

DOI: 10.11779/CJGE20240742

滑坡堰塞体材料空间变异性研究的试验方法

郭万里¹, 蔡正银¹, 简富献^{*2,3,4}

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 重庆市城投路桥管理有限公司, 重庆 400023; 3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 4. 重庆市市政设施运行保障中心, 重庆 400015)

摘要: 滑坡堰塞体组成物质杂乱, 颗粒分选显著, 空间结构复杂, 具有典型的空间变异特征, 易在水流冲刷下形成溃坝洪水灾害。如何定量研究滑坡堰塞体孔隙比和级配等参量的空间分布特征是亟待解决的基础问题。在物理模型试验中引入了三维运动结构逆向重构技术(SfM), 融合分块取样法, 提出了滑坡堰塞体有序离散分块设计、图像采集和材料空间变异特征场量化分析等成套试验方法。基于该套方法开展了试验验证与应用, 结果初步表明: 滑坡堰塞体材料的颗粒级配与孔隙比在三维空间均存在显著的变异性; 所提出的试验方法获取了孔隙比与级配组成的分布数据, 赋予滑坡堰塞体材料空间分布信息属性, 为量化宽级配堰塞体堆积形态和空间变异性奠定了数据基础和方法途径。

关键词: 滑坡堰塞体; 堆积结构特征; 图像重构; 空间变异; 离散分块取样

中图分类号: TU42

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)10-2076-10

作者简介: 郭万里(1990—), 男, 高级工程师, 主要从事土体基本性质及本构关系、土石坝工程研究。E-mail: wlguo@nhri.cn。

Test method for studying spatial variability of landslide dam materials

GUO Wanli¹, CAI Zhengyin¹, JIAN Fuxian^{*2,3,4}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Chongqing Chengtou Road and Bridge Administration Co., Ltd., Chongqing 400023, China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 4. Chongqing Municipal Operation Support Center, Chongqing 400015, China)

Abstract: Landslide dams exhibit typical spatial variation characteristics, with disordered composition, significant particle sorting, and complex spatial structures, making them prone to dam-break flood disasters under the scouring action of water flow. How to quantitatively investigate the spatial distribution characteristics of parameters such as void ratio and gradation of landslide dams is a fundamental problem that urgently needs to be addressed. In physical model tests, Structure-from-Motion (SfM), a three-dimensional reverse reconstruction technology, is introduced, and the discrete block sampling method is simultaneously integrated. A comprehensive methodology is proposed for landslide dams, encompassing orderly discrete block design, image acquisition, and quantitative analysis of the material spatial variation characteristic field. Subsequently, experimental validation and application are conducted based on this methodology. The test results reveal that both particle size distribution and void ratio exhibit significant variability in three-dimensional space for landslide dam materials. The proposed methodology obtains data on the distribution of void ratio and gradation compositions, endowing landslide materials with spatial distribution information properties. This lays a data foundation and provides a methodological approach for quantifying the accumulation form and spatial variability of wide-graded landslide dams.

Key words: landslide dam; depositional characteristics; image reconstruction; spatial variability; discrete block sampling

0 引言

堰塞体是由于天然土石材料在内外动力地质作用

下迅速形成的堆积物横向阻塞过流通道, 导致上游段雍水而形成的一种天然土石堤坝; 受自然地理区位、

基金项目: 国家自然科学基金-长江水科学研究联合基金项目(U2040221); 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y324001) This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.U2040221) and the Fund on Basic Scientific Research Project of Nonprofit Central Research Institutions (Grant No.Y321001).

收稿日期(Received): 2024-07-29

修回日期(Revised): 2024-12-16

接受日期(Accepted): 2024-12-18

网络出版日期(Online): 2024-12-19

*通信作者(E-mail: fuxian_jian@126.com)

地形地貌、地质构造及气象水文等综合影响, 长江上游地区因滑坡所成的堰塞体呈易发、多发与频发的态势^[1]。形成滑坡堰塞体的土石材料未经压实, 物质组成松散、结构堆积松垮, 局部存在由大颗粒组成的高渗透区域^[2], 其力学和抗渗性能较差, 极易发生溃决, 对下游沿岸居民生产生活和基础设施构成巨大威胁^[3]。因此, 揭示滑坡堰塞体堆积特征对研判坝体稳定性和探究溃决机理均具有重要学术和工程意义。

滑坡堰塞体堆积特征包括外部几何形态与内部颗粒分布两方面^[4], 前者以坝高、坝长、坡比和体积等参数量化, 后者因散粒材料复杂性而缺乏数据表征, 还处于描述概化阶段。Coli 等^[5]依据踏勘断面出露信息来判断堰塞体内部土石颗粒空间分布, 石振明等^[6]将红石河堰塞体概化为自然堆积的简单分层。Shi 等^[7]将唐家山堰塞体整体概化为三层水平结构, 并指出各层颗粒粒径级配曲线存在显著差异性; Mei 等^[8]将土质、土含大块石、大块石含土和大块石 4 种物质组成概化为坝体内部水平分层结构, 用于评估堰塞体的冲刷特性、寿命及稳定性。值得注意的是, 堰塞体堆积特征是与其形成过程密切相关, 其内部颗粒堆积结构的非均匀特征同样被视为竖向与水平非均质堆积特征^[9]。由此可见, 现有研究多将坝体概化为分层状态, 对堰塞体内部特征还局限于定性描述, 用不完整的信息来阐述堰塞体的空间堆积特征是不够充分的。

滑坡堰塞体本质是土石颗粒堆积体, 级配和孔隙比是影响土体物理力学性质的关键指标; 前者可通过钻孔或凿槽取样等方法确定颗粒粒度组成, 后者因颗粒相互镶嵌等影响而难以进行量化, 尤其是粗粒类材料^[10-13]。堰塞体一旦形成, 极易发生溃决, 50%存在时间小于 10 d; 加之地形、通信与天气限制, 相关测量设备来不及使用, 难以采集到坝体内部颗粒级配与孔隙比分布的详细数据^[14]。由于很难及时获得现场数据, 模型试验成为再现滑坡堰塞体形成全过程的重要手段; 但目前未能提出切实有效方法来实现坝体有序离散、并数据化处理的目的, 这造成了非均质材料内部颗粒分布的量化分析缺乏基础数据^[15-17]。

计算机视觉理论中, 凭借多目相机拍摄的多幅图像能够重构出具有高度非线性曲面轮廓的复杂空间几何体^[18]。受此启发, 笔者依据土体三相物质组成, 将坝体分块孔隙比测量转换为求解其所占据的空间体积。因此, 依托自主设计的滑坡堰塞体形成全过程物理模型试验装置, 融合三维运动结构逆向重构技术 (structure from motion, 简称 SfM) 与分块取样, 提

