

基于点云与图像处理的库水位变化 诱发雅鲁藏布江岸坡失稳机理物理模型试验研究

王兆森^{1,2} 张 根^{1,2,3} 于文康^{1,2} 安 阳^{*1} 向啟源^{1,2}

(1. 西藏大学工学院 西藏拉萨 850000

2. 高原重大基础设施智慧建造与韧性安全技术创新中心 西藏拉萨 850000 3. 西藏大学生态环境学院 西藏拉萨 850000)

摘要 为研究库水位骤降条件下堆积层岸坡的渐进变形与破坏特征,以雅鲁藏布江典型堆积层岸坡为原型开展物理模型试验。构建近景摄影测量自动采集系统,采用M3C2点云比较算法获取不同监测阶段的坡面法向位移,并利用ImageJ提取裂缝面积占比、有效连通域数量和平均连通域面积,综合分析岸坡表面形变与裂缝演化过程。结果表明:随着库水位下降,坡面高形变区域由坡脚及临水侧逐渐向坡体中后部扩展,模型岸坡表现出由局部变形向整体滑移发展的渐进破坏特征。M3C2统计结果显示,法向位移加权标准差总体由6.79 mm增至74.60 mm,P5~P95位移区间宽度由14.88 mm增至247.59 mm,其中失稳加剧阶段的位移空间离散程度增长最为明显。水位始降至失稳启动阶段,裂缝面积占比由3.760%增至11.168%,有效连通域数量减少,平均连通域面积明显增大,反映出坡面裂缝由细小、分散状态向扩展、合并和贯通状态演化。M3C2形变指标与图像裂缝指标在阶段变化上具有较好的对应关系,二者联合分析能够从整体变形和表面破裂两个方面识别岸坡渐进破坏过程。

关键词 岸坡稳定性;库水位变化;点云测距;图像处理;裂缝提取;物理模型

DOI:10.16249/j.cnki.2096-4617.2026.03.006

中图分类号 TV223

文献标识码 A

文章编号 2096-4617(2026)03-056-18

引言

雅鲁藏布江中下游地处青藏高原深切峡谷区,受高原季风气候与冰雪融水的双重影响,该流域的水动力边界条件变化明显。目前,已有研究针对岸坡稳定性问题^[1-4],通过现场调查、室内物理模型实验与数值模拟等手段,在河岸侵蚀机理方面进行了深入研究^[5]。同时,为克服传统接触单点监测技术(如GNSS、深部测斜)在复杂环境下易损毁,难以精准识别局部剪切变形和渐进式破坏,以无人机倾斜摄影和近景摄影测量为代表的非接触式测绘技术,凭借面状数据获取优势,实现了对坡体几何形态演变的精细化识别,逐步应用于岸坡形貌演化分析^[6,7]。然而,现有研究侧重于失稳模式的定性描述,对坡脚侵蚀与坡体裂缝

收稿日期:2026-05-16

基金项目:西藏中央引导地方项目(XZ202601YD0017);西藏自治区重点研发计划项目(XZ202501ZY0132)。

第一作者简介:王兆森,男,汉族,河南南阳人,西藏大学工学院硕士研究生,主要研究方向为高原地质灾害。

通讯作者简介:安阳,男,汉族,河南南阳人,西藏大学工学院副教授,主要研究方向为高原地质灾害。

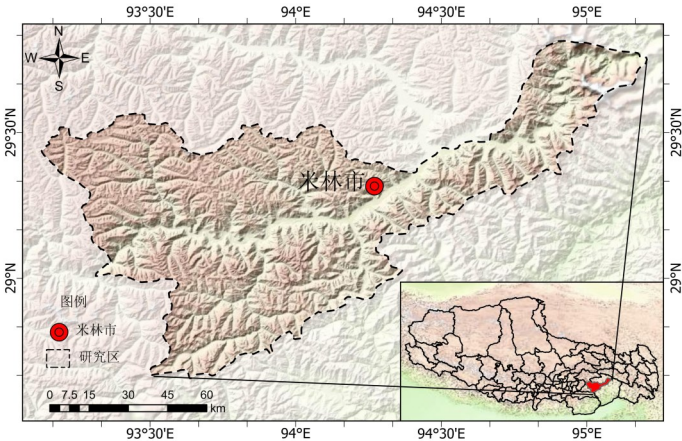
发育的耦合关系缺乏系统的定量刻画。此外,单一测绘手段存在一定局限,如,点云测距技术仅适用于宏观整体形变量化,难以精细识别裂缝网络;二维图像处理技术能有效提取裂缝,但缺乏三维空间特征^[8]。因此,建立跨尺度协同表观形变与细观裂缝的融合分析方法十分必要。

针对现有单一监测手段在岸坡渐进式失稳识别中的局限性,本文采用三维点云形变分析与数字图像处理相结合的协同分析方案。以雅鲁藏布江典型高渗透性堆积层岸坡为原型,基于树莓派搭建近景摄影测量自动采集系统,利用CloudCompare中的M3C2(Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison)点云比较算法,定量获取库水位波动条件下岸坡的三维法向形变场;结合高分辨率图像处理方法提取坡面裂缝信息,综合分析岸坡宏观形变与细观裂缝的时空演化特征,并探讨水位骤降、坡前侧向约束减弱及坡体内部水力响应差异对岸坡牵引式失稳可能产生的影响,为高水头河流岸坡灾害的前兆识别与非接触式监测提供参考。

既有研究表明,库水位快速下降会改变岸坡临水侧的水力边界条件^[9]。随着坡外水位降低,作用于岸坡前缘的外部水压力随之减小;受坡体材料渗透性和排水条件影响,坡体内部水分响应可能与外部水位变化存在一定时滞,从而形成不利于岸坡稳定的水力条件^[10]。对于结构较为松散的堆积层岸坡,坡脚及临水侧可能首先出现局部变形,随后变形逐渐向坡体中后部扩展,并伴随坡面裂缝的萌生、扩展和贯通,最终表现为渐进式破坏特征^[11]。需要说明的是,本文物理模型试验未直接监测坡体内部孔隙水压力和应力变化,因此上述水力作用主要作为解释模型表面变形现象的理论背景,具体破坏过程主要依据水位变化、M3C2位移场及裂缝演化结果进行分析。

1 研究区域概况

研究区位于青藏高原雅鲁藏布江中下游深切峡谷区,属典型的高山峡谷构造侵蚀地貌,地理位置N 29.14°,E 93.73°(图1)。受印度洋板块与欧亚板块持续强力挤压,区内新构造运动极度活跃,河谷多呈狭深陡峭的“V”字型展布,研究区基岩主要由前寒武系变质岩组成,其上覆第四系松散堆积层,堆积层成因较为复杂,主要包括冰水堆积、崩坡积及冲洪积等类型,岩性以碎石土、砂卵石及角砾土为主,局部夹有粉质黏土层。受长期构造活动、风化卸荷及河流侵蚀作用影响,下伏基岩节理裂隙较为发育,基岩面起伏变



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2923号、藏S(2024)034号的标准地图制作,底图无修改。
Notes: This map is made based on the standard map with review numbers GS(2016)2923 and Zang S (2024) 034 downloaded from the standard map service website of the Ministry of Natural Resources. The base map has not been modified.

图1 研究区区位图
Fig.1 The bitwise analysis diagram of the study area

化明显。上覆堆积层厚度在空间上分布不均,与下伏基岩共同构成了研究区岸坡的基本结构,从物质组成和结构特征来看,由于颗粒级配不均,堆积体内部结构整体松散,且发育大量孔隙。这种特殊的土体结构使土体具有强渗透性,且使其初始抗剪强度(黏聚力 c 与内摩擦角 φ)维持在较低水平,导致坡体对外部水动力条件的响应极为敏感,极易发生结构失稳。

2 研究方法

2.1 岸坡现场调查

依据《工程地质手册》^[12]《边坡与滑坡工程治理(第三版)》^[13]及相关水利水电勘察规范,结合岸坡工程的变形监测要求,本次调查综合运用工程地质测绘、工程地质钻探及非接触式摄影测量手段,重点查明雅鲁藏布江典型岸坡的地层岩性、结构特征及水力作用下的失稳轨迹,为后续室内物理模拟试验提供原始地质资料、参数选取和重点观测部位的确定提供依据。

2.1.1 地形地貌与地层结构特征

研究区岸坡地处深切峡谷区,属典型的堆积层岸坡,宏观地貌呈现明显的“上陡下缓”特征,基岩露头及钻探资料揭示,下伏基岩受长期构造改造与卸荷回弹影响,节理裂隙较为发育。上覆第四系厚层堆积体成因复杂,主要由冰水堆积物、崩坡积物和冲洪积物组成,岩性以碎石土、角砾土及粉质黏土为主。在坡体结构方面,该类碎石土表现出级配不良、颗粒组成不均一,具有明显的非均质性。粗颗粒(漂石、块石)构成土体骨架,细颗粒填充不充分,土体内部结构普遍松散,局部可见颗粒间接触不充分和孔隙较发育的现象。这种特殊的骨架支撑结构导致地层具备较强的渗透性,且天然抗剪强度较低,对外部水动力场的变化表现出较高的力学敏感性。

