of Surface Deformation Law of Muyubao Landslide in Three Gorges Reservoir Area. *Rock and Soil Mechanics*, 40(8): 3145-3152+3166.(in Chinese with English abstract).
- Dong, Y., Liao, Z., Wang, J., et al., 2023. Potential Failure Patterns of a Large Landslide Complex in the Three Gorges Reservoir Area. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(1):41. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-03062-7>
- Fu, Z., Li, D. Q., Wang, S., et al., 2024. Causes of Episodic Movement of the Baijiabao Landslide Based on Multiple-Time Scale Analysis. *Landslides*, 21:1069-1082. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02201-9>
- Gao, C. X., S, C. B., Yan, W., et al., 2024. Study on the Threshold Value of Colluvial Landslide Under the Combined Action of Reservoir Water Level Variation and Rainfall: Taking Muping Landslide as an Example. *Resources Environment & Engineering*, 38(1): 73-82. (in Chinese with English abstract).
- Gong, W. P., Tian, S., Wang, L., et al., 2022. Interval Prediction of Landslide Displacement with Dual-Output Least Squares Support Vector Machine and Particle Swarm Optimization Algorithms. *Acta Geotechnica*, 17(9):4013-4031.<https://doi.org/10.1007/s11440-022-01455-2>
- Gu, D. M., Huang, D., Liu, H. L., et al., 2019. A DEM-Based Approach for Modeling the Evolution Process of Seepage-Induced Erosion in Clayey Sand. *Acta Geotechnica*, 14(6):1629-1641.<https://doi.org/10.1007/s11440-019-00848-0>
- Gu, J. Y., Zhang, Q., Lu, X. C., et al., 2023. Centrifugal Model Test on Deformation Mechanism of Reservoir Bank Landslide under Reservoir Water Level Fluctuation. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 40(6):166-172.(in Chinese with English abstract).
- Huang, D., Kuang, X. B., Luo, S. L., et al., 2019. A Study of the Deformation Characteristics and Reactivation Mechanism of the Outang Landslide near the Three Gorges Reservoir of China. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 46(5): 127-135. (in Chinese with English abstract).
- Huang, D., Gu, D. M., Song, Y. X., et al., 2018. Towards a Complete Understanding of the Triggering Mechanism of a Large Reactivated Landslide in the Three Gorges Reservoir. *Engineering Geology*, 238:36-51. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.03.008>
- Huang, R. Q., 2007. Large-Scale Landslides and Their Sliding Mechanisms in China Since the 20th Century. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, (3):433-454. (in Chinese with English abstract).
- Huang, X., Guo, F., Deng, M., et al., 2020. Understanding the Deformation Mechanism and Threshold Reservoir Level of the Floating Weight-Reducing Landslide in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Landslides*, 17: 2879-2894.