出滑坡堰塞体堆积特征数据化方法, 获取堆积体的空间几何特征、内部孔隙比与颗粒级配的基础数据, 其赋予了该类数据空间位置属性。基于变异函数理论, 对带位置属性的孔隙比与级配开展空间场量化分析, 揭示滑坡堰塞体材料空间变异特征, 为堰塞体灾害的理论研究、风险评估与应急处置提供依据。

1 试验方法的总体思路

1.1 堆积特征数据化方法

融合 SfM 与有序离散分块取样, 提出一种量化散粒材料堆积体外部几何形态、内部孔隙比与级配的堆积特征数据化方法。结合图 1, 详细阐述该方法实施步骤, 具体为:

(1) 当滑源物料运动堆积稳定后, 根据滑坡堰塞体堆积形态和物料最大颗粒粒径 d_{\max} , 离散分割体的最小几何尺寸(高度、长度或宽度)不宜小于 2 倍 d_{\max} ; 根据堰塞体高度、长度和宽度等堆积特征, 确定离散取样的方向(如面向堆积体时从左侧至右侧), 制定有序离散的层数(高度 Z 方向)、列数(长度 X 方向)与行数(宽度 Y 方向)(见图 2), 并统计出堰塞体离散总数目。

(2) 利用数码相机按 SfM 对图像要求进行滑坡堰塞体表面信息拍摄, 利用所获取多张图像进行坝体堆积特征的三维运动结构逆向重构, 等比例建立堰塞体初始表面轮廓。因坝体处于未扰动状态, 此表面轮廓即为滑坡堰塞体堆积表面, 用作提取坝体典型横、纵等特征剖面线。

(3) 依据分区次序, 确定分块取样范围, 利用小钢铲等弱扰动性工具取出第 1 次分区内既定颗粒。在边界上不可避免存在大颗粒交错, 则需进行大颗粒归属判定^[10], 操作为: 在分割界面上预留 $1/3d_{\max}$ 厚度的保护层; 采用少量多次的方法移除保护层内大颗粒周围粒状颗粒; 采用轻微拨动方式初步判定大颗粒外露体积与嵌入体积相对大小, 移除外露体积占主体的大颗粒, 保留嵌入体积占据主体的大颗粒, 直至保护层内颗粒被完全取出。待分区内所有颗粒取出, 即进行第 1 次移除土体的质量与级配测定(质量通过称重确定, 级配通过振动筛分确定)。

(4) 再次进行步骤(2)的操作, 此时将建立第 1 次取样后堆积体的表面轮廓; 用初始表面轮廓与第 1 次取样后的表面轮廓进行布尔差值处理, 将得到第 1 次移除土体的闭合空间几何体。随之, 利用软件计算出第 1 次取样分块的几何参数, 如体积和形心坐标等。

(5) 依据土体的三相物质组成, 利用空间几何体

的体积与质量数据,计算出滑坡堰塞体第 1 次取样分块形心处的孔隙比数据。

(6) 重复上述步骤,便能将坝体按照分区分块作整体有序离散,并获取所有离散分块形心位置的孔隙比、级配组成、质量和几何坐标等重要数据,从而实现滑坡堰塞体堆积特征数据化的目的。

1.2 SfM 技术

SfM 是一种能够从连续多张图像或视频序列中识别相机位姿和恢复重建场景的三维结构图形识别与逆向建模技术,属于单目视觉重建方法。它需要在图像中提取特征点集,并在连续若干张图像中进行特征匹配,以此来恢复相机的空间位置信息;再利用三角定位测量原理、姿态估计和光束平差优化算法来进行增量式重建,随之生成重建对象的稀疏点云和相机姿态。

稀疏点云仅能显示重建的结构粗略轮廓,难以描述细部堆积特征。基于 SfM 的稀疏点云,采用多目立体视觉技术 (multi-view stereo, 简称 MVS) 在已知相机参数条件下进行多视角深度图估计、优化和融合,并生成三维稠密点云模型,还原重建结构的细部堆积特征。因此,运动结构逆向重构的思路是将两项技术融合配套使用,以达到空间结构重构精细化的效果。本文所述 SfM 均指基于 MVS 的 SfM,其架构见图 3。

在拍摄滑坡堰塞体堆积图像时,优先设定重建空间的坐标系原点及方向、拍摄坐标控制点和谷坡标志点,以定位图像拍摄方位和重建比例。若有条件,建议在河谷顶部宜配置横向与纵向导轨,便于图像采集,相关步骤和注意事项如下:

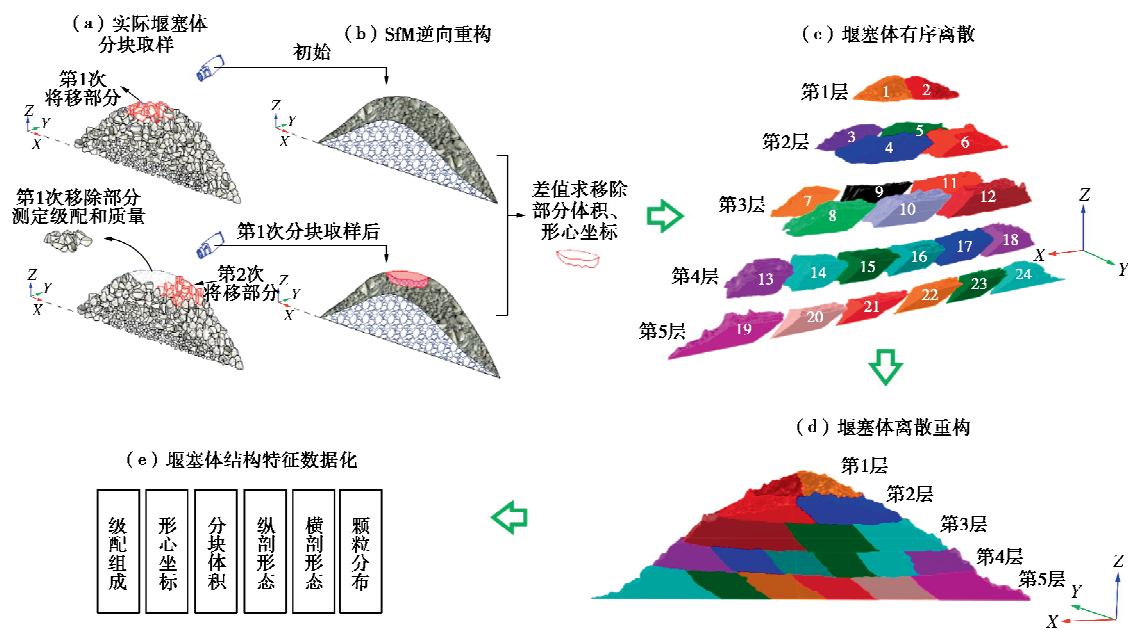


图 1 滑坡堰塞体堆积特征数据化方法

Fig. 1 Datafication method process of depositional characteristics

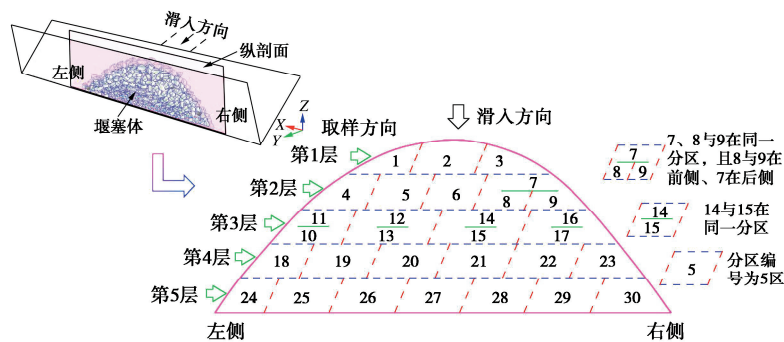


图 2 滑坡堰塞体分块次序

Fig. 2 Orderly discrete zoning of landslide dam

(1) 在凸型导轨首端处安装横向导轨, 将数码相机固定于靠近凸型导轨侧的横向导轨上, 调整数码相机拍摄角度、画质、光圈等参数。预先拍摄一些图像, 查看环境是否有镜面反射、光线是否过强或不足, 以便及时调整。

(2) 移动横向导轨至控制点处并锁定, 打开数码相机, 拍摄堰塞体表面图像, 调整镜头方向继续拍摄, 从相对相似角度对单个控制点拍摄 2~4 张。根据所用相机视角宽度, 合理安排控制点数目, 让同一控制点出现在至少 3 张图片中, 所拍摄单张图像至少包含 5 个标志点位置, 且相邻图像间重叠部分宜占据整张图幅的 1/3。

(3) 当横向导轨滑至凸型导轨末端时, 将数码相机调换至靠近另一侧凸型导轨, 并将其固定于横向导轨, 随之滑动横向导轨按步骤 (2) 继续拍摄图像。

(4) 将所有图像传输至计算机, 依据控制点次序, 按拍摄顺序依次筛选画质、光线、清晰度较好的图像作为该位置逆向重建所需源图像。

(5) 图像准备完毕后, 使用 SfM 从图像中提取的特征点对, 并逆向构建出滑坡堰塞体完整的三维表面。

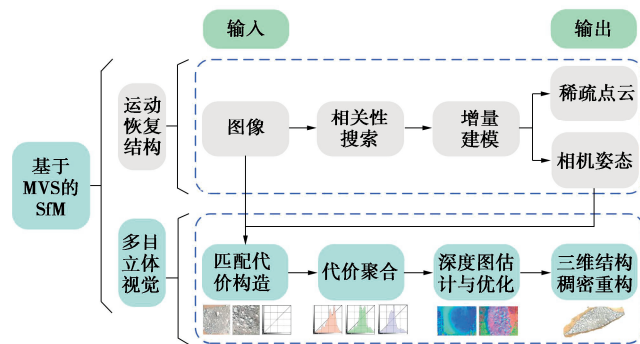


图 3 基于 MVS 的 SfM 流程架构

Fig. 3 Technology architecture of SfM based on MVS

1.3 数据的场量化方法

根据图 1 中的试验步骤, 依次确定坝体各分块的土体物理指标及块体形心的三维空间坐标。以三维坐标 x_1, x_2 和 x_3 为自变量的随机函数 $Z(x_1, x_2, x_3, \omega)$ 称为指标 ω 的区域化变量 $Z(x)$, 满足二阶平稳和内蕴假设, 用变异函数理论求解计算 $Z(x)$ 。假设距数据点 x 为 h 处有另一数据点 $(x+h)$, 称 $(x, x+h)$ 为一个数据点对。将 $Z(x)$ 在数据点对 $(x, x+h)$ 处差值的方差之半称为 $Z(x)$ 在 x 方向上的变异函数 $\gamma(x, h)$, 记为 $\gamma(h)$, 则:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中: $N(h)$ 为间隔 h 的数据对数目; x_i 为第 i 个数据点。

$\gamma(h)$ 随 h 的变化曲线为变异函数曲线, 用以表征

$Z(x)$ 在不同方向上空间变异 (相关性) 和各向异性的强弱程度。 $Z(x)$ 在小尺度时, $\gamma(h)$ 表现出内在微结构随机性, 其程度用 C_0 表示; 在中尺度时, $\gamma(h)$ 在距离 h_0 内表现出结构性变异, 变化最大幅度为数据点对的方差 (σ^2); 在大尺度上 $\gamma(h)$ 为空间无关性, 见图 4。若各坐标轴方向上的 σ^2 不完全相等, 则 $Z(x)$ 表现出各向异性, 且 σ^2 越大, 各向异性程度越显著。

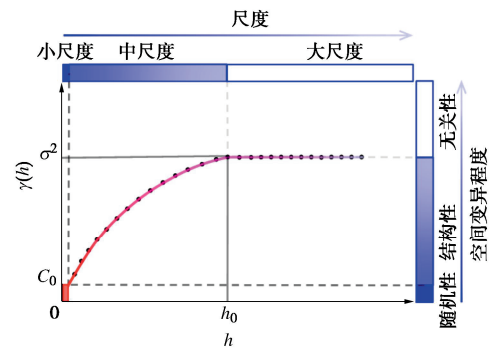


图 4 变异函数曲线

Fig. 4 Variation function curve

中心为 x 待估计区段 V_G 的估计量为 $Z^*(x)$ 。构造求解函数, 利用估计方差最优、无偏估计的条件, 得到 $Z^*(x)$ 的泛 Kriging 方程组, 见式 (2)。求解泛 Kriging 方程组, 得到插值权重系数 ρ_i 值。

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^{N(h)} \rho_j C(Z(x_i), Z(x_j)) - \sum_{l=0}^k \mu_l f_l(Z(x_i)) &= 0, (i=1, 2, \dots, N(h)), \\ \sum_{l=0}^k \rho_l f_l(Z(x_i)) &= f_l(Z(x)), (l=0, 1, 2, \dots, k) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $C(Z(x_i), Z(x_j))$ 为待估区域 V_G 内 $Z(x)$ 的所有点对的协方差函数值; $f_l(x)$ 为已知函数形式, 如 k 次多项式; ρ_i 为插值权重系数; μ_l 为拉格朗日乘子。

利用式 (3) 进行空间点 x 处 $Z^*(x)$ 的空间插值, 即

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^{N(h)} \rho_i Z(x_i) \quad (3)$$

融合区域化变量随机性和结构性, 泛 Kriging 空间插值将区域化变量空间分布的“点特征”无偏地拓展至“场特征”。因此, 变异函数理论不仅表征了空间点对之间相关性, 还是区域化变量“点特性”向“场特性”转换与应用的重要桥梁。