2.1.2 库水位骤降与临空面演化特征

库水位骤降是扰动堆积层岸坡原有受力平衡的重要外部因素。现场调查与模型观测显示,在物理模型试验的水位骤降工况下,岸坡临水侧的渗流边界条件随之发生变化。水位骤降导致坡面原有的静水压力约束迅速减弱,产生显著的侧向卸荷效应。同时,受堆积层渗透迟滞性影响,坡体内部孔隙水压力的消散过程明显滞后于外部水位下降过程,进而改变坡体内部渗流力的分布,并对岸坡稳定性产生不利影响。坡脚局部剪切变形和外鼓使岸坡原有几何边界发生改变,进而使坡体下部临空面逐步扩展。随着临空面扩大,岸坡内部应力场重新分布,局部剪切变形区由坡脚及前缘向坡体中后部扩展。表现为发育多条与岸线近乎平行的弧形张拉裂缝,并伴有明显的差异化沉降台阶。上述演化特征表明,岸坡表现出受水位骤降驱动,由临空面扩展主导的渐进式牵引变形特征。

2.1.3 物理模拟试验原型

为确保物理模拟试验能够较好地模拟现场岸坡的流固耦合效应及失稳过程中的力学响应,基于现场调查结果,对岸坡几何形态和堆积体物质组成进行概化。设置以下关键参数:原型岸坡的总坡高概化为80 m,坡剖面采用双折线模型;上部陡坡段坡角取 48° ,下部缓坡段(涉水段)坡角取 15° ,坡角均以水平面为基准;根据现场调查及室内试验结果,模型材料(碎石土混合料)的重度 γ 取 21.0 kN/m^3 ,其土体参数取值为:有效黏聚力 $c'=14.3 \text{ kPa}$,有效内摩擦角 $\varphi'=19.66^\circ$ 。

2.2 岸坡稳定性评价体系与规范化判定

2.2.1 稳定性评价标准与工况概化

根据工程规模、岸坡失稳后果及其对周边工程设施的影响,参照《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)^[14],将研究区堆积体岸坡安全等级按二级考虑。针对库水位骤降、强冲刷等非正常工况,本文采

用稳定安全系数对岸坡稳定状态进行判定。正常工况下稳定安全系数控制值取 $F_s=1.30$;对于库水位骤降等非正常工况,稳定安全系数控制下限取1.05。基于上述标准,岸坡稳定性状态划分见表1。

表1 边坡稳定性状态划分
Table 1 Classification of slope stability states

边坡稳定性	$F_s<1.00$	$1.00\leq F_s<1.05$	$1.05\leq F_s<F_{st}$	$F_s\geq F_{st}$
边坡稳定性状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

注: F_{st} 为边坡稳定安全系数。
Notes: F_{st} means factor of safety for slope stability.

2.2.2 基于 Morgenstern–Price 法的稳定性计算

本研究采用 GeoStudio SLOPE/W 模块开展岸坡稳定性计算。考虑堆积层岸坡潜在滑动面可能呈非圆弧形态,选用 Morgenstern–Price 法搜索最危险滑动面并计算稳定性系数^[15]。该方法以第*i*个土条界面上的条间剪力 X_i 与条间法向力 E_i 之间的函数关系 $X_i = \lambda f(x_i)E_i$ 为基础,其中 λ 为比例系数, $f(x_i)$ 为条间力分布函数;计算同时满足整体力平衡与力矩平衡。针对库水位骤降工况,在计算模型中设置坡外水位快速降低边界。计算输出包括最危险滑动面位置及其稳定性系数,具体结果见第3.1.1节。

2.3 库水位骤降条件下堆积体岸坡物理模型试验设计

2.3.1 相似准则与模型概化

为研究库水位骤降条件下堆积体岸坡的表面形变与渐进破坏特征,开展室内物理模型试验。试验以几何相似为基础,结合模型箱尺度和模型材料强度特征,对原型岸坡的几何形态及堆积体结构进行概化。模型箱有效尺寸为2.0 m×1.0 m×1.0 m,以原型岸坡特征坡高与模型坡高的比值确定几何相似常数。受模型箱尺度、颗粒粒径及重力场条件限制,本试验主要实现水位骤降工况及岸坡表面变形破坏过程的相似再现。

2.3.2 模型构建与工况设定

试验岸坡采用分层压实法在水槽内构建,并依据第2.1.3节概化的几何参数控制坡面为“上陡下缓”的双折线结构(图2)。模型表面设置稳定、清晰且可重复识别的摄影测量标识,以建立各监测时刻统一的空间参考。试验主要模拟库水位快速下降条件下岸坡的表面变形响应,试验过程划分为初始浸润与稳定阶段、水位骤降与变形响应阶段。

第一阶段为初始浸润与稳定阶段。通过供水系统向模型水槽蓄水区缓慢注水至预设最高水位,并保持水位不变,直至坡体表面浸润范围和可观测变形基本稳定。随后记录初始水位、坡面形态及监测标识坐标,获取参考影像和参考点云。

第二阶段为水位骤降与变形响应阶段。开启水槽排水系统,以预设排水速率降低蓄水区水位,模拟库水位快速回落过程。该阶段连续记录水位变化,并同步采集坡面影像,重点观测坡面位移、裂缝发育、坡脚变形和临空面扩展等现象。当坡体宏观变形不再明显发展时停止排水并完成末次数据采集。

2.4 基于点云算法的岸坡整体形变量化

2.4.1 岸坡几何属性提取与空间制图

为定量解析岸坡在侵蚀过程中的微观形貌特征与宏观空间演变,本研究构建了基于 CloudCompare 高精度解算与 ArcGIS Pro 空间统计的联合处理路线。针对摄影测量获取的原始点云,利用 CloudCompare 标量场计算模块执行精密几何参数提取,通过对原始数据进行去噪处理,剔除由于试验环境光线反射产生

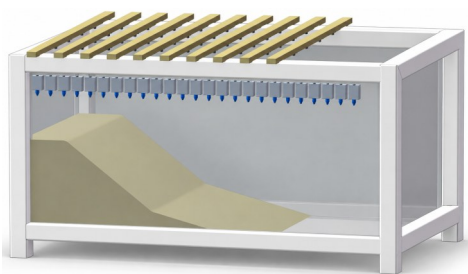


图2 库水位骤降物理模型试验装置及坡体结构示意图
Fig.2 Schematic diagram of the physical model test apparatus for rapid reservoir drawdown and the slope structure

的离群杂点。在坡度(Slope)表征方面,采用k邻域搜索算法构建局部最优拟合平面,该平面方程可表示为 $Ax + By + Cz + D = 0$,通过最小二乘法拟合局部平面,进而提取代表坡面微观倾向的法向量 $\mathbf{n}(n_x, n_y, n_z)$,进而依据下式映射全场坡度标量分布:

局部拟合平面方程为:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \tag{1}$$

采用最小二乘法确定最优拟合平面参数:

$$(A^*, B^*, C^*, D^*) = \arg \min_{A, B, C, D} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{(Ax_i + By_i + Cz_i + D)^2}{A^2 + B^2 + C^2} \quad (A^2 + B^2 + C^2 > 0) \tag{2}$$

式中, (A^*, B^*, C^*, D^*) 为最优拟合平面参数; A 、 B 和 C 为平面法向量的 3 个分量; D 为平面方程的常数项; k 为局部邻域内的有效点数; i 为邻域点编号; (x_i, y_i, z_i) 为第 i 个点的三维坐标。目标函数表示局部邻域点到拟合平面的平均平方正交距离。

局部平面法向量为:

$$\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z) = (A, B, C) \tag{3}$$

局部坡度角计算公式为:

$$\theta = \arccos \left(\frac{|n_z|}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \tag{4}$$

$$\alpha = \text{atan2}(n_y, n_x) \cdot \frac{180}{\pi} \tag{5}$$

式中, θ 为局部坡面相对于水平面的坡度角, 取值范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$; n_x 、 n_y 和 n_z 分别为局部平面法向量在 3 个坐标轴方向上的分量; $\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}$ 为法向量的模, $\text{atan2}(n_y, n_x)$ 为双参数反正切函数, 用于确定水平投影向量所在的象限; $180/\pi$ 为弧度转换为角度的换算系数。

基于研究区数字高程模型(DEM), 采用 ArcGIS Pro 对高程、坡度和坡向进行栅格计算与空间制图, 结果见图 3~图 5。其中, 高程分布反映研究区整体地形起伏, 坡度和坡向分别表征坡面的陡缓程度与空间朝向, 为研究区地形地貌特征分析及物理模型几何条件设置提供基础。

