

三峡库区典型逆向岩质岸坡塌岸滑坡破坏机理研究

李 杨, 赵海林, 黄波林, 李宏林, 许凯凯

Bank collapse-landslide failure mechanism of typical reverse rock bank slope in Three Gorges Reservoir area

LI Yang, ZHAO Hailin, HUANG Bolin, LI Honglin, and XU Kaikai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202308010>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三峡库区巫峡段典型岩体劣化特征研究

A study of the deterioration effect of limestone bank slope rock mass at the Wuxia section of the Three Gorges Reservoir area

闫国强, 黄波林, 代贞伟, 秦臻 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 62-72

三峡库区藕塘滑坡变形特点及复活机制研究

A study of the deformation characteristics and reactivation mechanism of the Outang landslide near the Three Gorges Reservoir of China

黄达, 匡希彬, 罗世林 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 127-135

三峡库区巫山县塔坪H1滑坡变形机制

Deformation mechanism of the Taping H1 landslide in Wushan County in the Three Gorges Reservoir area

卫童瑶, 殷跃平, 高杨, 李滨, 贺凯, 唐俊刚, 张天贵 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 73-81

基于地面三维激光扫描的三峡库区危岩体监测

Monitoring of dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area based on the terrestrial laser scanning method

褚宏亮, 邢顾莲, 李昆仲, 王国利, 段奇三 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 124-132

三峡库区浮托减重型滑坡对库水升降的响应规律

Response patterns of buoyancy weight loss landslides under reservoir water level fluctuation in the Three Gorges Reservoir area

周剑, 邓茂林, 李卓骏, 张富灵 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 136-143

二元结构库岸边坡失稳机制试验研究

An experimental study of the bank slope instability mechanism of dual structure reservoir

张钧, 梁为邦, 林红, 苏东院, 田毅, 许万忠, 熊茹雪, 史丁康 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 156-163



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202308010

李杨, 赵海林, 黄波林, 等. 三峡库区典型逆向岩质岸坡塌岸-滑坡破坏机理研究 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(1): 167-178.
LI Yang, ZHAO Hailin, HUANG Bolin, et al. Bank collapse-landslide failure mechanism of typical reverse rock bank slope in Three Gorges Reservoir area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(1): 167-178.

三峡库区典型逆向岩质岸坡塌岸-滑坡破坏机理研究

李 杨^{1,2}, 赵海林^{1,2}, 黄波林^{1,2}, 李宏林^{1,2}, 许凯凯^{1,2}

(1. 湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002;
2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 现阶段大多数逆向岩质岸坡倾倒失稳破坏均被解释为受倾角和结构面控制的渐进式整体失稳破坏机制, 但据调查表明一些库区逆向岸坡倾倒变形加剧或失稳前, 都普遍存在前缘塌岸现象。为深入研究塌岸约束条件下塌岸-滑坡破坏机制及灾变过程, 以三峡库区巫峡段龚家坊滑坡为例构建二维物理模型, 开展典型逆向岩质岸坡在库水位侵蚀下发生塌岸-滑坡破坏机理研究。研究结果表明: (1) 在滑坡失稳演化过程中, 塌岸改变了坡形、坡体结构、应力分布, 并且为上部变形体提供了重要临空条件, 是逆向岩质岸坡滑坡破坏的灾变加速诱因。(2) 形成滑坡的主要原因是反倾岩层重力时效的累计下弯曲倾倒产生大量拉张裂隙, 蓄水后纵横两向裂隙逐渐在塌岸的影响下产出并贯通形成多级滑面。(3) 塌岸-滑坡链式演化过程中, 塌岸发生前岸坡各点的应力、位移均无明显波动, 塌岸发生后坡内应力集中现象明显, 坡表变形, 破裂面逐步贯通。(4) 不同深度的坡脚侵蚀区在塌岸-滑坡演化过程中, 失稳坡体均有明显的分级滑移现象。滑移前, 侵蚀区顶部岩梁在上覆荷载的挤压下, 岩层层间累计弯曲角度达到 $15^{\circ} \sim 23^{\circ}$ 时, 斜坡后缘卸荷裂缝发育, 进一步贯通形成深度约为侵蚀区深度 2.5 ~ 3 倍的滑面。(5) 滑坡破坏规模与坡脚侵蚀深度正相关, 坡脚侵蚀深度深, 塌岸出现越早, 形成潜在破坏区范围越大, 岩层变形破坏过程中弯曲滑移现象越明显。相关成果可为库区逆向岩质岸坡倾倒破坏机制的研究提供新视野, 为库区类似岸坡的防治工作提供参考。

关键词: 三峡库区; 逆向岩质岸坡; 二维模型试验; 变形破坏机理; 塌岸-滑坡

中图分类号: P642.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)01-0167-12

Bank collapse-landslide failure mechanism of typical reverse rock bank slope in Three Gorges Reservoir area

LI Yang^{1,2}, ZHAO Hailin^{1,2}, HUANG Bolin^{1,2}, LI Honglin^{1,2}, XU Kaikai^{1,2}

(1. Hubei Yangtze Three Gorges Landslide National Field Scientific Observation and Research Station, Yichang, Hubei 443002, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: At present, most of the reverse rock slope toppling instability failure is interpreted as a progressive overall instability failure controlled by dip angle and structural plane. However, the phenomenon of leading edge collapse is common in some reservoir areas before the toppling deformation of reverse rock slope is intensified or

收稿日期: 2023-08-04; 修订日期: 2023-11-08

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(U23A2045); 重庆市规划和自然资源局科研项目(KJ-2023046)

第一作者: 李杨(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害及涌浪灾害方面的研究。E-mail: 2901721713@qq.com

通讯作者: 黄波林(1979—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事水库地质灾害及涌浪灾害方面的教学与研究工作。

E-mail: bolinhuang@aliyun.com

destabilized. To further analyze the failure mechanism and disaster process of bank collapse-landslide under the constraint condition of bank collapse, this study constructed a two-dimensional model of Gongjiafang landslide in Wuxia section of Three Gorges Reservoir area to analyze the failure mechanism of bank collapse-landslide of typical reverse rock bank slope under the erosion of reservoir water level. The results show that in the process of landslide instability evolution, the bank collapse changes the slope shape, slope structure, and stress distribution. It provides important free-face conditions for the upper deformation body, which is the disaster acceleration inducement of reverse rock slope landslide failure. The main reason for the formation of landslide is that a large number of tensile cracks are produced by the cumulative bending and toppling of the anti-dip rock strata. After impoundment, the vertical and horizontal cracks are gradually produced under the influence of bank collapse and form a multi-stage sliding surface. In the process of bank collapse-landslide chain evolution, the stress and displacement of each point of the bank slope before the bank collapse did not fluctuate significantly. After the bank collapse, the stress concentration in the slope was significant with deformed slope surface, and the fracture surface was gradually penetrated. The slope toe erosion area at different depths has obvious graded slip phenomenon in the process of bank collapse-landslide evolution. Before slip, when the cumulative bending angle of the bedding plane of the rock beam at the top of the erosion area reaches $15^{\circ} \sim 23^{\circ}$ under the extrusion of the overlying load, the unloading cracks at the trailing edge of the slope develop, and further penetrate to form a sliding surface with a depth of about 2.5 ~ 3 times deeper than that of the erosion area. The scale of landslide failure is positively correlated with the erosion depth of slope toe. The deeper the erosion depth of slope toe is, the earlier the collapse occurs, the larger the range of potential failure zone is, and the more obvious the bending slip phenomenon is in the process of rock deformation and failure. This study can provide new insight into the study on the toppling failure mechanism of the reverse rock bank slope and a theoretical basis for the prevention and control of similar bank slopes in the reservoir area.