2 试验方法的验证与应用

2.1 试验设计

设计一套堰塞体材料斜坡运动与河谷堆积的试验装置, 由滑坡运动模拟和河谷沉积模拟两模块、通过中部铰连接组成, 总长为 6.0 m、宽为 2.6 m、高为 5.0

m, 呈倒“T”形, 能进行滑源物质堆积、颗粒斜坡运动、河谷沉积的堰塞体形成全过程试验。在左、右谷板上顺谷(X)向间隔 15.0 cm、沿谷坡向间隔 14.5 cm 的交点处设置标志点(共计 136 个), 以供逆向建模定位(见图 5)。谷框架顶部在顺河向固定配置两根钢质凸型导轨, 并以 5 cm 间隔设置控制点坐标, 便于后期三维运动结构逆向建模的坐标定位。设定右手坐标系 XYZ, X、Y 和 Z 向分别为堰塞体宽度、长度与高度方向, 置料箱活动挡板至斜坡出口的距离为滑距, 试验初始参数为: 滑距 2.7 m、边坡角 36°、谷坡角 60°。

堰塞料为不易破碎的花岗岩颗粒料, 颗粒相对质量密度为 2.81。为减少细颗粒在试验过程中以灰尘形式损失和对摄录效果影响、并考虑到滑槽底板宽度限制, 设定堰塞料粒径范围为 0.5~60 mm, 各粒组含量百分比为: 0.5~1 mm 占 28%, 1~2 mm 占 15%, 2~5 mm 占 15%, 5~10 mm 占 14%, 10~20 mm 占 13%, 20~40 mm 占 13%, 40~60 mm 占 5%。单次堰塞料总质量为 150.0 kg, 分 4 次拌匀后装入置料箱, 拟填筑 30 cm 高, 土料初始总体积、平均密度和孔隙比分别为 $8.40 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 1.79 g/cm^3 和 0.570。

箱型槽顶面架设摄像机, 根据拍摄角度、位置、光线及数量等 SfM 技术要点, 在控制点位处进行堰塞体表面图像采集。表面图像信息采集完毕后, 按分块取样方法对堆积体分割取样。对单次取出颗粒料, 装入带有取样编号的塑料袋, 并做好取样次序和次数等相关记录。重复上述步骤, 直至堆积体被全部有序分

割离散、分区取出。

2.2 模型重构

试验完成后, 即进行滑坡堰塞体坝体离散分块与模型重建, 具体细分为图像信息采集、点云及网格生成、分割体逐块重建、网格组装和空间体重建 5 个步骤; 其中, 图像信息采集已在试验过程中完成, 其它步骤流程见图 6。详细技术要点为:

(1) 图像信息采集。堰塞料河谷沉积稳定后, 根据 SfM 技术要点在不同控制点连续拍摄堆积体表面图像信息, 随后按分块取样方法进行坝体分割, 每次取样后都将进行表面图像采集。先拍摄, 后分割坝体, 直到完成最后一次取样。此次试验对滑坡堰塞体共进行 24 次分块离散, 总计获取 830 张有序图像。

(2) 点云及网格生成。将获取带有标志点坐标信息的图像信息按次序排列, 采用 SfM 进行稀疏及稠密建模。经过坐标位姿调整和多源数据聚合后, 将得到第 1 次取样前后进行深度融合与稠密重建的点云及其 Delauney 三角形网格。

(3) 分割体逐块重建。经过初始点云及网格重建, 为保障重建结果更加精准, 通常将 2~5 张初始图像置于后续的网格重建过程。通过后续点云和网格重建, 将得到不同次数下取样前后坝体的表面点云和网格。

(4) 网格组装。根据 24 次分割图像重建得到包括河谷在内 25 个带有坐标的点云及网格, 利用网格处理软件(如 Meshlab、Rhino 或 Hypermesh 等)对点云和网格进行编辑和组装, 形成堰塞体空间分割面。