<https://doi.org/10.1007/s10346-020-01435-1>

- Li, P. F., Yu, B., Wu, S. Y., et al., 2025. Research on Instability Failure Mechanism and Catastrophic Process of a Giant Accumulation Body Under the Condition of Reservoir Water Level Fluctuation. *Journal of Engineering Geology*, 33(4): 1461-1472. (in Chinese with English abstract).
- Li, S. L., Xu, Q., Tang, M. G., et al., 2017. Response Patterns of Old Landslides with Different Slip-Surface Shapes Triggered by Fluctuation of Reservoir Water Level. *Journal of Engineering Geology*, 25(3): 841-852. (in Chinese with English abstract).
- Li, S. L., Xu, Q., Tang, M. G., et al., 2020. Study on Spatial Distribution and Key Influencing Factors of Landslides in Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science*, 45(1):341-354. (in Chinese with English abstract).
- Li, X., Z. N. X., L. Q. L., et al., 2004. Analysis on Hydrodynamic Field Influenced by Combination of Rainfall and Reservoir Level Fluctuation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(21): 3714-3720. (in Chinese with English abstract).
- 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>
- Luo, S. L., Huang, D., Peng, J. B., et al., 2024. Influencing of Drying-Wetting Cycles on Mechanical Behaviors of Silty Clay with Different Initial Moisture Content. *Geomechanics And Engineering*, 38(3): 307-317. <https://doi.org/10.12989/gae.2024.38.3.307>
- Luo, S. L., Liu, H. L., Jiang, J. Q., 2024. Coupled Influence of Reservoir Water and Rainfall on the Response Mechanism of Accumulated Landslides with Chair-Like Interfaces Between Sliding Masses and Bedrock. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 64(8): 1336-1346. (in Chinese with English abstract).
- Miao, F. S., Wu, Y. P., Torok, A., et al., 2022. Centrifugal Model Test on a Riverine Landslide in the Three Gorges Reservoir Induced by Rainfall and Water Level Fluctuation. *Geoscience Frontiers*, 13(3): 196-209. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2022.101378>
- Song, K., Wang, F. W., Yi, Q. L., et al., 2018. Landslide Deformation Behavior Influenced by Water Level Fluctuations of the Three Gorges Reservoir (China). *Engineering Geology*, 247: 58-68. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.10.020>
- Sun, Y. S., Hu, R. L., 2023. Effect of Bedrock Slope Angle on Deformation and Failure of Overlying Rock-Soil Mixture: Insight into the Evolution of Landslides. *Earth Science Frontiers*, 30(3): 494-504. (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Tang, M. G., Xu, Q., Yang, H., et al., 2019. Activity Law and Hydraulics Mechanism of Landslides with Different Sliding Surface and Permeability in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Engineering Geology*, 260: 15. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105212>
- Tu, P. F., Yu, L., 2015. Research on the Influence of Rainfall on Deformation of Shuping Landslide. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 20(5): 455-460. <https://doi.org/10.1007/s11859-015-1118-5>
- Wang, F. W., Song, K., 2021. Analysis of Deformation and Failure Mechanism of Bank Slopes with Different Structures Under Reservoir Water Level Fluctuation—Taking Qianjiangping Landslide and Shuping Landslide as Examples. *Journal of Engineering Geology*, 29(3):575-582. (in Chinese with English abstract).
- Wei, T. Y., Yin, Y. P., Gao, Y., et al., 2020. Deformation Mechanism of the Taping H1 Landslide in Wushan County in the Three Gorges Reservoir Area. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 47(4):73-81. (in Chinese with English abstract).
- Wu, K., Xiang, B., Zhang, H. S., et al., 2024. Stability Evaluation of Slopes with Bedding Planes Parallel to the Slope, Considering Saturation Softening Effect of Undisturbed Potential Slip Zones. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(4). <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03596-y>
- Xie, L. C., Wang, M. Q., Zhou, C., et al., 2020. Evolution Process and Mechanism of Sanmendong Landslide Based on Combined Effect of Rainfall and Reservoir Water. *Water Resources and Power*, 38(6): 128-132. (in Chinese with English abstract).

Xie, Y. H., Zhan, G. W., Cao, Z. W., et al., 2024. Fractal Characteristics of Displacement and Cracks in the Baishuihe Landslide in the Three Gorges Reservoir Area. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 43(4):244-251. (in Chinese with English abstract).

Xu, G. L., Li, W. N., Yu, Z., et al., 2015. The 2 September 2014 Shanshucao Landslide, Three Gorges Reservoir, China. *Landslides*, 12(6): 1169-1178. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0652-8>

Xu, Y. L., Li, Y. Y., Li, S. D., et al., 2024. Seepage-Deformation Mechanism of Colluvial Landslides Under the Action of Reservoir Water Level Decline and Rainfall. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 43(1):216-228.(in Chinese with English abstract).

Y, Guglielmi., F, Cappa., S, Binet., et al., 2005. Coupling Between Hydrogeology and Deformation of Mountainous Rock Slopes: Insights from La Clapière Area (Southern Alps, France). *Comptes Rendus Geoscience*, 337(13): 1154-1163. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.04.016>

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*, 14(4): 649-659.(in Chinese with English abstract).