Keywords: Three Gorges Reservoir; reverse rock slope; two-dimensional model test; deformation failure mechanism; bank collapse-landslide

逆向岩质岸坡的变形破坏具有隐蔽性,常常发生倾覆破坏,形成灾难性滑坡。2008年11月23日,三峡库区175 m首次试验性蓄水期间,巫峡逆向灰岩岸坡龚家坊发生崩滑^[1-2],形成涌浪危害长江航道及上游巫山县城,造成巨大经济损失^[3-5]。

大量研究人员对逆向岩质岸坡破坏机理及影响因素进行研究。殷坤龙等^[6]以龚家坊2号斜坡为例分析软硬互层逆向岩质岸坡的变形特征,并讨论库水位波动影响下岸坡变形破坏机制。Jin等^[7]通过离心机实验发现逆向岩质边坡破坏表现为分阶段的突发性大变形,岩体抗拉强度及弯曲变形特征为坡体破坏的关键因素。徐佩华等^[8]探讨卸荷松弛和深部岩层弯曲等因素对逆向岸坡变形的影响。部分学者研究逆向岸坡的破坏过程^[9],综合分析地形地貌、岩层层理、岩层厚度、裂隙和断层走向等对岸坡变形破坏的影响^[10-11],认为地貌条件与岩体内的结构面决定岸坡破坏的方式^[12-13]。Wang等^[14]在充分考虑反倾角顺层岩质边坡的节理情况下建立极限平衡模型预测反倾角顺层岩

质边坡的稳定性。基于Adhikary等^[15]的研究思路,吴昊等^[16]通过多组离心机模型试验,分析反倾层状岩质边坡倾覆破坏过程中坡趾岩层断裂、近坡顶拉张裂缝的特征。杨豪等^[17]着重分析反倾层状岩质边坡内非贯通性裂缝的变形特性。Guo等^[18]建立软硬互层反倾岩质边坡倾覆破坏的地质力学模型,求解部分边坡最危险破坏面的位置。马文著等^[19]指出反倾层状岩质边坡发生倾覆破坏过程中破裂面分级发育的特征。Liu等^[20]在研究岩层倾覆破坏机理时,得出能有效预测边坡失稳三维DDA方法。李彦奇等^[21]、黄达等^[22]进行离心试验,发现反倾岩质边坡倾覆变形后一旦坡脚被破坏,上部变形体将会整体失稳破坏。总的来看,当前研究主要关注逆向岸坡倾覆变形破坏机制。

河流水位波动使涉水岩体结构松散,导致局部崩塌^[23-24]。许多库区逆向岩质岸坡倾覆破坏前,坡脚出现过塌岸,例如龚家坊滑坡。塌岸带来的岸坡结构性变化可能是库区逆向岩质岸坡崩滑前的重要链环。Haghgoei等^[25]在研究岩质边坡倾覆-滑坡破坏机理中

发现,风化和侵蚀使稳定边坡处于倾倒的临界状态。Zhao 等^[26]通过物理试验模拟水流与库岸相互作用的过程,再现了岸坡的多种破坏类型。三峡库区蓄水后,Shang 等^[27]在对库区不同岸坡塌岸的研究中指出,具有节理裂缝的陡峭岩质岸坡易发生塌岸。Gu 等^[28]在研究斜坡倾倒滑坡破坏时指出,龚家坊滑坡存在普遍的倾倒变形和塌岸现象,认为河流侵蚀是龚家坊滑坡失稳的触发因素。

为深入研究逆向岩质岸坡塌岸-滑坡破坏机制及灾变过程,以三峡库区龚家坊滑坡为例,调查分析滑坡发生前的塌岸现象,开展塌岸约束条件下的典型逆向岩质岸坡变形破坏物理模型试验,探究逆向岩质岸坡发生塌岸-滑坡破坏机制及其链动过程,讨论不同塌岸程度下逆向岩质岸坡变形破坏的演化差异。

1 龚家坊滑坡概况

龚家坊斜坡位于长江左岸,巫山向斜与神女峰背斜间的翼部,距巫山长江大桥约 1.5 km。斜坡坡脚高程 150 m 左右,失稳坡段后缘高程 450 m(图 1)。斜坡坡向 161°,崩滑体为突出的山脊,原始平均坡度 53°,坡脚坡度 30°~45°,中部坡度 60°~65°,后缘为 40°~45°,具有良好的临空面。两侧边界清晰,均以冲沟为界,前缘直抵长江。斜坡处岩层为三叠系下统嘉陵江组一、二、三段地层和大冶组三、四两段地层,岩性主要为泥质灰岩、灰岩(图 2)。



图 1 龚家坊滑坡后实景图
Fig. 1 Gongjiafang landslide after sliding

龚家坊斜坡两侧边界(冲沟)至山脊岩层倾角逐渐变缓,坡脚至坡顶岩层倾角逐渐变陡,宏观上呈“点头哈腰”的变形特征。坡体上部岩体弯曲变形,中部和侧面较多表现为扭转特征,坡脚为应力集中区,随着上部岩体发生变形,坡脚应力集中带向坡体外移

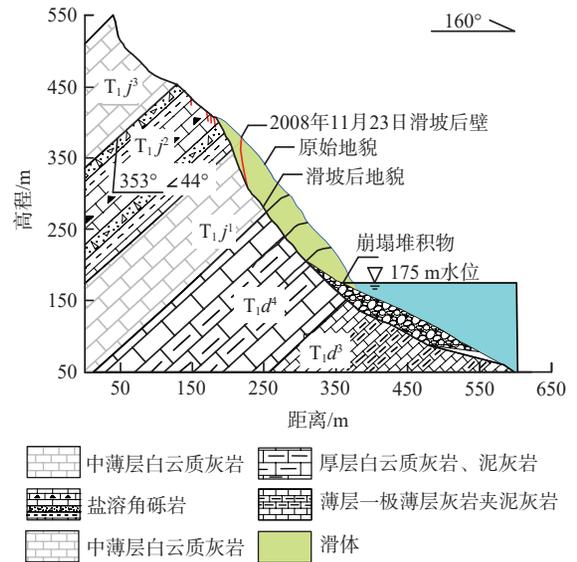


图 2 龚家坊滑坡工程地质剖面图

Fig. 2 Engineering geological profile of Gongjiafang landslide

动,表层岩体弯曲、扭转、部分滑移直至压溃破碎。碎裂岩体主要受纵向裂隙切割,岩层断裂后裂隙被泥质填充,在降雨及地下水的作用下岩层进一步破碎,成为在蓄水过程中多次塌岸的主要物质来源(图 3)。



图 3 龚家坊斜坡局部岩体结构

Fig. 3 Local rock mass structure of Gongjiafang slope

坡体表层结构面纵横交错,致岩体极度破碎。横向结构面主要表现为平直或起伏的特征,是早期构造运动中形成的,纵向结构面为岩层在重力作用下产生的纵向破裂面。两向裂隙面组合切割完整岩层,岩体破碎。白云质灰岩的节理密度明显低于薄层泥灰岩,大型结构面和碎裂岩体均主要分布于泥灰岩层。

龚家坊斜坡在 2003 年 135 m 蓄水后坡脚持续发生机械侵蚀和塌岸,消落带岩体中的软弱层经过机械侵蚀,形成密集的凹腔,岩体原有节理、裂隙加宽加深

甚至不同组的结构面贯通。龚家坊至独龙段为碎裂灰岩为主的逆向岸坡,消落带上有大量的坡面侵蚀和侧向侵蚀,局部塌岸现象明显。2003—2015年黄波林等对巫山县三叠系大冶组碎裂岩体机械侵蚀深度进行了长期测量,侵蚀平均速度达 0.2~0.3 m/a,2005年侵蚀深度达 2.2~3.5 m,随着侵蚀深度的增加,龚家坊一带的塌岸现象普遍发生(图 4)。