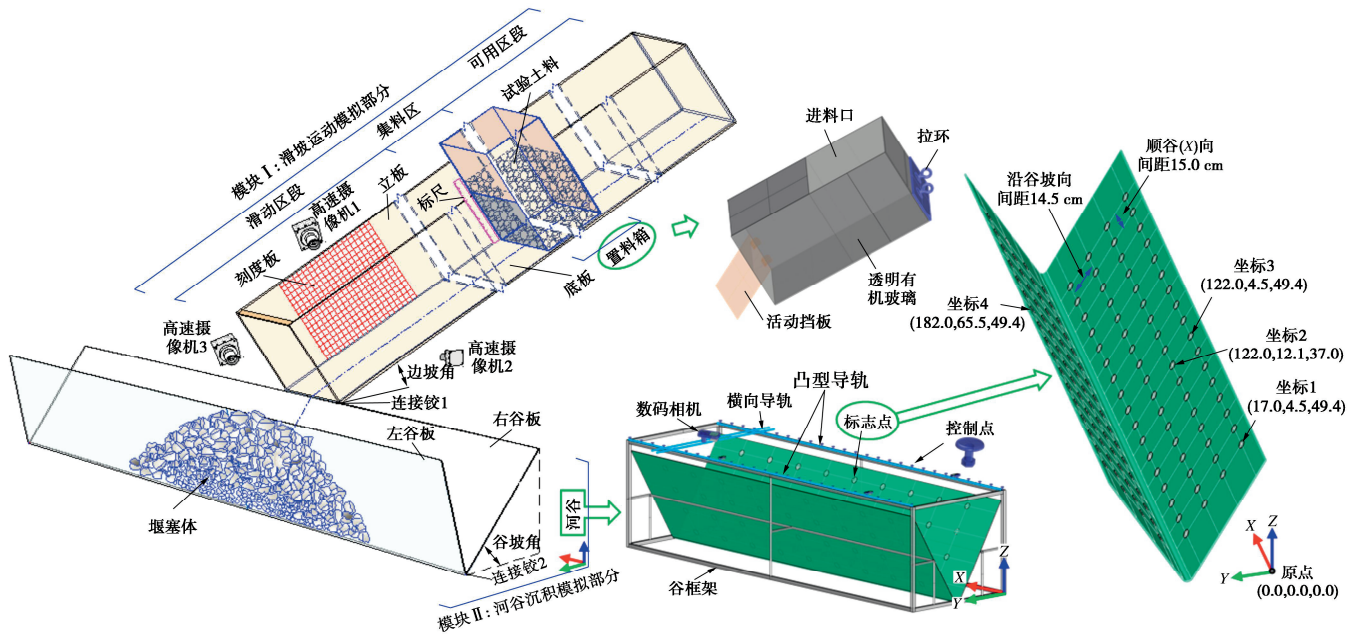


图 5 滑坡堰塞体形成全过程物理模型试验装置

Fig. 5 Physical model device for whole formation process of landslide dam

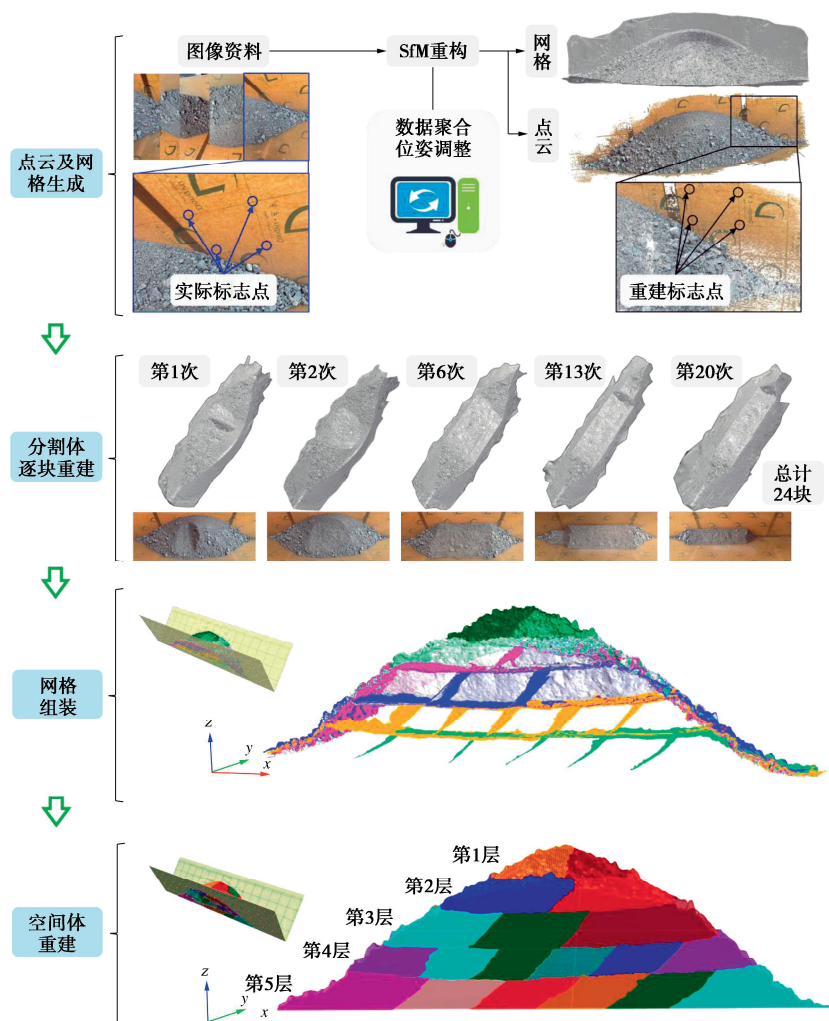


图 6 SfM 方法量化堰塞体体积流程

Fig. 6 Flow chart of quantifying the volume of landslide dam by SfM method

(5) 空间体重建。利用组装好的网格文件, 通过分割面复制与组合, 生成空间实体。每个封闭实体即为滑坡堰塞体不同分割块体, 通过积分求取分割块体的体积及形心坐标值。

初始, 堰塞体处于未扰动状态, 其图像信息最大程度保留了物理试验模型几何特征和空间位置信息; 因此, 将初次拍摄图像作为此次试验堰塞体初始状态。在分块取样初期应多拍摄图像, 随着取样次数增加, 可适当地减少拍摄图像张数, 以增加重构效率。

在第 1 次重建表面特征后, 获取到 23 个标志点空间坐标位置信息, 将其与真实坐标对比, 以验证重建结果准确性, 见表 1。坐标重建值在 x , y 和 z 方向偏差的标准差分别为 0.515, 0.332, 0.481 cm; 与滑坡堰塞体宽 181.58 cm、长 43.19 cm 和高 49.79 cm 相比, 重建值偏差百分比分别为 0.28%, 0.77%, 0.97%, 均在可接受范围内, 这表明采用 SfM 进行模型重构能够获得较为可靠结果数据。

2.3 特征数据提取

滑坡堰塞体结构特征主要为表面轮廓特征和坝

体内部参数。根据重构模型, 利用重建表面网格, 得到颗粒分布与特征断面等表面轮廓特征。

结合物理模型试验中坝体取样次序, 确定各分割块体的体积及其形心三维坐标。与此相应, 根据现场所测得各块体质量, 利用土体三相物质组成计算孔隙比, 将其作为分割块体形心处数据; 最后, 依据筛分结果, 确定各块体的颗粒粒径级配组成。因此, 离散块体形心点是包含坐标信息、孔隙比和级配组成在内的高维数据。

3 数据分析方法

3.1 表观堆积特征与数据分析

利用 SfM 对滑坡堰塞体表面进行了结构重建, 得到了其外表面轮廓信息。堆积高度是评判滑坡堰塞体稳定性的重要参数^[19-20], 以最高点为基准, 利用此空间曲面, 提取滑坡堰塞体长度、宽度、高度、坡度、中心纵向剖面、横河向剖面等断面几何特征; 近滑侧和远滑侧的断面特征均是堰塞体与 V 形河谷交线在河谷中心纵剖面上的水平投影线, 见图 7。

表 1 预设标志点坐标实际值与重建值对比

Table 1 Comparison of actual and reconstructed values of coordinates of preset markers

编号	实际值/cm			重建值/cm			偏差/cm		
	x	y	z	x	y	z	dx	dy	dz
1	47.0	12.1	37.0	47.320	12.214	36.812	0.320	0.114	-0.188
2	47.0	19.7	24.6	46.469	19.617	24.703	-0.531	-0.083	0.103
3	47.0	27.2	12.2	46.147	27.224	12.261	-0.853	-0.009	0.061
4	62.0	12.1	37.0	62.382	12.189	36.853	0.382	0.089	-0.147
5	62.0	19.7	24.6	61.880	19.831	24.354	-0.120	0.131	-0.246
6	62.0	27.2	12.2	61.287	27.696	11.488	-0.713	0.496	-0.712
7	77.0	12.1	37.0	77.437	12.620	36.549	0.437	0.520	-0.451
8	77.0	19.7	24.6	77.002	20.182	24.279	0.002	0.482	-0.321
9	92.0	12.1	37.0	92.373	12.573	36.226	0.373	0.473	-0.774
10	107.0	12.1	37.0	107.441	12.651	36.699	0.441	0.551	-0.301
11	122.0	12.1	37.0	122.775	12.560	36.847	0.775	0.460	-0.153
12	137.0	12.1	37.0	137.704	12.626	36.839	0.704	0.526	-0.161
13	152.0	12.1	37.0	152.530	12.444	36.437	0.530	0.344	-0.563
14	182.0	19.7	24.6	182.679	19.336	25.164	0.679	-0.364	0.564
15	212.0	27.2	12.2	212.844	26.548	12.690	0.844	-0.652	0.490
16	47.0	42.8	12.2	46.382	43.518	12.474	-0.618	0.718	0.274
17	62.0	50.3	24.6	62.048	51.093	25.065	0.048	0.793	0.465
18	62.0	42.8	12.2	61.431	43.196	12.947	-0.569	0.396	0.747
19	77.0	57.9	37.0	77.655	58.327	37.697	0.655	0.427	0.697
20	77.0	50.3	24.6	77.091	50.886	25.026	0.091	0.586	0.426
21	107.0	57.9	37.0	107.732	58.281	37.623	0.732	0.381	0.623
22	122.0	57.9	37.0	122.570	58.243	37.560	0.570	0.343	0.560
23	212.0	42.8	12.2	212.403	43.244	13.026	0.403	0.444	0.826
标准差							0.515	0.332	0.481