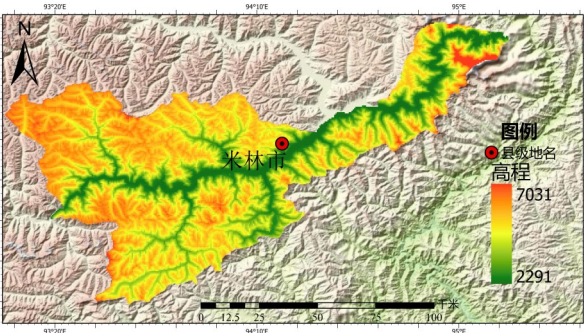


图3 研究区高程分布图

Fig.3 Elevation distribution map of the study area

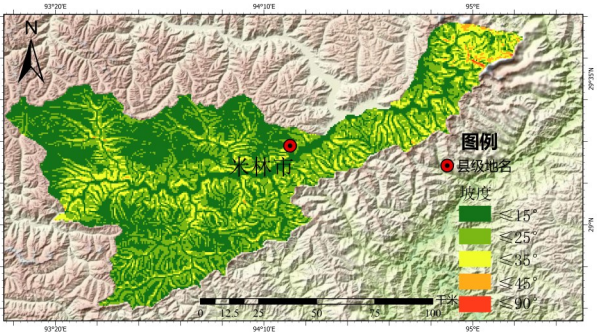


图4 研究区坡度分布图

Fig.4 Slope distribution map of the study area

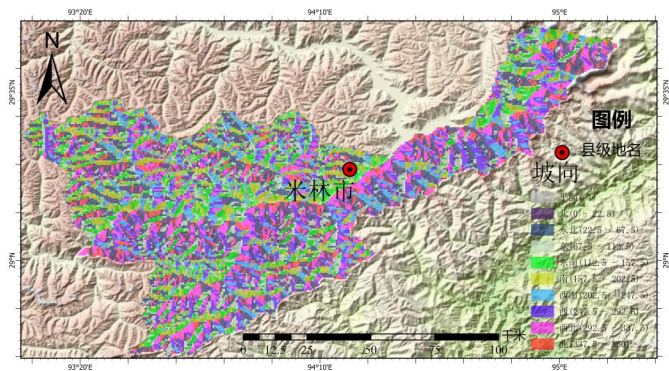
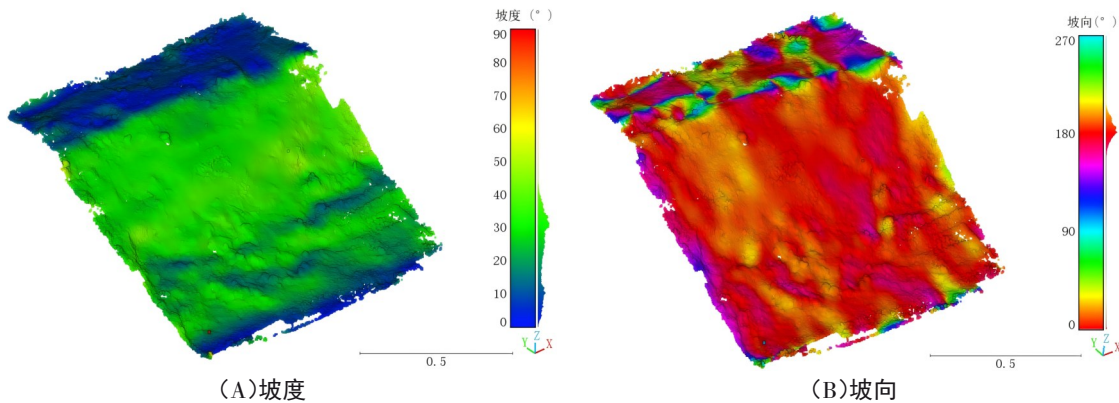


图5 研究区坡向分布图

Fig.5 Aspect distribution map of the study area

在模型尺度上,基于试验初期点云数据,进一步计算模型坡面的坡度和坡向,结果见图6。所得结果反映了试验开始前模型坡面的几何形态与空间取向,并作为后续各监测阶段点云配准、M3C2形变计算及裂缝演化对比的初始几何基准。



(A)坡度

(B)坡向

图6 初始模型坡面几何属性提取结果

Fig.6 The results of geometric attributes of the initial model slope

2.4.2 多时相点云配准与 M3C2 形变计算

各监测时刻点云首先裁剪至相同研究区域,并以初始稳定阶段点云作为参考。利用坡体外稳定区域内的同名特征进行粗配准,再采用迭代最近点(ICP)方法进行精确配准^[6],以减小相机姿态和重建坐标差异造成的系统误差。完成配准后,采用 CloudCompare 中已有的 M3C2 算法计算两时相点云沿局部法向的有符号距离^[17]。需要说明的是,本文旨在利用 M3C2 位移场与裂缝信息开展联合分析,而非提出新的 M3C2 算法。

M3C2 计算中,核心点法向量由局部邻域拟合确定,并沿法向在投影圆柱内分别统计两时相点集的位置和离散程度。位移正负方向在全部监测时刻保持一致,规定沿坡面外法向为正、反方向为负。为区分真实形变与点云粗糙度、点密度及配准误差引起的波动,引入 95% 置信水平探测下限 $LOD_{95}: LOD_{95} = \pm 1.96 [\sqrt{(\sigma_1^2/n_1 + \sigma_2^2/n_2)} + E_{reg}]$,式中 σ_1, σ_2 为两时相点云沿法向的离散度, n_1, n_2 为投影圆柱内有效点数, E_{reg} 为配准误差。仅将 $|d| > LOD_{95}$ 的区域判定为显著形变。

为比较不同监测阶段的形变强度,统计 M3C2 法向位移的加权平均值、加权标准差、P5~P95 位移区间。平均值用于表征整体位移方向,标准差反映空间离散程度,显著变形面积占比用于量化高形变区由局部向整体扩展的过程。

2.4.3 正射影像裂缝提取与定量指标

为保障不同监测阶段裂缝识别结果具有可比性,本文以各监测时刻导出的坡面正射影像为统一输入,采用 ImageJ 将图像转换为 8 bit 灰度图,并采用固定灰度阈值提取暗色裂缝区域^[18]。随后删除面积小于 12 像素的孤立噪声区域,并结合原始正射影像和同期 M3C2 形变场对识别结果进行对照判读,以减小浸润阴影及照度变化引起的误识别。

基于处理后的二值图像,统计裂缝面积占比、有效连通域数量和平均连通域面积^[19]。其中,裂缝面积占比为识别裂缝区域面积与研究区域总面积之比;有效连通域数量为去除小面积噪声后相互独立的裂缝区域数量;平均连通域面积为裂缝总识别面积与有效连通域数量之比。骨架化结果主要用于辅助展示裂缝走向、分支及贯通形态,不单独作为本研究的统计指标。主要定量指标及其物理意义见表 2。

表 2 点云形变与裂缝演化定量指标
Table 2 Quantitative indices for point-cloud deformation and crack evolution

类别	指标	符号	计算或判定方法	单位
M3C2	加权平均法向位移	μ	$\mu = \frac{\sum_{j=1}^m n_j d_j}{\sum_{j=1}^m n_j}$	mm
M3C2	加权位移标准差	σ	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m n_j (d_j - \mu)^2}{\sum_{j=1}^m n_j}}$	mm
M3C2	P5~P95 位移区间	[P5,P95]	法向位移的第 5 百分位数至第 95 百分位数	mm
M3C2	P5~P95 位移区间宽度	$W_{5 \sim 95}$	P95-P5	mm
裂缝	裂缝面积占比	A_r	$A_r = \frac{A_{trace}}{A_{ROI}} \times 100\%$	%
裂缝	有效连通域数量	N_c	去除小面积噪声后的独立连通域数量	个
裂缝	平均连通域面积	$\bar{A}_c$	$\bar{A}_c = \frac{A_{trace}}{N_c}$	mm ²

注: m 为位移数据的分组数, n_j 为第 j 组的点数, d_j 为该组位移区间的组中值。
Notes: m is the number of displacement bins, n_j is the number of points in the j th bin, d_j is the midpoint of the displacement interval for that bin.

3 结果分析

3.1 现场岸坡侵蚀形貌与宏观变形特征

现场调查结果显示,雅鲁藏布江堆积层岸坡整体轮廓完整,未发现明显裂缝、错台或滑塌等宏观变形迹象。水位波动带局部存在表层冲刷和松散颗粒剥落,但尚未影响岸坡整体稳定性。

在此基础上,物理模型试验将坡体初始状态设置为稳定状态,通过高水位浸泡和快速降水位模拟库水位变化过程,并结合 M3C2 点云分析与 ImageJ 裂缝提取,研究岸坡由局部变形向整体失稳发展的潜在演化机制。模型试验结果用于揭示特定水位条件下的形变规律,并不代表现场岸坡已经发生相同程度的变形。

水位骤降工况下,最危险滑动面的稳定性系数 F_s 为 0.967(图 7),小于 1.00,表明计算模型处于不稳定状态。最危险滑动面主要发育于坡体下部至中部,坡脚附近为剪切变形与破坏的集中区域。该结果为后续物理模型中坡脚临空面扩展及渐进变形现象的对比分析提供了稳定性依据。

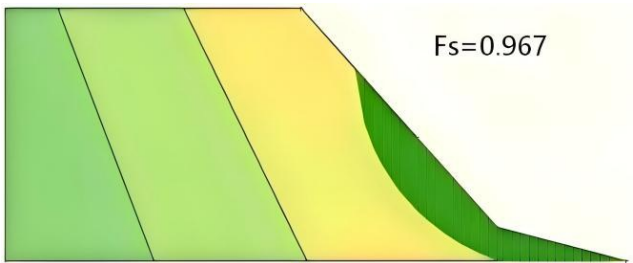


图7 Morgenstern-Price 法计算得到的最危险滑动面及安全系数
Fig.7 Critical slip surface and safety factor calculated by the Morgenstern - Price method

3.2 库水动力驱动下的形貌演化与空间响应特征

3.2.1 模型岸坡演化过程

库水位变化会改变模型岸坡临水侧的外部边界条件,并引起坡面几何形态的阶段性响应。本研究采用CloudCompare中的M3C2算法,对各阶段点云进行对比计算(图8~图15),并对计算获得的法向距离数据进行筛选,去除明显噪点及异常值后进行统计分析(表3~表6)。通过法向位移总体水平、离散程度及P5~P95 位移范围等统计特征,对不同阶段坡面变形幅度及其分布差异进行定量表征,并结合M3C2形变场的空间分布特征,分析坡体形变的阶段性演化规律。根据水位工况及形变场的阶段性特征,将模型岸坡的演化过程划分为以下四个阶段。