图 4 龚家坊滑坡滑前实景图

Fig. 4 Gongjiafang landslide before sliding

2 典型逆向岩质岸坡变形破坏试验设计

2.1 物理模型概化和相似材料

以龚家坊滑坡为原型提取主要变形区,对岸坡前缘松动塌岸简化处理,实际曲折的坡面线取直,保持岩层倾角、斜坡倾角不变,基于相似理论由岸坡的剖面构建二维模型概化出工程地质模型。

试验模型的物理力学性质和结构均与原型相似。以相似三定理为基础,确定几何相似比 $C_l=200$,密度相似比 $C_\rho=1$ 。在不考虑时间相似的基础上,由量纲分析法取得物理模型与地质模型间弹性模量相似比 $C_E=C_l \cdot C_\rho=200$,内摩擦角相似比 $C_\phi=1$ 。

试验蓄水装置为 1.5 m×3.0 m×0.5 m 的玻璃水箱,内置可调坡角的铝合金模型支架,模型由利用相似材料预制的单元板砌筑而成。

参考黄达等^[10]和郭健等^[29]对龚家坊一带斜坡岩石相似材料的研究成果,选用配比为重晶石粉:石英砂:石膏:水=2.5:2.5:1:0.55 的石膏混合物为侵蚀区岩层结构面的填充物,以聚乙酸乙烯酯($[\text{CH}_2\text{COOCH}_2\text{CH}]_n$)为同层面石条间的黏结剂,分别模拟岸坡在水流侵蚀下发生塌岸的现象以及岩层弯曲、倾倒等变形特征。该配比的石膏混合材料遇水易

软化,具有一定强度,在力学物理参数上符合模型相似比,填充侵蚀区能在短时间内有效模拟库岸在库水位影响下发生塌岸。聚乙酸乙烯酯在干燥后黏聚力和内摩擦角分别为 0.005 MPa、22.6°,原结构面物理力学参数 $c=1.00$ MPa, $\phi=22.6^\circ$,符合相似比。

基于工程地质模型概化图,对模型尺寸、上覆岩体荷载进行等比例缩放,控制模型的边界条件,建立对应的可操作性高的物理模型。按照相似比换算,龚家坊岸坡灰岩岩层在模型中的厚度为 0.4~0.8 mm,为便于模型的制备和砌筑,采用的灰岩石条尺寸为 10 mm×10 mm×200 mm。滑坡后缘岩体原型长 313 m,宽 46 m,单宽约 40 m,缩放后模型长 1.565 m,宽 0.23 m,单宽 0.2 m,后缘石条等效体积 0.072 m³,根据密度 2 715 kg/m³,粗估计石条重量 195.67 kg,以 2 kN 荷载等效代替(图 5)。

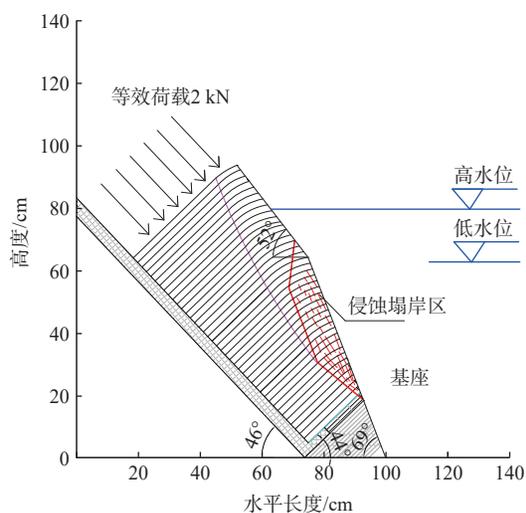


图 5 逆向岸坡物理模型概化图

Fig. 5 Reverse bank slope physical model

2.2 测量设备布置和模型搭建

模型中设置有 12 个土压力传感器、5 个孔隙水压力传感器和 4 个高精度数显百分表(图 6),在蓄水装置外架设分辨率为 5 760×3 840 的高清摄像机记录模型的变形以及百分表的数据变化。土压力传感器量程为 0~200 kPa,用于测量模型不同层面应力的变化情况;渗透水压力传感器量程为 -50~50 kPa,用于测量模型中部及底部孔隙水压的变化;高精度数显百分表的量程为 0~25.4 mm,精度为 0.01 mm,用于观察模型表部的变形情况。

模型的搭建过程如下:首先选用石条、石膏混合物和聚乙酸乙烯酯通过模具预制单一岩层形成单元板。利用石膏混合物对石条进行粘结制备侵蚀塌岸

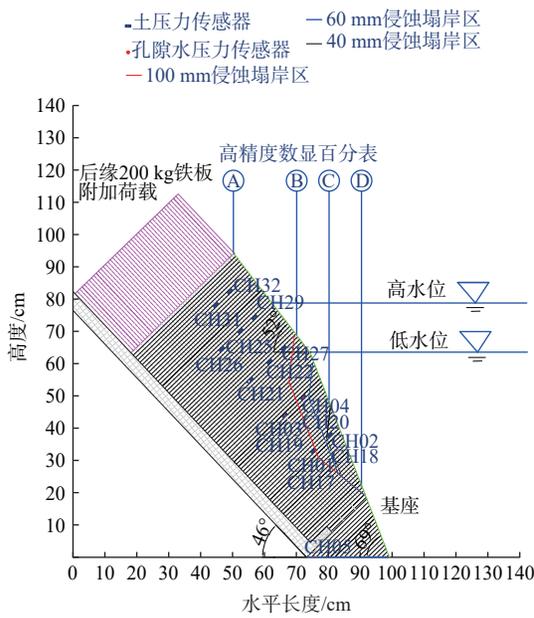


图 6 监测仪器布置图

Fig. 6 Monitoring instrument layout

区单元板,以聚乙酸乙烯酯为相邻石条间粘接物制成非侵蚀塌岸区单元板。后利用砌筑法对各单元板进行组合拼接并埋入相应的传感器,对单元板的搭接采用由下至上搭积木式码放。砝码垂直顶部岩层堆叠,两接触面间采用不溶水性强力胶固定,形成均布荷载,模型与水箱侧壁预留一定间隙,避免模型与侧壁产生摩擦力,该设定符合自然条件中岸坡的受力情况。

2.3 试验方案

为简化试验流程并且方便控制变量,仅选择利用水的侵蚀作为物理触发因素,以塌岸深度为变量设定3个不同工况。根据龚家坊实际塌岸侵蚀深度以及龚

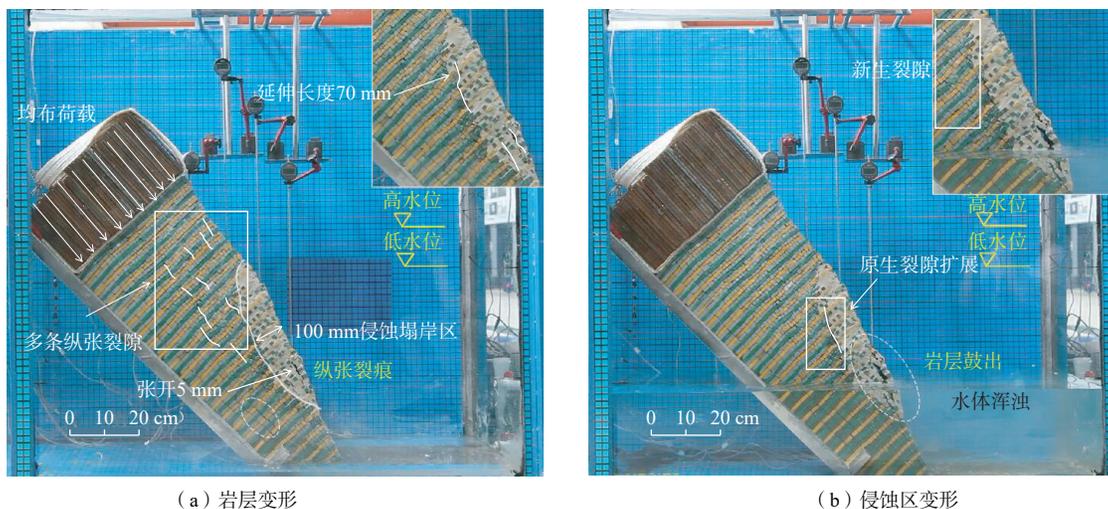
家坊—独龙段实地踏勘和现有监测数据,预设3种工况,设定侵蚀塌岸深度分别为100,60,40 mm,其中100 mm 侵蚀深度的工况为龚家坊滑坡实际侵蚀深度的工况,预设塌岸区高度依据工况1宽高比等比例类推,各工况中所使用的单元板预制步骤相同,模型搭建流程一致。考虑到龚家坊滑坡失稳时库水位的调度情况,模拟库水位由90 m向175 m水位蓄水,试验中蓄水的速率为5 m³/h。