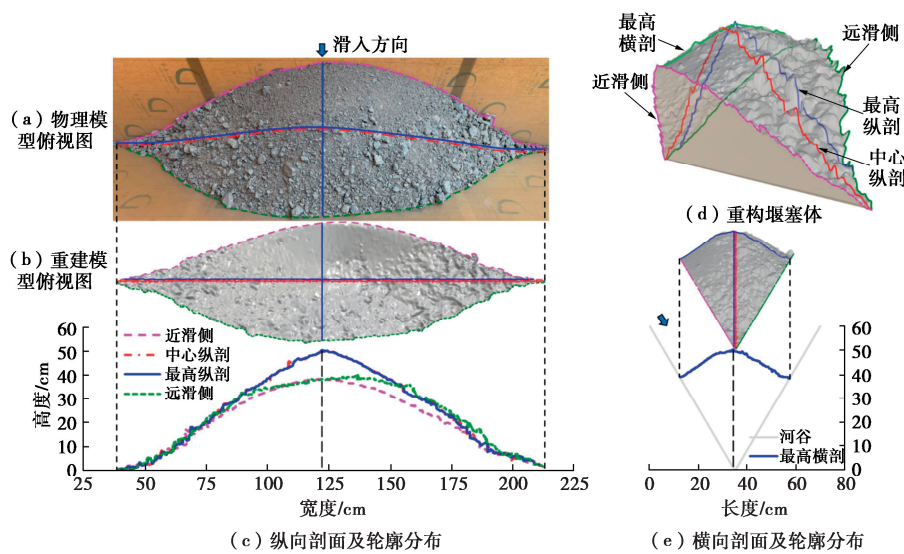


图 7 表面堆积特征提取

Fig. 7 Data extraction of outwardly depositional characteristics

在图 7 中，小颗粒集中分布于靠近滑坡侧的滑入区，大颗粒沿滑入区向远离滑坡侧、河谷两侧临空方向逐渐增多；粗颗粒较多区域，断面轮廓锯齿状现象较为明显。因尺寸不同，颗粒所挟携能量存在差异性；颗粒流在滑入河谷后快速地垒填，导致后续滑入颗粒需利用既有能量在已有堆积体表面的堆积行为各有不同，一部分直接停积，另一部分滑向两侧河床，还有一部分冲向远滑侧高岸，造成滑坡堰塞体两侧河谷底部的粗颗粒显著多于顶部。与之相应，颗粒间架空现

象与大颗粒分布密切相关，大颗粒含量越高，堰塞体表观架空现象越显著。

滑坡堰塞体最大坝高位于河谷中心位置处，最高位置纵向剖面与中心纵向剖面近乎重合，且沿长度方向上呈对称分布；近滑侧与远滑侧的轮廓形状相似。长度方向上最高横向剖面形状近似关于河谷中心纵剖面对称，见图 8。采用线性函数分别拟合长度和宽度方向的数据，得到堰塞体断面轮廓的线性概化线；从拟合效果和相关系数可知，滑坡堰塞体的表观形态在

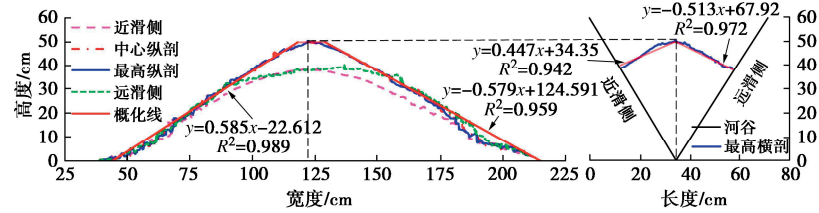


图 8 滑坡堰塞体剖面特征

Fig. 8 Characteristic section diagram of landslide dam

长度和宽度方向近似呈空间斜面状态, 能用线性函数进行量化分析。这与 Wu 等^[21]所得出的结果相一致。

3.2 孔隙比空间分布特征

图 9 是物理模型试验中 24 次离散分块形心处孔隙比空间分布。数据点分布可知, 滑坡堰塞体外部孔隙比大于其内部, 河谷两侧大于中部; 孔隙比数值大小分布与材料粗粒分布密切相关, 粗粒集中区域, 颗粒间架空现象突出, 导致此区域孔隙比变大。

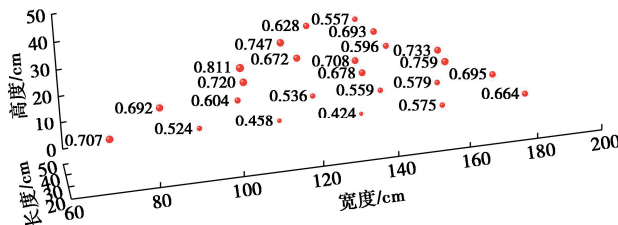


图 9 孔隙比空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of landslide dam

采用变异函数理论, 将孔隙比数据点空间分布进行无偏最优场化, 并利用最大坝高处的最高纵剖、横剖与河谷作为边界, 绘制滑坡堰塞体内部孔隙比分布, 见图 10。在高度方向上, 堰塞体孔隙比随高度增加而增加, 坝高 1/3 处孔隙比与初始状态 (0.570) 相接近; 在长度方向上, 坝体内部孔隙比小于河谷两边临空侧; 在宽度方向上, 近滑侧孔隙比小于远滑侧; 由此可知, 滑坡堰塞体材料孔隙比的空间分布存在差异性, 呈现典型的空变特征。

3.3 级配空间分布特征

通过筛分, 获取到有序离散分割块体的级配组成及其空间分布, 见图 11。第 1 层中第 1 次分割块体的级配曲线位于第 2 次下方, 两者呈平行状态, 表明两者相同粒径的颗粒含量一致, 粒组结构组成相同。

第 2 层第 3 次取样的级配曲线靠近第 5 次、第 4

次靠近第 6 次; 这与它们空间位置分布密切相关, 即: 在长度方向上, 第 3 和 5 次位于近滑侧, 第 4 和 6 次位于远滑侧, 远滑侧的颗粒组成整体上要比近滑侧更为粗化。这种分布规律同样出现在第 3 层 (图 11) 中。

在第 3 层中, 近滑侧且位于第 7 和 11 次取样之间的第 9 次分割块体的颗粒级配曲线位于整层的最上方, 这表明滑坡堰塞体材料从近滑源处细粒为主向四周散射状演化成粗粒为主的分布。