第一阶段:高水位浸泡与水位始降形貌响应阶段

在模拟高水位蓄水初期,岸坡土体在水头压力作用下持续入渗,内部含水率不断攀升,导致土颗粒间的基质吸力显著降低,有效应力随之发生重分布。受自重应力驱动,坡体内部产生微小的压缩与蠕变,在宏观形貌上表现为坡面开始萌生少量的初始不连续面迹线。此时,由于坡体内外水压力处于相对平衡状态,高水位蓄水M3C2形变场热力图显示(图8),法向位移量级极小且空间展布呈现离散的斑点状,反映了岸坡在浸泡饱和过程中的结构自适应调整,坡面整体几何轮廓尚未发生系统性偏移。

当试验进入水位始降节点时刻,坡体原有的内部土压力由于受到水位跌落影响,使得原有平衡状态被打破。受土体渗透性与排水条件影响,坡内水分的渗透速率远远滞后于外部水位的降幅,坡体内部开始产生指向坡外的渗透压力差。这一力学条件的改变触发了前期萌生的几何不连续面向深部产生小幅拓宽与延伸。从水位始降M3C2形变场热力图可以看出(图9),位移场重心开始由随机分布向坡脚及中下部区域汇聚,位移矢量表现出初步的方向性特征。这种从饱和状态下的应力重分布向动水压力诱发的形貌演变,证实了水位初降是驱动岸坡产生结构性位移的关键因素,M3C2算法通过捕捉这一阶段的微小法向几何偏差,准确记录了岸坡形变的初始状态。

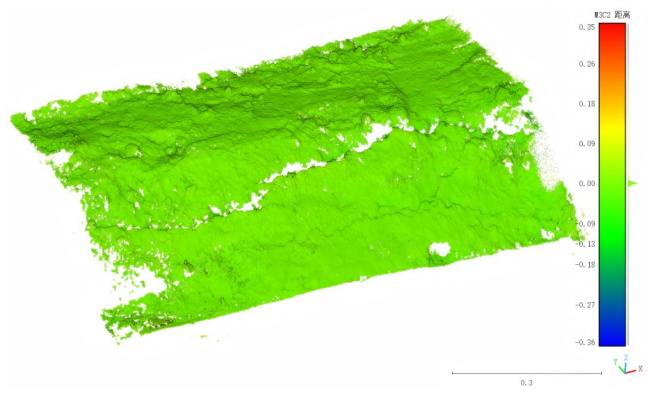


图8 高水位蓄水 M3C2形变场热力图
Fig.8 Heat map of M3C2 at high water level

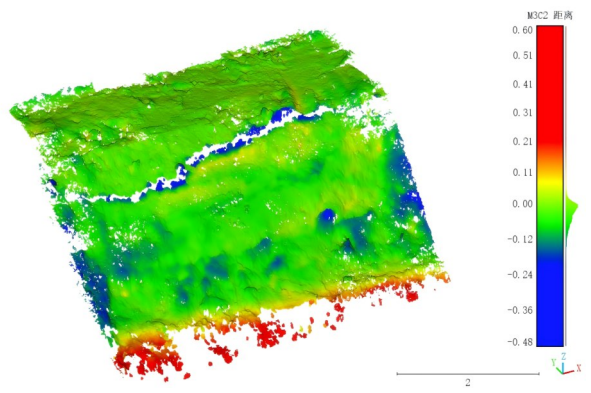


图9 水位始降 M3C2形变场热力图
Fig.9 Heat map of M3C2 at the start of water level decline

表3 高水位蓄水与水位始降M3C2形变场位移统计

Table 3 Statistics of displacement in the deformation field during the stages of high water level immersion and initial water level drop morphology response

监测阶段	加权平均法向位移 μ (mm)	加权标准差 σ (mm)	P5~P95 位移范围(mm)	状态识别
高水位蓄水	-1.13	6.79	[-9.01,5.87]	初始平衡 坡面基本稳定
水位始降	-1.50	7.66	[-15.54,12.86]	局部调整, 未出现明显变形

第二阶段:水位急骤下降与后缘拉裂萌生阶段

随着库水位快速下降,模型坡体的三维变形特征发生显著变化。水位初降和水位骤降持续 M3C2 形变场热力图显示(图 10、图 11),前期以局部离散斑点为主的高形变区逐渐扩展,并沿坡体中后部形成连续性较强的带状分布。与前一阶段相比,该阶段坡面变形的影响范围明显扩大,不同部位之间的位移差异进一步增强,表明坡体已由前期局部调整逐渐转入不均匀变形的加速发展状态。

从空间分布特征来看,高形变区主要沿坡体后缘及其邻近区域集中发育,其边界逐渐清晰,并呈现一定的几何不连续性。裂缝边界两侧特征点的 Z 轴高程差随水位下降而增大,反映出裂缝两侧坡体开始产生差异变形。该现象说明,坡体后缘不同区域的变形协调性逐渐降低,局部拉张作用增强,为后缘拉裂缝的萌生和进一步扩展提供了几何条件。

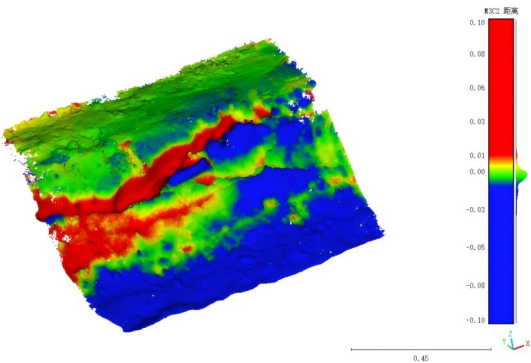


图10 水位初降 M3C2 形变场热力图

Fig.10 Heatmap of M3C2 during the early stage of water level decline

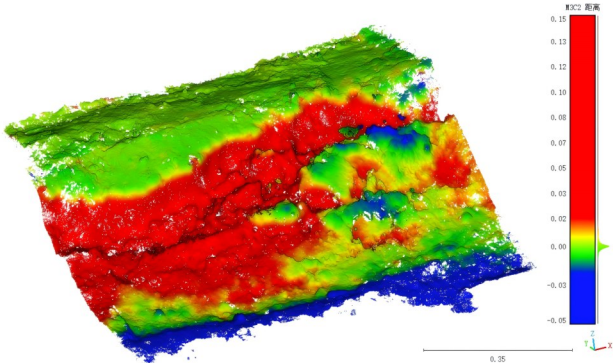


图11 水位骤降持续 M3C2 形变场热力图

Fig.11 Heatmap of M3C2 during the continued abrupt decline of water level

表 4 的统计结果进一步反映了该阶段坡面变形显著增强的特征。法向位移加权标准差由水位始降阶段的 7.66 mm 增加至骤降持续阶段的 27.08 mm,约为前一阶段的 3.5 倍,表明坡面各区域位移相较于整体平均水平的离散程度明显增大。该阶段坡体不同部位之间的差异变形快速增强,坡面已不再表现为相对均匀的整体调整,而是逐渐形成局部集中变形。

表4 水位急剧下降与后缘拉裂萌生阶段 M3C2形变场位移统计

Table 4 Statistics on the displacement of M3C2 deformation field during the stages of abrupt decline of water level and initiation of trailing edge cracking

监测阶段	加权平均法向位移 μ (mm)	加权标准差 σ (mm)	P5~P95 位移范围(mm)	状态识别
水位初降	-6.33	19.46	[-44.73,18.92]	非均匀变形增强
骤降持续	10.27	27.08	[-29.41,73.61]	后缘变形裂缝萌生

第三阶段:水位持续下降与坡面形变加剧阶段

随着水位持续回落,坡面位移由局部离散响应转为大范围非均匀变形(图 12、图 13)。结合水位工况与已有研究,可以推测坡前约束变化、自重作用及坡体内部水分响应差异可能共同影响这一过程。

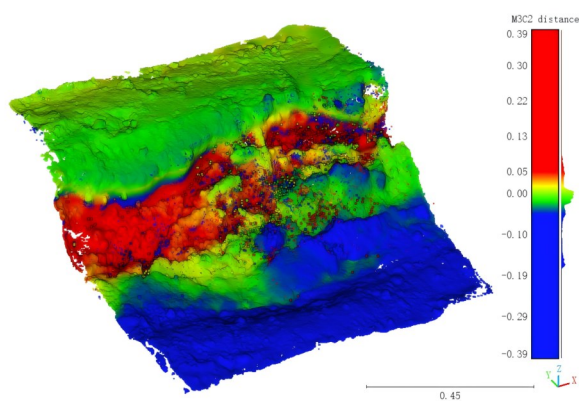


图 12 失稳加剧 M3C2 热力图热力图
Fig.12 M3C2 heatmap of intensifying instability

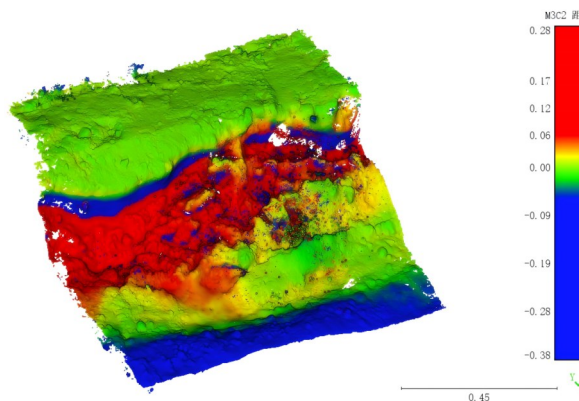


图 13 失稳启动 M3C2 热力图热力图
Fig.13 M3C2 heatmap of instability initiation

随着坡面变形进一步发展,失稳加剧与失稳启动阶段形变场位移统计结果如表 5 所示。由表 5 可知,失稳加剧阶段的加权平均法向位移为 -25.10 mm ,加权标准差为 68.85 mm ,P5~P95 位移范围为 $-164.30\sim 71.23\text{ mm}$;失稳启动阶段的加权平均法向位移转变为 8.01 mm ,加权标准差仍达 60.05 mm ,P5~P95 位移范围为 $-99.80\sim 108.96\text{ mm}$ 。加权平均法向位移的符号发生转换,且加权标准差持续高于 60 mm ,表明沿统一法向的正、负向位移区域同时发育,坡面空间非均匀性明显增强。