3 龚家坊滑坡侵蚀-塌岸-滑坡灾变过程分析

3.1 变形破坏特征

工况1以龚家坊滑坡为原型设定侵蚀塌岸深度100 mm,模型搭建完成后在加载的过程中斜坡体便出现了明显的变形。加载后静置的30 min内,坡体中沿层理面逐渐出现微小的纵张裂隙,侵蚀塌岸区浅部发育顺坡向的剪切裂缝,30 min后斜坡趋于稳定。此时塌岸区内出现多条延伸长度相当的与斜坡走向一致、倾角小于坡面平均倾角的纵张裂隙,裂隙延伸最长达70 mm,最大开裂宽度为5 mm,见图7(a)。裂隙发育于斜坡底部且距坡面较深,形成该现象的直接原因在于,随着上覆荷载的逐渐增加,斜坡坡底部不断被压密,横向层间裂隙逐渐减小,斜坡模型体积被控制,纵张裂隙逐渐发育并具有一定的规模。

水位上升,侵蚀塌岸区逐渐接触水体,岩体裂隙中的填充物析出,水体逐渐变得浑浊。在水位逐渐升高的过程中,原生结构面的开度与延伸长度不断增加,新生裂隙数量增多,塌岸区岩层鼓出,见图7(b)。裂隙发育速率逐渐攀升,说明坡体浅表部岩体在水流



(a) 岩层变形

(b) 侵蚀区变形

图 7 裂隙发育

Fig. 7 Fracture development

侵蚀过程中失去隔水作用,较深层岩体逐渐触水会进一步提升表部岩体的浸水速率,使塌岸区岩体强度进一步降低。

水位达到最大设计深度的 35% 时,岩层层理面弯曲角度达 11°,最大裂缝长达 120 mm,宽 12 mm,侵蚀区岩体在上覆岩体的挤压下纵张裂隙不断发育,各个小裂隙间连接贯通,滑坡前缘向临空面的位移达 84 mm,表层岩体逐渐鼓出、剥落,塌岸发生,坡形改变,侵蚀区与基岩间的裂缝逐渐贯通,形成一级滑面,见图 8(a)。

随后后缘岩层出现张拉裂缝,由于前缘关键块体崩落对上覆岩体支撑力不足,导致侵蚀区部分岩体下挫形成陡坎。随着水位继续爬升,塌岸区的岩块持续变形,结构面间隙泥质填充物被剥落,水侵入更深层岩体,前缘浅部岩块整体开始倾倒,部分岩块绕底部旋转偏移原位置。最后侵蚀塌岸区上部岩层在缺失部分支撑力的情况下出现顺坡向发育但未连接贯通的张拉裂缝,岩层层面变为弯曲变形,滑坡处于临滑状态。

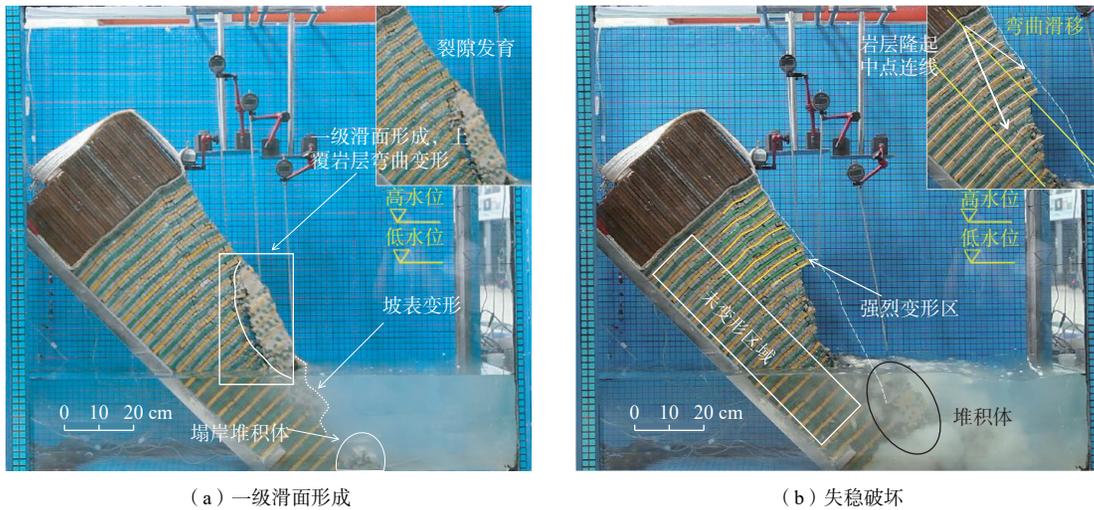


图 8 滑坡初次失稳

Fig. 8 Initial instability of landslide

在上覆荷载和水体掏蚀的作用下,岩层弯曲变形累积,达到岩层抗弯极限,裂隙彻底贯通,滑体沿滑面滑脱,在滑坡过程中滑体部分解体,见图 8(b)。滑体下滑瞬间上覆岩层变形剧烈,下滑后斜坡变形分区明显,强烈变形区底部岩层表现为轻微的向临空面点头式弯曲,中部为“M”形,顶部为斜卧的“S”形。反倾岩质岸坡岩层层面与岸坡坡向相反,在这特殊的结构下,变形区内两条岩层隆起中点连线交角的角平分线倾角与基座倾角一致。根据上覆岩体变形情况,判断塌岸只是滑坡发生的触发因素,主要失稳原因在于上覆岩层的挤压。

在 20~30 mm 近垂直于岩层层面的卸荷裂缝。裂隙连接贯通后形成多级滑动面,见图 9(a)。岩层层面弯曲累计最大角度达 23°,斜坡破坏表现出自下而上,由外向内发生的多滑面分级滑动模式。

水位持续攀升到设计低水位时,一级滑面裂隙的平均宽度为 4 mm,侵蚀区顶部岩块在上覆压力下发生转动和错落,岩层层理面弯曲达 15°。塌岸区残留岩体在上覆荷载的挤压以及自重的牵引下崩滑入水,在塌岸区浸水时长 $t=6\text{ min}$ 时塌岸区被完全掏空,大量临空岩体产出。在上覆荷载的压力以及临空岩体多次崩落的牵引力的作用下,斜坡后缘形成多条长度

塌岸发生后,对上部岩体有一定的牵引力,且使上部部分岩体失去支撑处于悬空状态,在上覆荷载的持续作用下出现了架空和重力坠覆现象。岩体节理面具有一定的强度,相接触的节理面啮合,短时间内观察到上部悬空岩体能够维持基本稳定状态,滑坡滑动分多次发生,具有不连续性。悬空岩体滑动前,岩体内部发育顺坡向的纵张节理面,在上覆岩体以及荷载的作用下节理面间逐渐连结贯通,形成多处台阶状的裂隙面。悬空体表层时有块体零星掉落,斜坡整体处于蠕变状态。最终滑坡模型未全部滑塌,水位上升到设计最高水位后,滑坡顶部仍然残留有被多条宽大裂缝切割悬空岩体,该部分岩体稳定性处于临界状态且倾倒破坏特征明显,临空面关键块体发挥悬臂梁效应,见图 9(b)。