对于堰塞体下部的第 4 层和第 5 层而言, 两侧颗粒级配曲线 (第 13 和 18 次、第 19 和 24 次) 显著位于其他取样次数曲线的下侧, 且中间位置的颗粒级配分布较为紧密, 这表明滑坡堰塞体下部河谷临空侧粗颗粒显著多于中部, 级配组成差异性更为显著。

依据 Marsal^[22]定义颗粒破碎率 B_g 的思路, 定义颗粒级配空间差异性的量化指标为级差指数 V_g , 表征试验前后堰塞体离散块体内各粒组与初始含量的差值绝对值之和, 其计算方法为

$$V_g = \sum_{i=1}^N |\Delta R_{Ci} - \Delta R_{Ci}^0| \quad (4)$$

式中: V_g 为颗粒级配的级差指数; ΔR_{Ci} 为各分块中第 i 个粒组的相对含量; ΔR_{Ci}^0 为试验中第 i 个粒组的初始相对含量, 或者所有取样点中第 i 个粒组的平均值。

图 12 是堰塞体 V_g 的空间场化云图。在宽度方向上, 堰塞体底部两侧坡脚处 V_g 主要分布于 0.4~0.6 范围, 颗粒尺寸差异性比中部显著突出, 变化梯度剧烈。长度方向上, V_g 峰值与极小值分别位于近滑侧、远滑侧, 且变化主体区间为 0~0.2, 整体呈竖向带状分布。结合堰塞体颗粒表现堆积特征和分割块体级配组成可知, 级差指数 V_g 数值越大, 表明该空间位置处滑坡堰塞料的粗细颗粒含量的变化程度越剧烈。

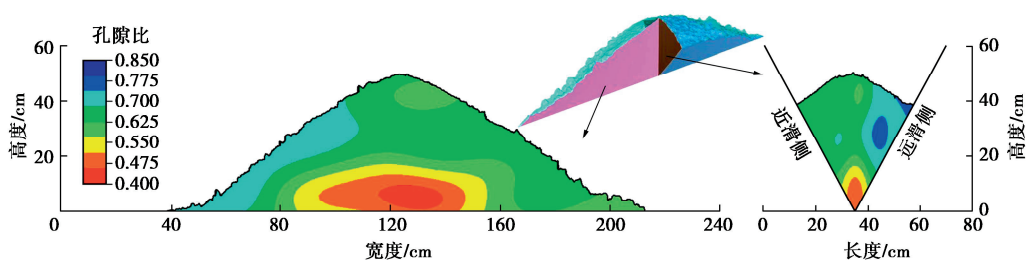


图 10 滑坡堰塞体孔隙比空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of void ratio for landslide dam

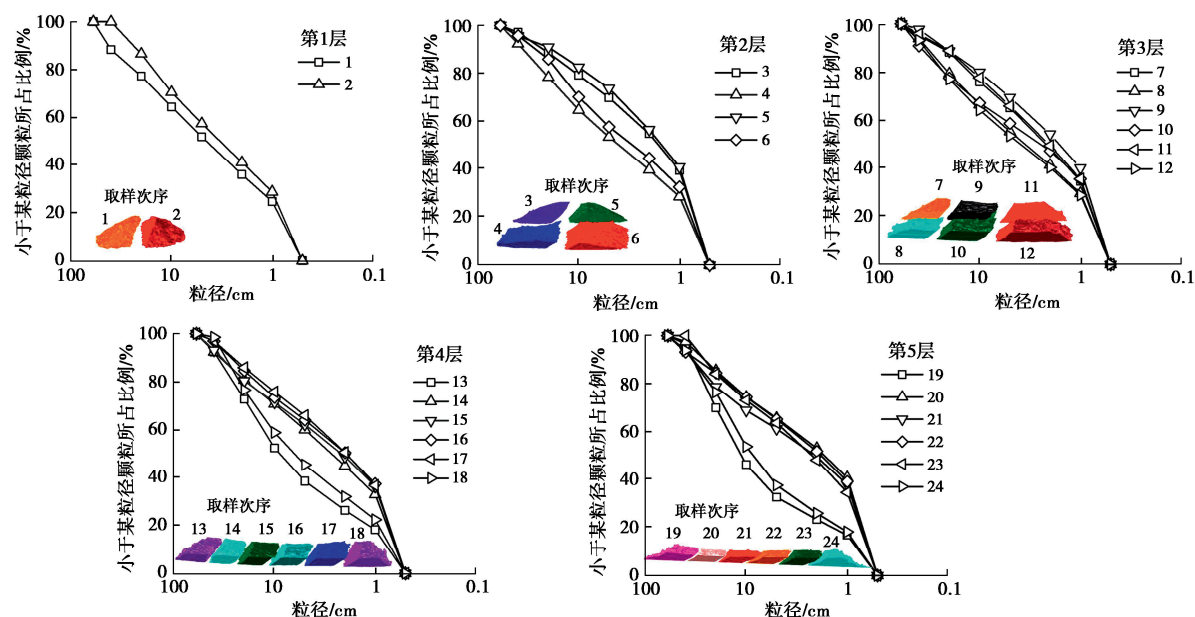


图 11 堰塞体材料级配曲线
Fig. 11 Gradation distribution of landslide dam

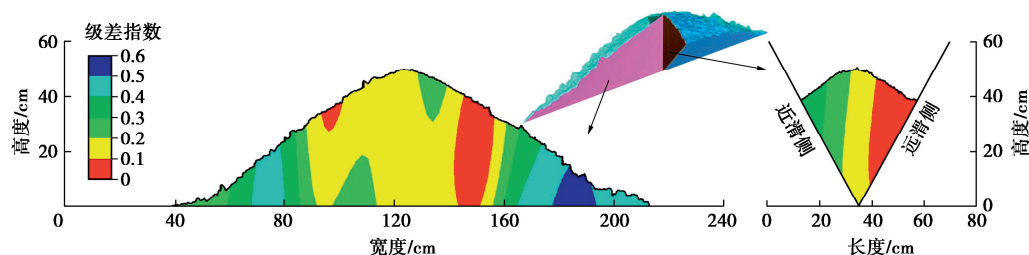


图 12 滑坡堰塞体级配空间分布
Fig. 12 Spatial distribution of void ratio for landslide dam

至此,以堰塞料坡面运动-河谷堆积的物理模型试验为例,融合运动结构逆向重构技术与分块取样,详细阐述堰塞体结构特征数据化方法的使用过程与数据分析。通过有序离散分割块体的逆向建模,将滑坡堰塞体各离散块体形心赋予坐标信息及物理意义(如孔隙比和级配组成),实现对不规则空间几何体表观与内部堆积特征的数据化目的;利用变异函数理论实现孔隙比与级配的场量化表征目标,为进一步研究滑坡堰塞体材料空间变异性奠定了数据基础与方法途径。