从几何形状看,该阶段高位移区由条带状裂缝附近逐步扩展为大面积块状沉降与隆起区,先前形成的不连续迹线继续向深部和两侧延伸,并出现错落堆积体及滑移轮廓。加权平均法向位移、加权标准差和 P5~P95 位移范围的联合变化表明,坡体已由裂缝扩展阶段转入整体结构性失稳阶段。

表 5 水位持续下降与坡面形变加剧阶段 M3C2 形变场位移统计
Table 5 The statistical results of M3C2 deformation during the stages of continued water-level decline and intensified slope deformation

监测阶段	加权平均法向位移(μmm)	加权标准差(σmm)	P5 ~ P95 位移范围(mm)	状态识别
失稳加剧	-25.10	68.85	[-164.30,71.23]	结构性变形加剧
失稳启动	8.01	60.05	[-99.80,108.96]	整体滑移启动

第四阶段:整体失稳破坏与堆积稳定阶段

M3C2 形变场进一步揭示了整体失稳破坏及整体堆积稳定阶段的空间形变特征(图 14、图 15),相对应的 M3C2 位移统计结果如表 6 所示。由表 6 可知,整体失稳破坏阶段的加权平均法向位移为 12.22 mm ,加权标准差为 61.66 mm ,P5~P95 位移范围为 $-95.31\sim 114.92\text{ mm}$,对应的区间宽度为 210.23 mm 。较大的正、负向位移同时出现,表明坡体后缘下错、中部滑移与前缘堆积等不同变形现象并存,模型岸坡已进入整体

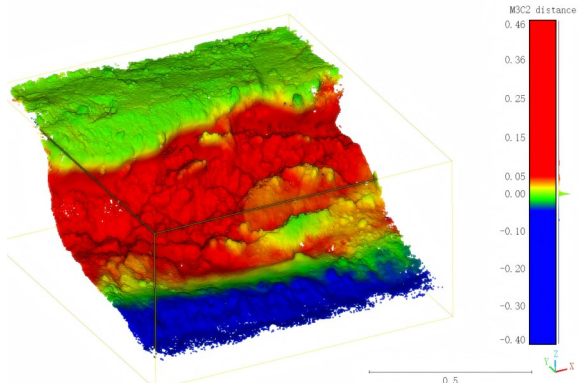


图 14 整体失稳破坏 M3C2 形变场热力图
Fig.14 M3C2 heatmap of overall instability damage

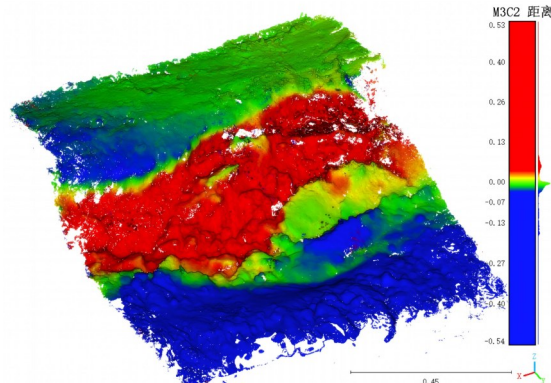


图 15 整体堆积稳定 M3C2 形变场热力图
Fig.15 M3C2 heatmap of overall accumulation stability

破坏阶段。进入坡脚堆积阶段后,加权平均法向位移转变为-20.20 mm,加权标准差增加至 74.60 mm,P5~P95 位移范围扩大至-165.94~81.65 mm,区间宽度达到 247.59 mm,为全过程最大值。该结果表明,整体滑动发生后,坡脚堆积体及局部滑动区域仍处于明显调整状态,模型表面的空间位移差异并未立即减小。综合 M3C2 形变场与模型影像可认为,该阶段主要表现为后缘下错、滑体整体移动以及坡脚堆积。

表6 整体失稳破坏与整体堆积稳定阶段 M3C2形变场位移统计

Table 6 Statistics on displacement of M3C2 deformation field during the overall instability failure and overall accumulation stability stages

监测阶段	加权平均法向位移(μ /mm)	加权标准差(σ /mm)	P5~P95 位移范围(mm)	状态识别
整体失稳破坏	12.22	61.66	[-95.31,114.92]	整体破坏滑动
坡脚堆积	-20.20	74.60	[-165.94,81.65]	坡体完全破坏

3.2.2 M3C2形变全过程定量对比

为比较各阶段的变形程度,在表3~表6统计结果的基础上,对8个监测阶段的加权平均法向位移、加权标准差和P5~P95 位移区间宽度进行汇总分析,结果见表7。其中,加权平均法向位移用于表征坡面法向位移的总体水平,加权标准差和P5~P95 位移区间宽度用于反映位移分布的空间离散程度。图中HW、DO、ED、RD、ID、II、OF 和TA 依次表示高水位蓄水、水位始降、水位初降、骤降持续、失稳加剧、失稳启动、整体失稳破坏和整体堆积稳定等阶段。

表7 M3C2 直方图全过程加权统计结果

Table 7 M3C2 histogram-weighted statistics over the complete deformation process

监测阶段	加权平均法向位移(μ /mm)	加权标准差(σ /mm)	P5(mm)	P95(mm)	P5~P95 位移区间宽度(mm)
高水位蓄水(HW)	-1.13	6.79	-9.01	5.87	14.88
水位始降(DO)	-1.50	7.66	-15.54	12.86	28.40
水位初降(ED)	-6.33	19.46	-44.73	18.92	63.65
骤降持续(RD)	10.27	27.08	-29.41	73.61	103.02
失稳加剧(ID)	-25.10	68.85	-164.30	71.23	235.53
失稳启动(II)	8.01	60.05	-99.80	108.96	208.76
整体失稳破坏(OF)	12.22	61.66	-95.31	114.92	210.23
整体堆积稳定(TA)	-20.20	74.60	-165.94	81.65	247.59

注:P5~P95 位移区间宽度为P95与P5之差。

Notes: The width of the displacement interval between P5 and P95 is the difference between P95 and P5.

高水位蓄水至水位始降阶段,位移标准差由 6.79 mm 增至 7.66 mm(图 16),P5~P95 位移区间宽度由 14.88 mm 增至 28.40 mm,整体变化较小(图 17)。进入水位初降阶段后,标准差增至 19.46 mm,位移区间宽度增至 63.64 mm。骤降持续阶段,加权平均位移由-6.33 mm 变为 10.27 mm,标准差和位移区间分别增至 27.08 mm 和 103.03 mm,表明不同区域的位移差异开始增大。失稳加剧阶段,标准差由 27.08 mm 增至

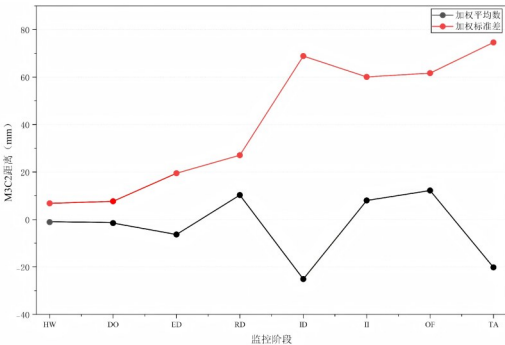


图 16 加权平均位移与标准差

Fig.16 Weighted mean displacement and standard deviation

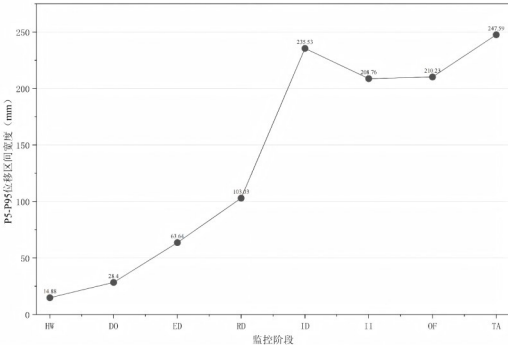


图 17 P5~P95 位移区间宽度

Fig.17 P5~P95 displacement interval width

68.85 mm,位移区间宽度由103.03 mm增至235.53 mm,是全过程变化最明显的阶段。失稳启动和整体失稳破坏阶段,标准差分别为60.05 mm和61.66 mm,位移区间宽度分别为208.76 mm和210.23 mm,仍保持较高水平。坡脚堆积阶段,标准差增至74.60 mm,位移区间宽度达到247.59 mm,为全过程最大值模型的明显形变主要出现在失稳加剧阶段,整体破坏后坡脚区域仍在继续调整。

3.3 裂缝发育网络的动态演化特征

3.3.1 裂缝萌生与形变初期

在水位由高位转入下降后的初期,坡面仅出现少量张拉裂缝和局部内凹,为进一步刻画该阶段坡面裂缝的早期发育特征,采用ImageJ对裂缝萌生期和形变初期的坡面影像进行处理,分别获得原始影像、二值化结果及裂缝骨架提取结果,如图18、图19所示。受浸润阴影和局部照度变化影响,原始影像中的暗色纹理容易与细裂缝混淆。因此裂缝识别过程中结合原始影像、二值化结果与骨架提取结果进行综合判别,以减小背景干扰对识别结果的影响。