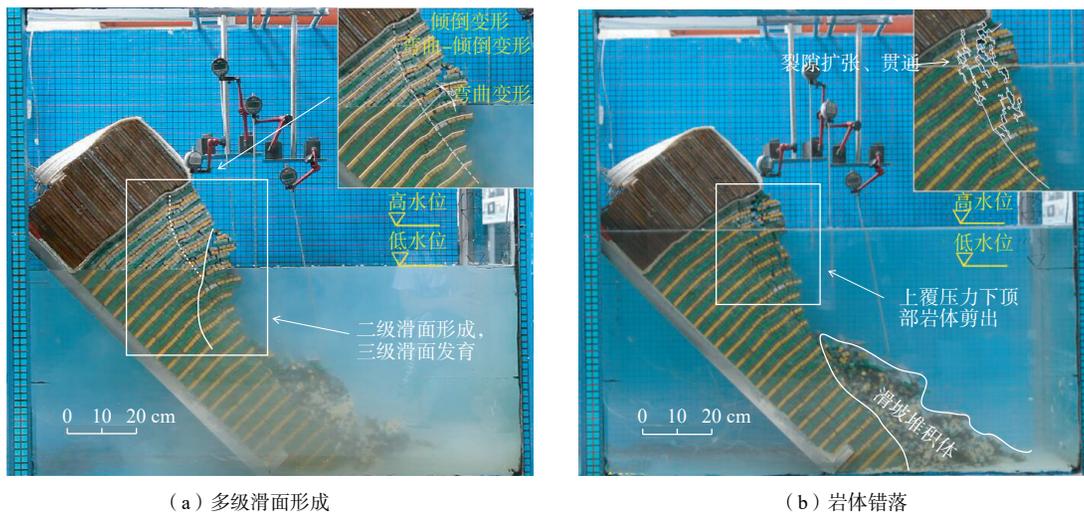


图9 滑坡分级滑动

Fig. 9 Landslide grading sliding

模型所表现出的滑坡失稳演化过程和变形区特征基本与龚家坊滑坡失稳后的实地调查结果一致。龚家坊滑坡失稳分为两次发生^[30], 符合分级滑移的特征, 且在滑坡失稳后, 斜坡中部残余有具备明显弯曲复合式倾倒特征的危岩体。

3.2 应力、孔隙水压及位移分析

岸坡在库水位的侵蚀下应力波动特征明显, 在蠕变过程中岩体内部应力十分稳定, 仅有 10 kPa 以内的波动。侵蚀区中下部的土压力传感器 CH20 率先响应时, 随即出现陡降趋势, 后降低至 0 kPa。结合影像资料判断, 监测点应力变化与斜坡裂隙发育情况有紧密的关联性, 应力陡增或者陡降后必然伴随岸坡的破坏。例如侵蚀区监测点 CH18 破坏发生于监测值达到

峰值(33.23 kPa)的 10 s 后, CH20 的监测值回升发生于传感器随岩体入水后 15 s 左右, 位于岸坡中部浅层的 CH27 与 CH29 在破坏前 20 s 应力上升并伴随着破坏逐渐减小直到稳定在同一层面上的监测点例如 CH21、CH22、CH27 的应力曲线形态不同, 如图 10(a)所示。近表层的 CH27 在斜坡变形过程中, 应力不断减小, 原因在于在侵蚀区被掏蚀过程中, 该处挠曲度较大, 层面裂隙逐渐发育, 张拉裂缝形成, 应力不断减小。中部的 CH22 在蓄水初期, 土压力先略微下降, 再激增, 是典型的应力集中现象, 结合影像资料判断, 先有应力响应后岸坡发生破坏, 且应力响应提前约 1~2 s, 是由于力的不平衡先于形变, 即岸坡通过形变或者破坏来调整应力, 当岩体破坏后, 应力被释放, 土压力下

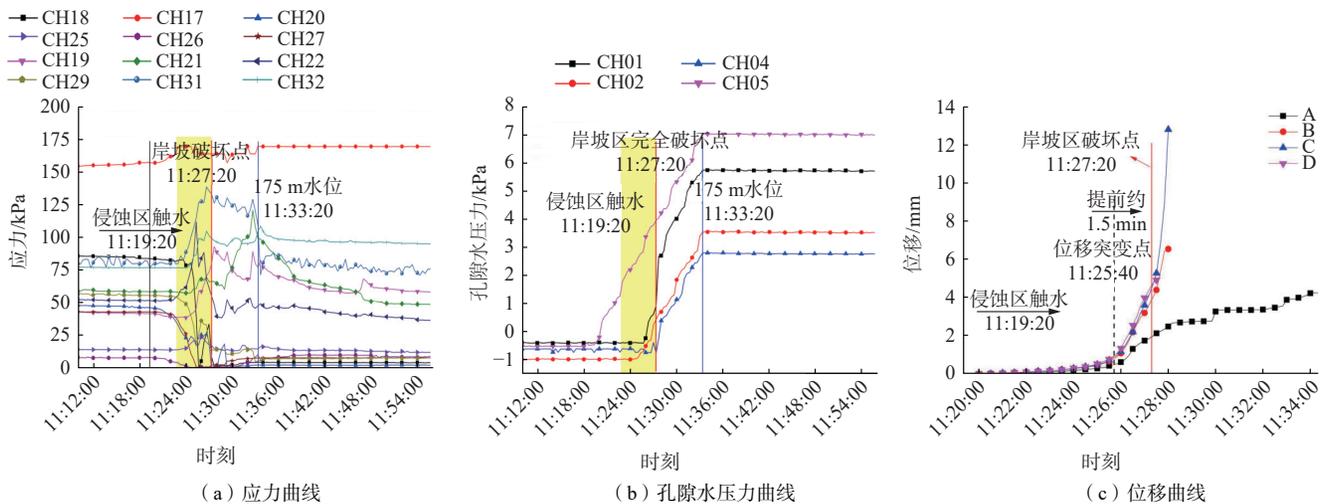


图 10 工况 1 位移/应力/孔隙水压-时间曲线图

Fig. 10 Displacement, stress, and pore water pressure with time

降。深部 CH21 应力先上升再下降,随着应力重分布,应力值整体高于破坏前,是由于岩体内部调整,表层卸荷后,内部较破坏前更加紧密。

结合水位及孔隙水压力曲线,见图 10(b),可以看出孔隙水压力与水深正相关,孔隙水压力的激增伴随着岩体的破坏而发生,且与岩体破坏近乎同一时刻。在侵蚀区完全被破坏后,CH01 水压力激增,该监测点随岩块崩滑入水,稳定后孔隙水压上升曲线的斜率与 CH05(自然水位)一致,说明在塌岸区发生破坏前,孔隙水压力的上升有滞后,受到渗透速率的影响较大。水压力传感器监测曲线中仅有 CH02 出现了斜率负值的情况,结合影像资料判断,当岩体发生破坏后,裂缝在短暂的快速扩展中形成了空腔,随后水体回流填充到腔内,便出现了孔隙水压先陡降再激增的现象。

通过位移变化曲线能明确判断岸坡模型破坏情况,当 4 个位移监测点百分表数值相差越大时,岸坡破坏越严重,如图 10(c)所示。按照监测点位间的位移差和曲线斜率的大小将斜坡变形过程分为原生裂隙扩展、新生裂隙产出、裂隙贯通滑面形成、滑体失稳滑动 4 个阶段,岸坡在演化过程中分级滑动各单次大规模破坏前均经历该 4 个阶段。