4 结 论

本文依据计算机视觉理论与土工试验方法,提出了一套切实有效的物理模型试验方法,实现了滑坡堰塞体材料空间变异性的数据化与场量化目标,并以堰塞料斜坡运动-河谷堆积的物理模型试验为例,对试验方法进行了验证与应用,主要得到以下 3 点结论。

(1) 融合运动结构逆向重构技术与分块取样法,提出了滑坡堰塞体堆积结构特征数据化方法,试验表明该方法能够系统获取滑坡堰塞体表观颗粒分布、典型剖面形态、内部孔隙比与颗粒级配组成的物理几何数据。

(2) 基于有序离散块体的体积和形心坐标,提出

了赋予堰塞体材料孔隙比与级配空间位置信息属性的确定方法。该方法实现对不规则空间几何体表观与内部堆积特征的数据化表征。

(3) 融合区域化变量随机性和结构性,引入泛 Kriging 空间插值法将区域化变量空间分布的“点特征”无偏地拓展至“场特征”,该方法能够进一步推导出滑坡堰塞体级配参数和孔隙比的空间变异场。试验初步证明,滑坡堰塞体颗粒级配与孔隙比在三维空间内均存在显著的变异性。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 郭万里和简富献设计研究内容,蔡正银和郭万里提供研究指导,简富献完成试验数据分析,郭万里和简富献参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by GUO Wanli and JIAN Fuxian and supervised by CAI Zhengyin and GUO Wanli. The experimental data analyses were conducted by JIAN Fuxian. The manuscript was drafted and revised by GUO Wanli and JIAN Fuxian. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参考文献:

- [1] 蔡正银, 钟启明, 何 宁, 等. 堰塞体状态相关剪胀理论与坝体溃决演化规律研究构想[J]. 工程科学与技术, 2021, **53**(6): 21-32. (CAI Zhengyin, ZHONG Qiming, HE Ning, et al. Research framework of the state-dependent dilatancy theory and breach evolution law of landslide dam[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, **53**(6): 21-32. (in Chinese))
- [2] HU X R, FU X L, PENG M, et al. Experimental and numerical study on the breaching mechanisms of landslide dams with non-uniform structures[J]. Engineering Geology, 2024, **330**: 107414.
- [3] 钟启明, 陈小康, 梅胜尧, 等. 滑坡堰塞湖溃决风险与过程研究进展[J]. 水科学进展, 2022, **33**(4): 659-670. (ZHONG Qiming, CHEN Xiaokang, MEI Shengyao, et al. A state of the art review on the failure risk and process of the landslide-induced dammed lake[J]. Advances in Water Science, 2022, **33**(4): 659-670. (in Chinese))
- [4] FAN X M, DUFRESNE A, SIVA SUBRAMANIAN S, et al. The formation and impact of landslide dams: state of the art[J]. Earth-Science Reviews, 2020, **203**: 103116.
- [5] COLI N, BERRY P, BOLDINI D, et al. The contribution of geostatistics to the characterisation of some bimrock properties[J]. Engineering Geology, 2012, **137**: 53-63.
- [6] 石振明, 熊 曦, 彭 铭, 等. 存在高渗透区域的堰塞坝渗流稳定性分析: 以红石河堰塞坝为例[J]. 水利学报, 2015, **46**(10): 1162-1171. (SHI Zhenming, XIONG Xi, PENG Ming, et al. Stability analysis of landslide dam with high permeability region: a case study of Hongshihe landslide dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, **46**(10): 1162-1171. (in Chinese))
- [7] SHI Z M, GUAN S G, PENG M, et al. Cascading breaching of the Tangjiashan landslide dam and two smaller downstream landslide dams[J]. Engineering Geology, 2015, **193**: 445-458.
- [8] MEI S Y, CHEN S S, ZHONG Q M, et al. Effects of grain size distribution on landslide dam breaching-insights from recent cases in China[J]. Frontiers in Earth Science, 2021, **9**: 245.
- [9] 石振明, 张公鼎, 彭 铭, 等. 非均质结构堰塞坝溃决机理模型试验[J]. 工程科学与技术, 2023, **55**(1): 129-140. (SHI Zhenming, ZHANG Gongding, PENG Ming, et al. Experimental investigation on the breaching mechanisms of landslide dams with heterogeneous structures[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, **55**(1): 129-140. (in Chinese))
- [10] JIAN F X, CAI Z Y, GUO W L. Laboratory-scale investigation of the material distribution characteristics of landslide dams in U-shaped valleys[J]. Journal of Mountain Science, 2023, **20**(3): 688-704.
- [11] LUO H Y, ZHANG L M, HE J, et al. Energy transfer mechanisms in flow-like landslide processes in deep valleys[J]. Engineering Geology, 2022, **308**: 106798.
- [12] FEDERICO F, CESALI C. Effects of granular collisions on the rapid coarse-grained materials flow[J]. Géotechnique Letters, 2019, **9**(4): 278-283.
- [13] XIE X P, WANG X J, ZHAO S Z, et al. Experimental study on the accumulation characteristics and mechanism of landslide debris dam[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, **10**: 878782.
- [14] LI D Y, NIAN T K, WU H, et al. A predictive model for the geometry of landslide dams in V-shaped valleys[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, **79**(9): 4595-4608.
- [15] ZHOU Y Y, SHI Z M, QIU T, et al. Experimental study on morphological characteristics of landslide dams in different shaped valleys[J]. Geomorphology, 2022, **400**: 108081.
- [16] YIN Y P, LI B, GAO Y, et al. Geostuctures, dynamics and risk mitigation of high-altitude and long-runout rockslides[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, **15**(1): 66-101.
- [17] CUI P, ZHU Y Y, HAN Y S, et al. The 12 May Wenchuan earthquake-induced landslide lakes: distribution and preliminary risk evaluation[J]. Landslides, 2009, **6**(3): 209-223.
- [18] WESTOBY M J, BRASINGTON J, GLASSER N F, et al. 'Structure-from-motion' photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications[J]. Geomorphology, 2012, **179**: 300-314.
- [19] LUO J, PEI X J, EVANS S G, et al. Mechanics of the earthquake-induced hongshiyan landslide in the 2014 mW 6.2 Ludian earthquake, Yunnan, China[J]. Engineering Geology, 2019, **251**: 197-213.
- [20] 张宗亮, 何 宁, 周彦章, 等. 堰塞坝险情处置与开发利用保障技术与装备研发[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(7): 1175-1187. (ZHANG Zongliang, HE Ning, ZHOU Yanzhang, et al. Research and development of guarantee technologies and equipments for dangerous situation disposal and utilization of barrier dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(7): 1175-1187. (in Chinese))
- [21] WU H, NIAN T K, CHEN G Q, et al. Laboratory-scale investigation of the 3-D geometry of landslide dams in a U-shaped valley[J]. Engineering Geology, 2020, **265**: 105428.
- [22] MARSAL R J. Large scale testing of rockfill materials[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, **93**(2): 27-43.