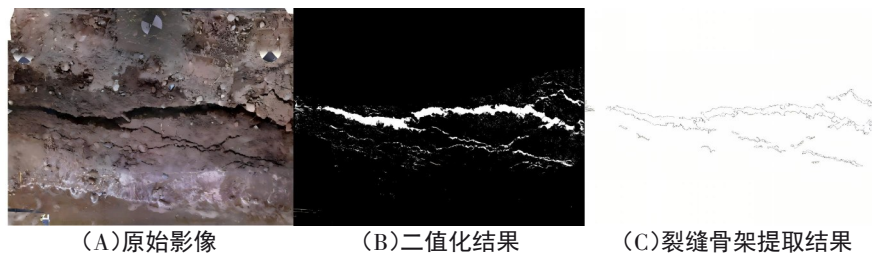


图 18 裂缝萌生期正射影像
Fig.18 Orthophoto of crack initiation

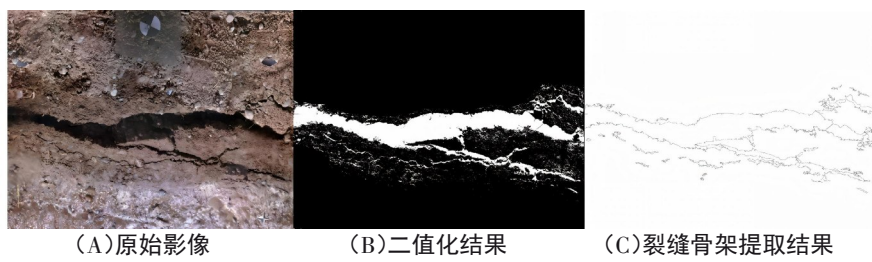


图 19 形变初期裂缝影像
Fig.19 Crack images during the initial deformation stage

同期对裂缝萌生期与形变初期的点云体积密度分布进行对比分析,其空间分布特征如图20所示。裂缝萌生期的异常区域主要呈零散分布;进入形变初期后,局部异常区域数量有所增加,并在部分裂缝发育部位附近呈现一定的聚集特征。点云体积密度的阶段性变化反映了坡面局部空间结构的调整,并与ImageJ识别得到的裂缝发育特征具有一定的空间对应关系。

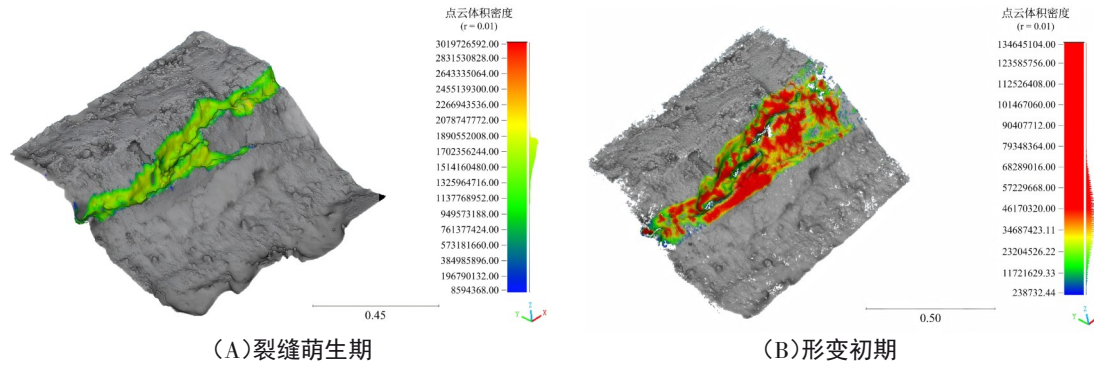


图 20 裂缝萌生与形变初期点云体积密度分布
Fig.20 Point-cloud volume density distribution during crack initiation and initial deformation

3.3.2 裂缝扩展与贯通期

进入试验中期，早期形成的微小裂缝继续向两侧延伸，相邻裂缝逐步发生汇合，坡面裂缝由零散分布逐渐发展为较为连续的裂缝网络。裂缝扩展期和持续扩展期的原始影像、二值化结果及裂缝骨架提取结果分别见图21、图22。随着裂缝不断扩展，原有裂缝长度和影响范围逐渐增大，局部出现新的分支裂缝，并与邻近裂缝发生连接。进入裂缝贯通期后，部分裂缝之间形成较为明显的连通关系，局部连续破裂带逐渐形成，其识别与提取结果见图23。同期点云体积密度分布显示(图24)，原先分散的异常区域逐步扩展并趋于集中，部分区域呈现连续的条带状分布，其异常分布范围与裂缝扩展及贯通较为显著的区域基本一致。

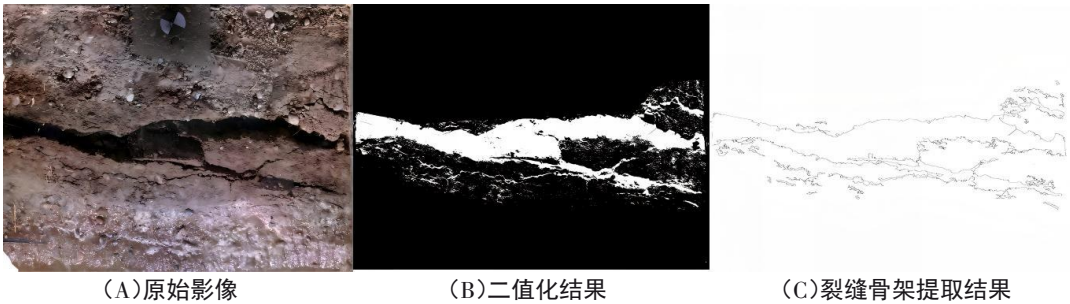


图21 裂缝扩展期正射影像
Fig.21 Orthophoto during crack propagation

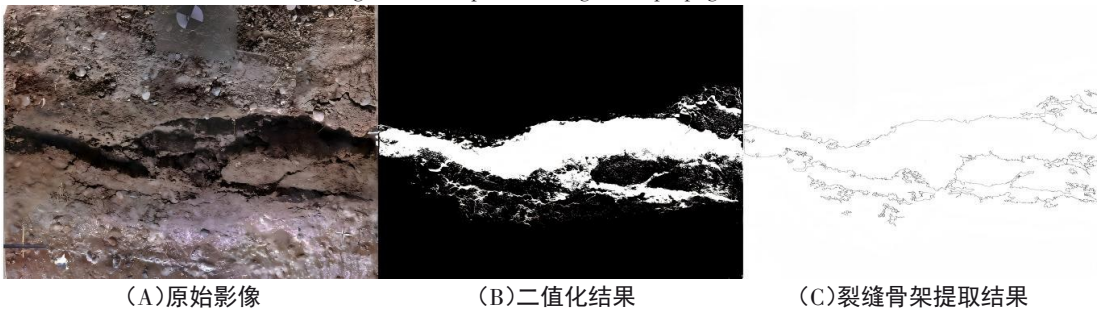


图22 裂缝持续扩展期影像
Fig.22 Images during continuous crack propagation

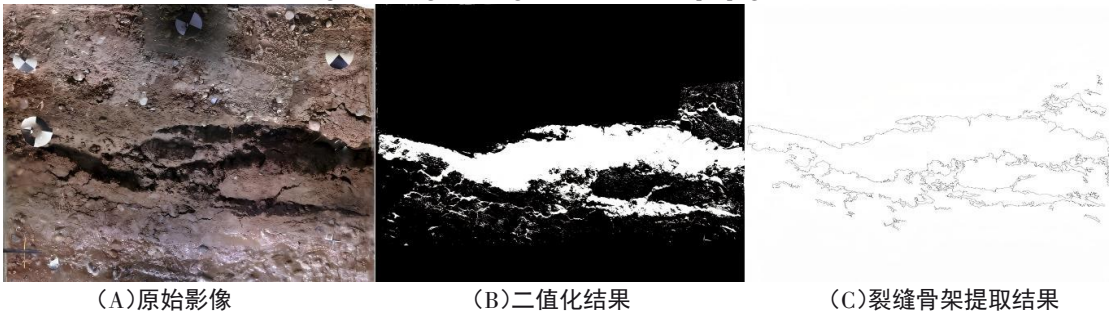


图23 裂缝贯通期影像
Fig.23 Images during crack coalescence

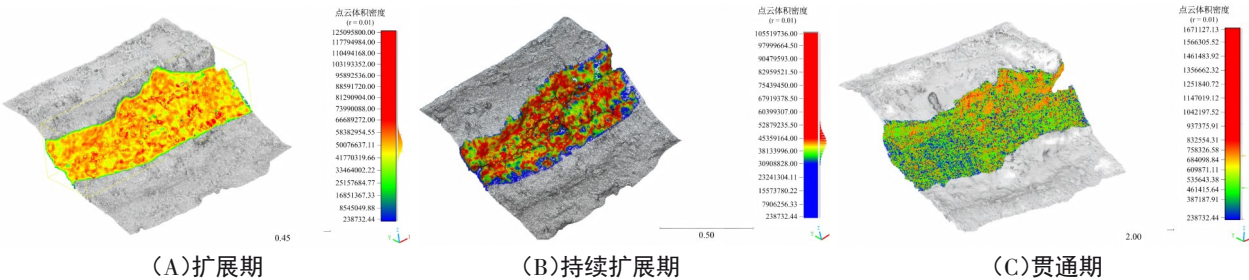


图24 裂缝扩展过程点云体积密度分布
Fig.24 Point-cloud volume density distribution during crack propagation