模型静置时岸坡发生缓慢的蠕变,4 个百分表数值变化轻微,开始蓄水后至塌岸区浸水前 4 个百分表

数值均小于 0.1 mm,为原生裂隙扩展阶段。蓄水过程中,坡体前缘 3 个百分表(B、C、D)的变形速率开始增加,增速明显大于后缘位移监测点 A。该时段塌岸区岩体与水相互作用,岩体强度降低,上覆压力不变,岩体开始变形,4 个监测点的数值分别为 0.48, 0.78, 0.86, 0.91 mm,为新生裂隙产出阶段。水位持续攀升,侵蚀速率攀升,岩体持续变形,塌岸区前缘下挫,小范围塌岸间断性发生,伴随着裂缝的逐渐贯通滑面形成。斜坡内应力重分布,滑体受挤压完全脱离坡体,坡体沿一级滑面的破坏瞬间发生。百分表 D、B、C 在岸坡经历 8 min 水流侵蚀变形后依次失效,岸坡的破坏由下至上、由浅至深逐级发生。

3.3 不同工况下逆向岩质岸坡塌岸-滑坡演化过程对比分析

各工况模型在静置结束后岩层变形区域、变形特征有明显差距(图 11)。工况 3 设定侵蚀区厚度最浅,在上覆荷载的作用下斜坡中部浅表层向临空面轻微弯曲,工况 2 岩层变形区位于斜坡顶层深部,工况 1 岩层变形区域分布复杂且面积占比最高。工况 1 斜坡顶层浅部与深部岩层均有分布,顶层浅部变形特征与工况 3 相似,深部岩层变形表现为斜卧“S”形。3 种工况的岩层不同变形情况说明在不同侵蚀塌岸深度下斜坡内的应力分布具有显著差异,侵蚀塌岸深度越深,斜坡内部应力分布越复杂。

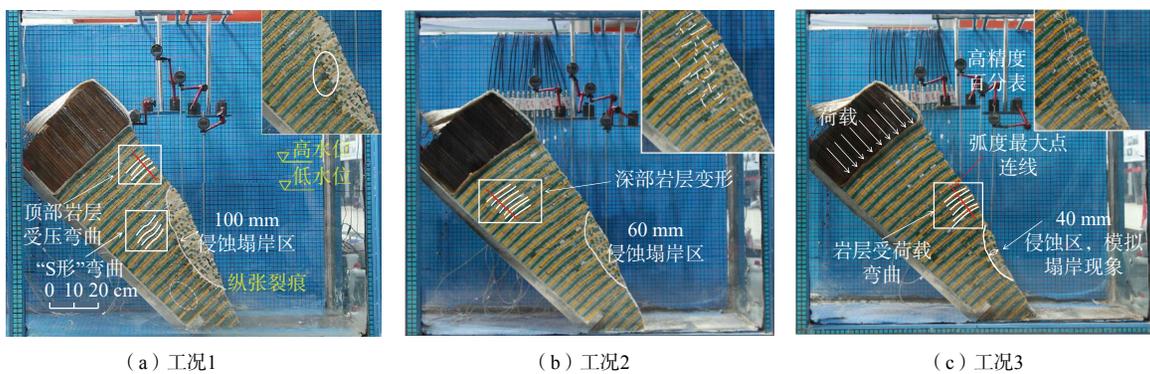


图 11 各工况模型静置情况

Fig. 11 The static condition of each working condition model

3 种工况在蓄水过程中滑面发育于侵蚀区块体剥落的情况下。侵蚀区块体剥落后,上覆岩层临空,锁固段对上部的支撑表现出的悬臂特征明显。侵蚀区上部岩体发育较长的卸荷裂隙,坡体内纵张裂隙逐渐贯通,横向节理不断发育形成不具承载力的台阶状或“T”形局部贯通缝。局部贯通缝彼此交错连接,各级滑面逐渐形成。

岸坡在失稳过程中,岸坡浅表层岩体剥落现象是整体出现变形的前兆,岸坡变形由坡脚向坡顶发展。结合各试验工况,试验中模型随水位的变化由稳定到初次破坏后,逐渐发生局部崩滑,最后整体破坏并自稳。岸坡破坏前块体滑脱的频率逐渐上升,充分说明在水位的波动下部分岸坡不断发生小范围破坏的现象与岸坡失稳具有关联性。各工况均表现出伴随着

坡面首次小范围的崩塌后, 应力被释放, 应力监测值陡增后随即下降, 而后每一次小范围的崩滑必然导致应力监测出现波峰, 直至滑塌结束坡体自稳。

3 种工况滑坡模型在水位上升的过程中均经历了表层滑塌与深部滑坡两个过程, 斜坡破坏均为自下而上, 由外向内发育多级滑面分级滑动。两个过程在分级滑动中反复参与演化, 最终在水位达到最高设计值

时崩滑体后缘残余部分形成负地形, 与龚家坊滑坡实际塌岸-滑坡情况吻合(图 12)。在模型动态演化过程中, 岩层从最初的弯曲变形逐步发展为弯曲倾倒变形, 最终在倾倒变形状态下发生破坏, 其中浅表层倾倒模式包括有块状倾倒、块状-弯曲倾倒和弯曲倾倒 3 种, 这些变形和破坏模式的多样性, 反映出了龚家坊至独龙段斜坡演化的复杂性。

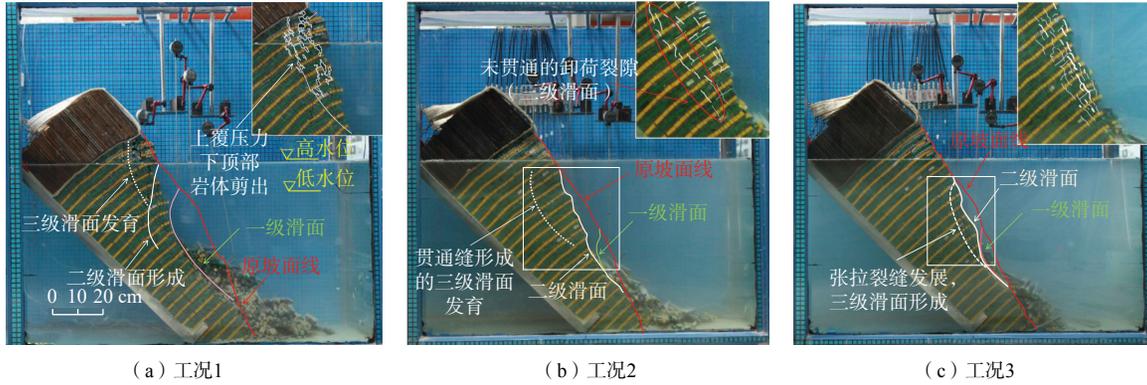


图 12 各工况滑坡演化图

Fig. 12 Landslide evolution of each working condition

不同侵蚀塌岸程度的岸坡破坏方量、滑坡破裂面深度存在一定的差异, 各工况数据对照分析见表 1, 不同塌岸程度下岸坡的变形破坏特征差异明显。工况 3 在蓄水后, 塌岸出现晚, 侵蚀塌岸区裂缝扩张最少, 贯通性破裂面深度浅, 为侵蚀区深度的 2.6 倍。岸坡

整体变形量较小, 岩层未出现大变形, 仅浅表层发生滑塌, 破坏方量小, 表明库区坡脚完整的逆向岩质岸坡在库水位的作用下整体仍能够保持稳定, 短时间内不会发生大方量的崩滑, 时间累计下多级贯通缝形成, 具备潜在滑坡的特征。

表 1 各工况对照分析表

Table 1 Comparative analysis of each condition

试验组次	塌岸深度/mm	滑坡破裂面深度/mm	已失稳区面积/mm ²	潜在破坏区面积/mm ²	已失稳区与潜在破坏区比值
工况1	100	253.302 1	61 813.34	59 550.20	1.038
工况2	60	185.440 2	32 322.60	54 830.9	0.589
工况3	40	103.874 4	22 140.9	17 413.5	1.270