Yu, H., Li, C., Zhou, J. Q., et al., 2020. Recent Rainfall- and Excavation-Induced Bedding Rockslide Occurring on 22 October 2018 Along the Jian-En Expressway, Hubei, China. *Landslides*, 17:2619-2629. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01468-6>

Zhang, L., Shi, B., Zhang, D., et al., 2020. Kinematics, Triggers and Mechanism of Majiagou Landslide Based on FBG Real-Time Monitoring. *Environmental Earth Sciences*, 79: 200. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08940-5>

Zhao, D. J., Yu, R. H., Liao, M. Z., et al., 2018. Study on Influence Factors of Landslide Development in Badong Formation in Three Gorges Reservoir Area. *Resources Environment & Engineering*, 32(S1):63-68.(in Chinese with English abstract).

中文参考文献

陈磊, 张强, 贾朝军, 等, 2024. 强降雨对库岸堆积体边坡稳定性影响的离心模型试验和数值模拟研究. *岩土力学*, 45(5): 1423-1434.

邓茂林, 易庆林, 韩蓓, 等, 2019. 长江三峡库区木鱼包滑坡地表变形规律分析. *岩土力学*, 40(8): 3145-3152+3166.

高晨曦, 石长柏, 闫巍, 等, 2024. 堆积层滑坡在库水位变动与降雨共同作用下的阈值研究——以墓坪滑坡为例. *资源环境与工程*, 38(1): 73-82.

谷建永, 张强, 卢晓春, 等, 2023. 库水位变动下库岸滑坡变形失稳机制离心模型试验. *长江科学院院报*, 40(6): 166-172.

黄达, 匡希彬, 罗世林, 2019. 三峡库区藕塘滑坡变形特点及复活机制研究. *水文地质工程地质*, 46(5): 127-135.

黄润秋, 2007. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制. *岩石力学与工程学报*, (3): 433-454.

李鹏飞, 余波, 吴述或, 等, 2025. 库水位变动条件下某巨型堆积体失稳破坏机理及灾变过程研究. *工程地质学报*, 33(4): 1461-1472.

李松林, 许强, 汤明高, 等, 2020. 三峡库区滑坡空间发育规律及其关键影响因素. *地球科学*, 45(1): 341-354.

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.

李晓, 张年学, 廖秋林, 等, 2004. 库水位涨落与降雨联合作用下滑坡地下水动力场分析. *岩石力学与工程学报*, 2004, (21): 3714-3720.

罗世林, 刘华亮, 蒋建清, 2024. 库水—降雨作用下靠椅状基覆面堆积层滑坡响应机理. *清华大学学报(自然科学版)*, 64(8): 1336-1346.

孙永帅, 胡瑞林, 2023. 不同角度基覆面上土石混合体变形试验研究及对滑坡演化的启示. *地学前缘*, 30(3): 494-504.

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.

汪发武, 宋琨, 2021. 库水位涨落条件下不同结构边坡的变形破坏机制分析——以千将坪滑坡和树坪滑坡为例. *工程地质学报*, 29(3): 575-582.

卫童瑶, 殷跃平, 高杨, 等, 2020. 三峡库区巫山县塔坪 H1 滑坡变形机制. *水文地质工程地质*, 47(4): 73-81.

谢媛华, 张国伟, 曹宗伟, 等, 2024. 三峡库区白水河滑坡位移与裂缝分形特征. *地质科技通报*, 43(4): 244-251.

许艺林, 李远耀, 李思德, 等, 2024. 库水位下降叠加降雨作用时堆积层滑坡渗流-变形机制. *地质科技通报*,

43(1): 216-228.

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.

赵德君, 余荣华, 廖明政, 2018. 三峡库区巴东组滑坡发育的影响因子研究. 资源环境与工程, 32(S1): 63-68.