3.3.3 基于 ImageJ 的裂缝区域定量演化

为定量分析在不同演化阶段的的变化特征,对各个阶段的有效裂缝数、裂缝面积占比、有效连通域输及平均连通域面积等指标进行统计。ImageJ 统计结果表明(表 8),水位始降阶段的裂缝面积占比为 3.760%;水位初降阶段增至 9.364%;骤降持续阶段为 9.285%,较前一阶段仅下降 0.079 个百分点,整体变化较小。随后,裂缝面积占比由失稳加剧阶段的 10.534% 进一步增至失稳启动阶段的 11.168%。尽管相邻阶段存在小幅波动,水位始降至失稳启动阶段的裂缝面积占比总体呈增加趋势,说明坡面裂缝区域持续扩展。

表 8 ImageJ 裂缝连通域统计结果
Table 8 ImageJ statistics of thresholded crack regions

监测阶段	有效连通域数量(个)	总识别面积(mm ²)	平均连通域面积(mm ²)	裂缝面积占比(%)
水位始降	203	25 755.897	126.876	3.760
水位初降	38	24 722.090	650.581	9.364
骤降持续	69	68 480.194	992.467	9.285
失稳加剧	27	80 091.855	2 966.365	10.534
失稳启动	34	83 152.990	2 445.676	11.168

基于表 8 的统计结果,进一步对各裂缝区域指标的阶段性变化进行对比,结果如图 25 所示。水位始降阶段共识别出 203 个有效连通域,平均连通域面积仅为 126.876 mm²,说明该阶段以尺度较小、分布较为离散的裂缝区域为主。水位初降阶段,有效连通域数减少至 38 个,平均连通域面积增至 650.581 mm²,表明部分小尺度裂缝区域发生扩展与合并。骤降持续阶段,有效连通域数回升至 69 个,平均连通域面积增至 992.467 mm²,反映出已有裂缝扩展与新生离散裂缝出现可能同时存在。

失稳加剧阶段,有效连通域数由 69 个减少至 27 个,平均连通域面积由 992.467 mm²显著增加至 2 966.365 mm²,说明分散裂缝区域的合并与贯通作用明显增强。进入失稳启动阶段后,裂缝面积占比继续增加至 11.168%,有效连通域数回升至 34 个,而平均连通域面积下降至 2 445.676 mm²,可能反映主裂缝持续扩展的同时伴随新的次生裂缝或裂缝分支出现。总体而言,裂缝面积占比、有效连通域数和平均连通域面积的联合变化揭示了坡面裂缝由细小分散向扩展、合并和贯通发展的演化过程。

从水位始降到失稳启动,裂缝面积占比由 3.760% 增至 11.168%,净增 7.408 个百分点,最终值约为初始值的 2.97 倍。5 个监测节点的有效连通域数依次为 203、38、69、27 和 34 个。水位始降节点的连通域数量较多,但平均连通域面积仅为 126.876 mm²,主要由面积较小的离散区域组成;水位初降后,连通域数降至 38 个,平均连通域面积增至 650.581 mm²。骤降持续至失稳启动阶段,连通域数由 69 个降至 27 个后回升至 34 个,平均连通域面积由 992.467 mm²增至 2 966.365 mm²后回落至 2 445.676 mm²,表明裂缝区域的新生、扩展、贯通和部分塌陷同时存在。

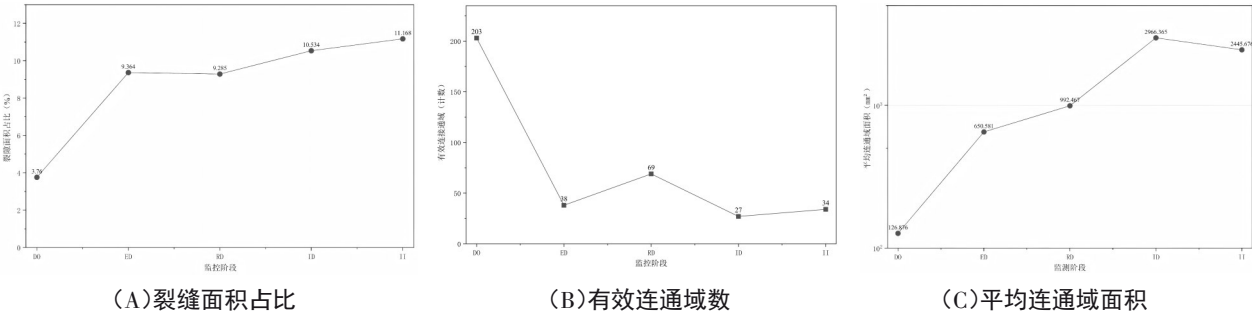


图 25 ImageJ 裂缝区域指标的阶段性变化
Fig.25 Evolution of ImageJ crack-region indices

3.4 M3C2形变场与ImageJ裂缝网络的协同检测

结合表7和表8的统计结果,在M3C2与ImageJ共同覆盖的水位始降至失稳启动5个监测阶段内,坡面位移的空间离散程度与裂缝区域扩展表现出较为一致的阶段变化。M3C2法向位移加权标准差总体由7.66 mm增至60.05 mm,P5~P95位移区间宽度总体由28.40 mm增至208.76 mm;同期裂缝面积占比由3.760%增至11.168%。上述结果表明,随着坡面位移空间离散程度的增大,裂缝发育范围呈逐步扩大趋势。

由水位始降发展至水位初降阶段,M3C2加权标准差由7.66 mm增至19.46 mm,P5~P95位移区间宽度由28.40 mm增至63.64 mm,裂缝面积占比则由3.760%增至9.364%,表明坡面非均匀变形增强并伴随裂缝区域快速扩展。骤降持续至失稳加剧阶段,加权标准差由27.08 mm增至68.85 mm,P5~P95位移区间宽度由103.03 mm增至235.53 mm;同期有效连通域数由69个减少至27个,平均连通域面积由992.467 mm²增至2 966.365 mm²,说明坡面差异变形加剧的同时,分散裂缝区域发生明显合并与贯通。

进入失稳启动阶段后,M3C2加权标准差和P5~P95位移区间宽度仍保持较高水平,裂缝面积占比继续增加,而有效连通域数小幅回升、平均连通域面积有所下降,可能反映整体变形持续发展的同时伴随新的次生裂缝产生。因此,M3C2形变场能够表征坡面整体变形的位臵、方向和离散程度,ImageJ裂缝指标能够反映表面破裂范围及连通状态,二者联合分析可从整体变形和表面破裂两个方面识别岸坡渐进破坏过程。失稳启动后的整体滑移和坡脚堆积阶段,则主要依据M3C2点云结果和同期影像中的宏观破坏形态进行分析。

4 讨论

4.1 库水位骤降诱发的“牵引式”失稳机制

基于物理模型试验、三维点云M3C2形变场及坡面裂缝演化结果,库水位骤降条件下堆积层岸坡表现出由局部变形向整体失稳逐步发展的特征。水位下降过程中,坡体外部水压力随之降低,而坡体内部水分消散具有一定的滞后性,由此可能形成不利于岸坡稳定的渗透作用。

M3C2分析结果表明,随监测阶段推进,坡体表面位移幅度及空间离散程度总体增大,且显著变形区域逐渐由坡体前部向中后部扩展。与此同时,图像识别结果显示,裂缝面积占比总体增加,有效连通域数量总体减少,而平均连通域面积明显增大,反映出坡面裂缝由细小、分散状态向扩展、合并和贯通状态演化。特别是在RD-ID阶段,有效连通域数量由69个减少至27个,平均连通域面积由992.467 mm²增至2 966.365 mm²,表明该阶段裂缝聚合与贯通作用最为显著。

综合位臵场与裂缝演化特征可认为,模型岸坡的破坏过程具有明显的渐进性,水位骤降首先引起坡脚及临水侧变形,随后变形逐渐向坡体中后部传递,并伴随坡面裂缝扩展与贯通,最终形成整体滑移趋势,该现象与牵引式滑坡由前缘变形向后部逐步发展的基本特征相符^[20]。

4.2 点云-图像多源监测结果的互证关系

三维点云与正射影像分别从整体变形和表面破裂两个角度记录了岸坡演化过程。M3C2距离反映模型表面的法向位移及其空间分布,ImageJ提取的裂缝面积占比、有效连通域数量和平均连通域面积则反映坡面裂缝的发育规模与连通状态。两类数据虽然表征对象不同,但其阶段性变化表现出较好的对应关系。

在试验前期,坡面位移及裂缝面积占比相对较小,模型主要表现为局部调整和细小裂缝萌生。随水位持续下降,M3C2位移离散程度增大,裂缝面积占比同步增加;RD-ID阶段平均连通域面积显著增大、连

通域数量明显减少,表明分散裂缝发生扩展和合并,与点云结果中显著变形区扩展的现象相对应。ID-II阶段裂缝面积占比继续增加,但平均连通域面积略有下降、连通域数量小幅回升,可能与新生次级裂缝及裂缝分叉有关。因此,M3C2形变场能够识别坡体整体变形的的位置与幅度,图像裂缝指标能够描述表面损伤的几何演化,二者结合可降低单一监测结果解释的不确定性,并提高对岸坡渐进破坏阶段的识别能力。