工况 2 在蓄水前仅局部产生裂缝, 未见明显的破坏现象, 蓄水后, 岩体结构降级, 侵蚀区小方量塌岸频发, 在上覆岩体荷载的推挤下, 最终发生浅层滑坡。但岸坡发生较大弯曲变形, 坡体外倾裂隙发育, 坡面岩体极为破碎, 多呈碎裂散体结构, 前缘在库水位的波动下频繁发生塌岸, 近地表岩体部分弯折, 滑面深度为侵蚀区深度的 3.1 倍, 潜在破坏区方量达塌岸方量的 1.7 倍, 坡体稳定性极差。

工况 1 在未蓄水前, 静置过程中岸坡内部蠕变, 结构缓慢改变, 最终滑面深度达 253 mm, 为侵蚀区深度的 2.5 倍, 破坏方量为工况 3 的 2.79 倍。蓄水后岸坡发生多级深层滑坡, 岩体变形较大, 弯曲滑移现象明

显, 与龚家坊滑坡失稳现象一致。对比 3 种工况, 对于逆向岩质岸坡, 塌岸深度增加会导致滑坡破裂面向坡体内移动, 移动速率随塌岸深度的增加递减。该结论有助于通过塌岸深度判断最危险破裂面深度。

4 逆向岩质岸坡塌岸-滑坡破坏机理分析

逆向岩质岸坡在库水位长期的作用下发生塌岸-滑坡破坏, 通过对试验结果的分析, 依据其演化过程中裂隙发展和岩层变形情况基本可分为变形阶段、变形-塌岸阶段、滑坡阶段。

变形阶段主要特征为坡脚岩体在风化等地质过程中破碎, 坡体变形, 坡体前缘坡脚涉水, 见图 13(a)。

在水体持续的冲刷、掏蚀过程中岩体强度急剧降低，岸坡通过岩体的局部变形调整应力分布。在重力时

效影响下坡体岩层弯曲变形，原生裂隙发展，次生裂隙产生、扩张、部分贯通形成弧形滑面。

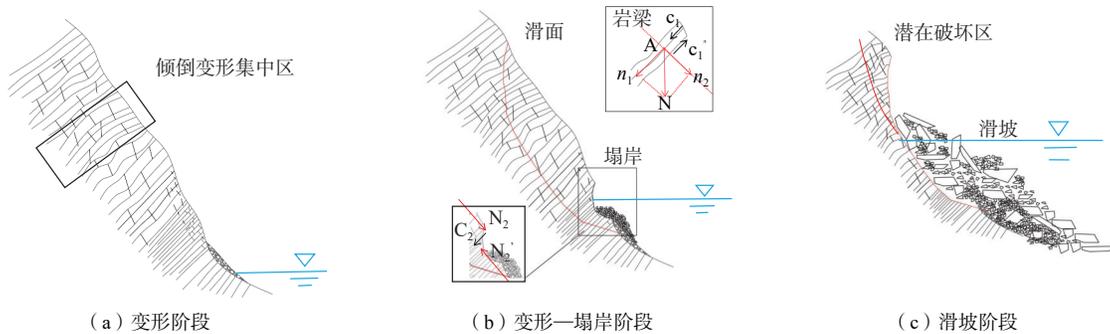


图 13 变形—塌岸—滑坡演化过程示意图

Fig. 13 The evolution processes of deformation, bank collapse, and landslide

岸坡在水位攀升、水体持续侵蚀过程中小范围塌岸逐渐发生，进入变形—塌岸阶段。岸坡在持续塌岸的发生下由表及里发生大变形，塌岸区顶部厚层硬岩发挥悬臂梁效应。随着塌岸现象越发的强烈，水体对岸坡的侵蚀速率递增，侵蚀深度不断加深，岩梁在上覆荷载下变形程度达到抗弯极限被剪断，滑面发育完全，见图 13(b)。

滑面在完全发育后，滑体处于临滑状态，岸坡随时会发生大规模的滑坡。水位攀升，侵蚀加剧，滑体沿着弧形滑面滑塌入水，形成裂隙面发育且通常被多条大型结构面切割的潜在破坏区，该区岩体稳定性处于临界状态且倾倒破坏特征明显，如图 13(c)所示。

在岸坡发生塌岸—滑坡演化过程中，坡脚岩体受水体持续侵蚀，斜坡破坏表现出自下而上，由外向内发生的多滑面分级滑动模式。滑面的雏形发育于岸坡变形阶段，二维剖面特征表现出由浅至深偏移，偏移速率随着塌岸深度的增大而递减，形态上逐渐由折线形向曲线形过渡，最终破坏面顶端一般接近倾倒变形集中区顶部。硬岩岩层因塌岸以及上覆荷载的作用下累计弯曲角度达到 23°和滑面明显贯通是滑体处于临滑状态的最直观的两个特征。

5 结论

(1)物理试验模拟龚家坊滑坡失稳过程：由于水位抬升龚家坊斜坡坡脚持续塌岸，引起坡体内部应力重分布，坡体局部变形，拉张裂隙发育，在持续变形过程中坡段中部厚层硬岩达抗弯极限，裂隙贯通形成滑面，滑体沿着滑面崩滑入江，残余岩体倾倒弯曲-滑移破坏。

(2)通过 3 种工况对比表明，逆向岩质岸坡塌岸—滑坡过程中，塌岸不但改变坡形，坡体结构，引起应力重分布，还为上部变形体提供了变形空间，是岸坡发生大变形和滑坡的诱因。塌岸发生后，在重力时效累计下岩层外纵横两向裂隙不断产出贯通并形成具有一定规模的裂隙贯通面，裂隙贯通面在坡体由下而上崩塌滑坡过程中由折线形向弧形过渡。塌岸引发分级滑移，不同塌岸程度的应力波动局部极值点特征不同，侵蚀区范围小的坡体应力响应点位于坡体上部，提前响应时间短，破坏更具有突发性；侵蚀范围广的岸坡首次应力响应点位于坡体前缘，应力提前响应时间较小范围侵蚀岸坡长。

(3)塌岸程度越高，斜坡内部应力分布越复杂，深部裂隙越易贯通，滑坡规模越大，弧形滑面上端弧度越大，岩层破坏模式随着塌岸深度的增加由倾倒弯曲-滑移式向倾倒式破坏转变。不同塌岸程度下侵蚀区顶部岩梁在上覆荷载的挤压下使岩层层理面累计弯曲角度达到 15°~ 23°时，斜坡后缘均会产生最大的卸荷裂缝，进一步贯通形成深度约为侵蚀区深度 2.5~ 3 倍的滑面，此时滑体处于临滑状态。

(4)库区逆向岩质岸坡的防控与治理应注意坡脚塌岸现象，塌岸是逆向岩质岸坡失稳的诱因之一，补充库区塌岸的调查，对塌岸进行治理能有效促进库区滑坡灾害的防治工作。

参考文献 (References) :

[1] 黄波林. 水库滑坡涌浪灾害水波动力学分析方法研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2014. [HUANG Bolin. Water Wave Dynamic Analysis Method Study on

- Landslide-generated Impulse Wave Hazard in Reservoirs[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 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. [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. (in Chinese with English abstract)]
- [3] FAN Yunyun, MA Dongyang, SUN Xu. Numerical investigation of the landslide and its surge: A case study of the Gongjiafang landslide in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Geofluids*, 2022, 2022: 3800053.
- [4] HUANG Bolin, YIN Yueping, LIU Guangning, et al. Analysis of waves generated by Gongjiafang landslide in Wu Gorge, three Gorges Reservoir, on November 23, 2008[J]. *Landslides*, 2012, 9(3): 395 - 405.
- [5] CHEN Hongkai, TANG Hongmei, HE Xiaoying, et al. Study on failure mechanism of Gongjiafang bank slope in wu gorge of the Three Gorges, the Yangtze River, China[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 368/369/370: 1794 - 1799.
- [6] 殷坤龙, 周春梅, 柴波. 三峡库区巫峡段反倾岩石边坡的破坏机制及判据 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(8): 1635 - 1643. [YIN Kunlong, ZHOU Chunmei, CHAI Bo. Failure mechanism and criterion of counter-tilt rock slopes at Wuxia gorge section in Three Gorges Reservoir Area[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(8): 1635 - 1643. (in Chinese with English abstract)]
- [7] JIN Leilei, DONG Hongkai, YE Fei, et al. Investigation of the block toppling evolution of a layered model slope by centrifuge test and discrete element modeling[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024, 16(1): 112 - 122.
- [8] 徐佩华, 陈剑平, 黄润秋, 等. 锦屏水电站解放沟反倾高边坡变形机制的探讨 [J]. *工程地质学报*, 2004, 12(3): 247 - 252. [XU Peihua, CHEN Jianping, HUANG Runqiou, et al. Deformation mechanism of Jiefanggou high steep dipslope in Jinping hydropower station[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2004, 12(3): 247 - 252. (in Chinese with English abstract)]
- [9] MURALHA J. Parameter variability in the toppling stability of rock blocks[C]//the 10th ISRM Congress. Sandton, South Africa: International Society for Rock Mechanics, 2003: 849-854.
- [10] 黄达, 马昊, 孟秋杰, 等. 反倾软硬互层岩质边坡倾侧变形破坏机理与影响因素研究 [J]. *工程地质学报*, 2021, 29(3): 602 - 616. [HUANG Da, MA Hao, MENG Qiujie, et al. Study on toppling mechanism and affecting factors of anti-dip rock slopes with soft-hard interbedded structure[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(3): 602 - 616. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王恒, 蒋先念, 李树建, 等. 三峡库区危岩体劣化特征及变形破坏模式研究 [J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(12): 92 - 96. [WANG Heng, JIANG Xiannian, LI Shujian, et al. Degradation characteristics and deformation failure mode of perilous rock mass in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2019, 38(12): 92 - 96. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 左保成. 反倾岩质边坡破坏机理研究 [D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2004. [ZUO Baocheng. Study on Losing Stability Mechanics of Counter-Tilt Rock Slopes[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 齐典涛. 昌马水库倾侧变形边坡特征形成机制及发育深度 [J]. *西部探矿工程*, 2001, 13(6): 47 - 49. [QI Diantao. Formation mechanism and development depth of toppling deformation slope characteristics in Changma Reservoir[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2001, 13(6): 47 - 49. (in Chinese)]
- [14] WANG Runqing, ZHENG Yun, CHEN Congxin, et al. Stability analysis of antidip bedding rock slopes with very low-persistent cross joints using a limit-equilibrium model and fracture mechanics[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2023, 23(5): 04023039.
- [15] ADHIKARY D P, DYSKIN A V, JEWELL R J, et al. A study of the mechanism of flexural toppling failure of rock slopes[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1997, 30(2): 75 - 93.
- [16] 吴昊, 赵维, 年廷凯, 等. 反倾层状岩质边坡倾侧破坏的离心模型试验研究 [J]. *水利学报*, 2018, 49(2): 223 - 231. [WU Hao, ZHAO Wei, NIAN Tingkai, et al. Study on the anti-dip layered rock slope toppling failure based on centrifuge model test[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(2): 223 - 231. (in Chinese with English abstract)]

- [17] 杨豪, 魏玉峰, 张御阳, 等. 基于离心试验的反倾层状岩质边坡内非贯通性裂缝变形特性分析 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 152 – 161. [YANG Hao, WEI Yufeng, ZHANG Yuyang, et al. An analysis of non-penetration cracks in anti-dip rock slope based on centrifugal test[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(6): 152 – 161. (in Chinese with English abstract)]
- [18] GUO Jianjun, WU Zhenwei, LIU Kai. Stability analysis of soft-hard-interbedded anti-inclined rock slope[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 1643.
- [19] 马文著, 徐衍, 李晓雷, 等. 基于黏聚力裂缝模型的反倾层状岩质边坡倾倒破坏模拟 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(5): 150 – 160. [MA Wenzhu, XU Yan, LI Xiaolei, et al. A numerical study of the toppling failure of an anti-dip layered rock slope based on a cohesive crack model[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(5): 150 – 160. (in Chinese with English abstract)]
- [20] LIU Guoyang, LI Junjie, KANG Fei. Failure mechanisms of toppling rock slopes using a three-dimensional discontinuous deformation analysis method[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(10): 3825 – 3848.
- [21] 李彦奇, 黄达, 孟秋杰. 基于离心机数值模拟的软硬互层反倾层状岩质边坡变形特征分析 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(4): 141 – 150. [LI Yanqi, HUANG Da, MENG Qiujie. An analysis of the deformation characteristics of soft-hard interbedded anti-tilting layered rock slope based on centrifuge and numerical simulation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 141 – 150. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 黄达, 谢周州, 宋宜祥, 等. 软硬互层状反倾岩质边坡倾倒变形离心模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(7): 1357 – 1368. [HUANG Da, XIE Zhouzhou, SONG Yixiang, et al. Centrifuge model test study on toppling deformation of anti-dip soft-hard interbedded rock slopes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(7): 1357 – 1368. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 张志兼, 黄勋, 蔡雨微, 等. 三峡库区武隆段滑坡灾害驱动因子演变格局与人类活动的影响 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 39 – 50. [ZHANG Zhijian, HUANG Xun, CAI Yuwei, et al. The evolution pattern and influence of human activities of landslide driving factors in Wulong section of the Three Gorges Reservoir Area[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(3): 39 – 50. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 黄达, 匡希彬, 罗世林. 三峡库区藕塘滑坡变形特点及复活机制研究 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 127 – 135. [HUANG Da, KUANG Xibin, LUO Shilin. A study of the deformation characteristics and reactivation mechanism of the Outang landslide near the Three Gorges Reservoir of China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(5): 127 – 135. (in Chinese with English abstract)]
- [25] HAGHGOUEI H, KARGAR A R, AMINI M, et al. An analytical solution for analysis of toppling-slumping failure in rock slopes[J]. *Engineering Geology*, 2020, 265: 105396.
- [26] ZHAO Kun, GONG Zheng, ZHANG Kaili, et al. Laboratory experiments of bank collapse: The role of bank height and near-bank water depth[J]. *Journal of Geophysical Research (Earth Surface)*, 2020, 125(5): e2019JF005281.
- [27] SHANG Min, XU Qiang, XUE Yi guo. Study on the mechanism of bank collapse and prevention-control measures in China Three Gorges Reservoir Area[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 749: 106 – 109.
- [28] GU Dongming, HUANG Da. A complex rock topple-rock slide failure of an anacinal rock slope in the Wu Gorge, Yangtze River, China[J]. *Engineering Geology*, 2016, 208: 165 – 180.
- [29] 郭健, 张鹏, 黄波林, 等. 巫峡岩溶岸坡结构面相似材料试验研究——以箭穿洞危岩体为例 [J]. 水利水电技术, 2020, 51(9): 193 – 199. [GUO Jian, ZHANG Peng, HUANG Bolin, et al. Experimental study on similar material for structural plane of Karst bank-slope of Wuxia Gorge—A case study of Jianchuandong Perilous Rock Mass[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(9): 193 – 199. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 陈小婷, 王世昌, 刘广宁, 等. 三峡库区龚家方残留危岩体爆破清除形成的涌浪野外监测与分析 [J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 114 – 120. [CHEN Xiaoting, WANG Shichang, LIU Guangning, et al. Field monitoring and analysis of water waves generated by artificially erasing the Gongjiafang residual dangerous rockmass[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(4): 114 – 120. (in Chinese with English abstract)]