4.3 基于演化特征的预警判据与防治策略建议

本试验结果表明,库水位下降过程中岸坡位移与坡面裂缝具有较为明显的阶段性演化特征。M3C2法向位移加权标准差和P5~P95位移区间宽度能够反映坡面变形的空间离散程度,裂缝面积占比、有效连通域数量和平均连通域面积则能够表征坡面裂缝的发育规模及连通状态。因此,在类似堆积层岸坡的监测中,可将库水位变化过程、坡面三维位移及裂缝几何特征结合起来,对岸坡变形状态进行综合识别。

从本试验的阶段性变化来看,当坡面显著变形区域由坡脚及临水侧逐渐向坡体中后部扩展,M3C2法向位移加权标准差和P5~P95位移区间宽度明显增大,同时出现裂缝面积占比增加、有效连通域数量减少和平均连通域面积增大的现象,表明坡面变形的非均匀性增强,分散裂缝可能正在发生扩展、合并与贯通。工程监测中若出现上述多项指标同步变化,应适当提高监测频率,并加强对坡体中后部、坡脚及已有裂缝集中区域的巡查。需要说明的是,本研究仅开展了单组缩尺物理模型试验,尚不足以确定具有普遍适用性的预警阈值,相关指标主要用于识别岸坡表面变形不同阶段的相对变化情况,具体判定标准仍需结合现场长期监测资料进行验证。

在工程防治方面,库水位下降可能导致坡体内外水力条件不同步,进而对岸坡稳定产生不利影响^[21]。因此,在实际治理中可重点关注坡体排水条件和坡脚稳定性。在地质条件允许的情况下,可通过设置水平排水孔、完善坡面排水系统等措施改善坡体排水条件;对于坡脚及临水侧变形较为集中的部位,可结合压重、支挡和坡面防护等措施提高局部稳定性^[22]。由于本试验未直接监测孔隙水压力,也未对不同工程措施的治理效果进行对比,上述措施为基于试验现象提出的工程启示,具体方案仍需结合现场水文地质条件、岸坡结构特征及稳定性计算结果进行确定。

5 结论

本研究以雅鲁藏布江典型堆积层岸坡为研究对象,开展库水位骤降条件下的物理模型试验,结合近景摄影测量、三维点云M3C2分析和数字图像裂缝识别,对岸坡表面变形及裂缝演化过程进行了研究。主要结论如下:

(1)库水位骤降条件下,模型岸坡表现出明显的渐进变形特征。坡体变形首先在坡脚及临水侧出现,随后显著变形区域逐渐向坡体中后部扩展,并伴随坡面裂缝萌生、扩展和贯通。该演化过程总体表现出由前缘局部变形向后部逐步发展的牵引式破坏特征。

(2)M3C2分析能够定量识别岸坡表面位移的阶段性变化与空间差异。随监测阶段推进,位移幅度及空间离散程度总体增大,表明坡体变形由局部调整逐渐向整体不协调变形发展。结合95%置信水平下的探测限,可以判别点云变化是否超过粗糙度与配准误差造成的不确定范围。

(3)坡面裂缝整体呈现由细小分散向扩展、合并和贯通发展的规律。裂缝面积占比由DO阶段的3.760%增加至II阶段的11.168%;有效连通域数量总体减少,而平均连通域面积明显增大。RD-ID阶段连通域数量由69个减少至27个,平均连通域面积由992.467 mm²增加至2 966.365 mm²,表明该阶段裂缝聚合与贯通作用最为显著。

(4)三维点云M3C2形变场与图像裂缝指标具有较好的阶段对应关系。点云数据能够表征坡体整体

变形的的位置与幅度,图像数据能够反映表面裂缝的发育规模和连通状态,二者联合分析能够更完整地识别岸坡由局部变形向整体破坏发展的过程。

(5)试验结果表明,库区岸坡监测可综合考虑库水位变化过程、坡面三维位移的空间离散程度及裂缝连通特征。M3C2法向位移加权标准差和P5~P95位移区间宽度的增大,以及裂缝面积占比和平均连通域面积的增加,可作为识别岸坡变形加剧的重要参考。在工程治理中,应重点关注坡体排水条件以及坡脚、临水侧和裂缝集中区域的稳定性,但相关监测阈值和具体治理方案仍需结合现场长期监测、水文地质条件及稳定性分析进一步确定。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 张根,杨成业,叶唐进.丘陵地貌边坡危岩块体稳定性分析[J].高原科学研究,2019,3(1):44-52.
- [3] 殷跃平.汶川八级地震地质灾害研究[J].工程地质学报,2008,16(4):433-444.
- [4] 许强.滑坡的变形破坏行为与内在机理[J].工程地质学报,2012,20(2):145-151.
- [5] Simon A, Curini A, Darby S E, et al. Bank and near-bank processes in an incised channel[J]. *Geomorphology*, 2000, 35(3-4): 193-217.
- [6] Niethammer U, James M R, Rothmund S, et al. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results [J]. *Engineering Geology*, 2012, 128: 2-11.
- [7] Rossi G, Tanteri L, Tofani V, et al. Multitemporal UAV surveys for landslide mapping and characterization[J]. *Landslides*, 2018, 15(5):1045-1052.
- [8] Stumpf A, Malet J P, Kerle N, et al. Image-based mapping of surface fissures for the investigation of landslide dynamics[J]. *Geomorphology*, 2013, 186: 12-27.
- [9] Pinyol N M, Alonso E E, Olivella S. Rapid drawdown in slopes and embankments[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(5): W00D03.
- [10] Rinaldi M, Casagli N, Dapporto S, et al. Monitoring and modelling of pore water pressure changes and riverbank stability during flow events[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2004, 29(2): 237-254.
- [11] 卢书强,易庆林,易武,等.三峡库区树坪滑坡变形失稳机制分析[J].岩土力学,2014,35(4):1123-1130.
- [12] 《工程地质手册》编委会.工程地质手册[M].5版.北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [13] 郑颖人,陈祖煜,王恭先,等.边坡与滑坡工程治理[M].3版.北京:人民交通出版社,2022.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑边坡工程技术规范:GB 50330—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [15] Morgenstern N R, Price V E. The analysis of the stability of general slip surfaces[J]. *Géotechnique*, 1965, 15(1):79-93.
- [16] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 239-256.
- [17] Lague D, Brodu N, Leroux J. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z)[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 82: 10-26.
- [18] Schneider C A, Rasband W S, Eliceiri K W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis[J]. *Nature Methods*, 2012,9(7): 671-675.
- [19] Liu C, Tang C S, Shi B, Suo W B. Automatic quantification of crack patterns by image processing[J]. *Computers & Geosciences*, 2013, 57: 77-80.
- [20] 苗发盛,吴益平,谢媛华,等.水位升降条件下牵引式滑坡离心模型试验[J].岩土力学,2018,39(2):605-613.

[21] Huang D, Gu D M, Song Y X, et al. Towards a complete understanding of the triggering mechanism of a large reactivated landslide in the Three Gorges Reservoir[J]. *Engineering Geology*, 2018, 238: 36–51.

[22] Zhang C, Yin Y, Yan H, et al. Centrifuge modeling of unreinforced and multi-row stabilizing piles reinforced landslides subjected to reservoir water level fluctuation[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024, 16(5):1600–1614.

Experimental Study on the Mechanism of Yarlung Tsangpo River Bank Slope Instability Induced by Reservoir Water Level Fluctuation Based on Point Cloud and Image Processing

WANG Zhaosen^{1,2} ZHANG Gen^{1,2,3} YU Wenkang^{1,2} AN Yang^{*1} XIANG Qiyuan^{1,2}

(1.Engineering College, Xizang University, Lhasa 850000, China;

2.Plateau Major Infrastructure Smart Construction and Resilience Safety Technology Innovation Center, Lhasa 850000, China;

3.School of Ecology and Environment, Xizang University, Lhasa 850000, China)

Abstract: To investigate the progressive deformation and failure characteristics of accumulation-layer bank slopes under conditions of rapid reservoir drawdown, physical model tests were conducted using a typical accumulation-layer bank slope along the Yarlung Tsangpo River as a prototype. To comprehensively analyze the surface deformation and crack evolution processes of the bank slope, a close-range photogrammetric automatic data acquisition system was developed, and an M3C2 point-cloud comparison algorithm was employed to obtain the normal displacements of the slope surface at different monitoring stages. Moreover, ImageJ was used to extract the proportion of crack area, the number of effective connected components, and the average connected-component area. The results show that, as the reservoir water level declined, areas of high deformation on the slope surface gradually expanded from the slope toe and the water-facing side toward the middle and rear parts of the slope. The model bank slope exhibits progressive failure characteristics, evolving a transition from localized deformation to global sliding. The M3C2 statistical results indicate that the weighted standard deviation of normal displacement generally increased from 6.79 mm to 74.60 mm. In comparison, the width of the P5–P95 displacement interval generally increased from 14.88 mm to 247.59 mm, with the spatial dispersion of displacement increasing most significantly during the stage of intensifying instability. From the initial drop in water level to the onset of instability, the crack area ratio generally increased from 3.760% to 11.168%; however, the number of effective connected components generally decreased and the average connected-component area increased significantly, indicating that surface cracks evolved from a fine and dispersed state toward expansion, coalescence, and breakthrough. The M3C2 deformation indicators and image-based crack indicators show a good correspondence in terms of stage-wise changes. A combined analysis of the two can identify the progressive failure process of the bank slope from the perspectives of overall deformation and surface fracturing.

Keywords: slope stability, reservoir water level changes, point cloud ranging, image processing, crack extraction; physical model

[责任编辑:张建伟]