

基于多目阵列相机的大型滑坡涌浪 PIV 分析系统

李鹏程^{1,2}, 秦臻^{1,2}, 黄波林^{1,2}, 董星辰^{1,2}, 秦盼盼^{1,2}, 张鹏^{1,2}

(1. 三峡大学土木与建筑学院; 2. 三峡大学防灾减灾湖北省重点实验室)

摘要:为解决滑坡涌浪三维缩尺试验中大视野与高分辨率流场测量难以兼顾的问题,建立了基于多目阵列相机的大型滑坡涌浪 PIV 分析系统,采用了广角畸变校正、不规则图像四角点映射、图像快速融合拼接以及大型滑坡涌浪流场 PIV 分析等4项关键技术,实现了对三维缩尺试验下滑坡涌浪运动过程的观测与 PIV 分析。以大型三维王家山滑坡涌浪物理模型试验为例进行了滑坡涌浪 PIV 分析,验证了大型滑坡涌浪 PIV 分析系统的精确度与可行性,可为进一步研究三维缩尺试验下滑坡涌浪的运动过程提供借鉴。

关键词:滑坡涌浪;多目阵列相机;PIV 分析;三维缩尺试验

PIV analysis system for large-scale landslide-generated impulse waves based on multi-lens array camera// Li Pengcheng^{1,2}, Qin Zhen^{1,2}, Huang Bolin^{1,2}, Dong Xingchen^{1,2}, Qin Panpan^{1,2}, Zhang Peng^{1,2} (1. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University; 2. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University)

Abstract: To address the challenge of balancing a large field of view and high-resolution flow field measurement in 3D scaled model tests of landslide-generated impulse waves, we developed a PIV analysis system for large-scale landslide-generated impulse waves based on a multi-lens array camera. This system integrates four key technologies: wide-angle distortion correction, irregular image corner point mapping, rapid image fusion and stitching, and PIV analysis for large-scale landslide-generated impulse wave flow fields. It enables observation and PIV analysis of the movement process of landslide-generated impulse waves in 3D scaled model tests. Taking the large-scale 3D physical model test of Wangjiashan landslide-generated impulse waves as an example, PIV analysis of the landslide-generated impulse wave flow field was conducted. The results verify the accuracy and feasibility of the PIV analysis system for large-scale landslide-generated impulse waves, providing a reference for further research on the movement process of landslide-generated impulse waves in 3D scaled model tests.

Key words: landslide-generated impulse wave; multi-lens array camera; PIV analysis; 3D scaled model test

库区滑坡是水库蓄水运行期间的常见灾害,滑坡涌浪作为滑坡失稳入水形成的次生灾害,具有传播范围广、影响面积大等特点,是地质灾害研究的热点和难点^[1-8]。滑坡涌浪的研究方法主要包括经验公式法、数值分析法、物理模拟法等^[9]。其中,物理模拟法中的物理模型试验是研究滑坡涌浪运动传播过程和速度变化规律的重要手段^[10]。粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)技术因其非接触式测量、高分辨率和全场测速的特点,被广泛应用于滑坡涌浪物理模型试验研究中^[11-12]。例如 Fritz 等^[13-15]将 PIV 技术引入滑坡涌浪物理模型试验中,在 0.8 m×0.8 m 视场区域,成功获取了滑坡启动与

首浪传播过程的高分辨率图像序列,通过 PIV 分析实现了对滑坡表面速度矢量场的定量表征。

与传统的接触式测量方法相比,PIV 技术不会干扰流场,能够保持涌浪动力学行为的原始状态,是一种具有广阔发展前景的非接触式测量技术^[16]。虽然流场实时测量系统目前已经在很多河工模型试验中用来测量表面流速,但该系统需配置高精度激光器、声学探头及图像采集设备,初期投入大,维护成本高,而微观 PIV 技术难以用于大范围流场测量。因此,考虑通过多目阵列相机与 PIV 技术的协同应用来测量滑坡涌浪两相运动场。

多目阵列相机在滑坡涌浪物理模型试验中已得

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)

作者简介:李鹏程(2000—),男,硕士研究生,主要从事水库地质灾害及涌浪灾害研究。E-mail:3213340270@qq.com

通信作者:秦臻(1978—),男,高级工程师,博士,主要从事岩土工程勘察及地球物理勘探研究。E-mail:337203841@qq.com

到广泛应用,例如 Zweifel 等^[16-19]在试验尺度拓展方面进行了相关研究。针对大尺度试验需求, Mohammed 等^[20]通过 48.8 m×26.5 m 波浪池物理模型试验,集成水面/水下多相机系统,完整记录了滑坡运动过程及涌浪从传播到岸坡爬高的全过程; Umeyama^[21]在 26.0 m×0.8 m 的试验水槽中采用 PIV 和粒子追踪测速 (particle tracking velocimetry, PTV) 技术,研究了不同相位的速度场和水体在一个周期内的运动轨迹;殷坤龙等^[22]通过高速摄影技术完整捕捉了滑坡入水至涌浪产生的瞬态过程; Xu 等^[23]构建了多视角观测系统,完成了 65.0 m×40.0 m×3.0 m 大范围流场的运动观测; Cao 等^[24]基于三峡库区 1:70 比尺模型 (原型尺寸为 6000.0 m×183.4 m),通过高速摄像技术完整记录了复杂地形条件下涌浪产生及传播的全过程。

尽管国内外已经开展了大量的物理模型试验来研究滑坡涌浪的运动规律,但大多数研究仅记录了涌浪的产生或传播过程,鲜有研究聚焦于三维缩尺试验下涌浪在复杂河道中的产生及传播过程,并对此进行 PIV 分析。本文通过建立基于多目阵列相机的大型滑坡涌浪 PIV 分析系统 (以下简称 PIV 分析系统),实现了三维缩尺试验下室内滑坡涌浪运动全过程观测,并通过自主研发的解算程序进行 PIV 分析,所得数据可为滑坡涌浪物理模型试验中滑坡运动过程及涌浪传播过程的量化分析提供参考。

1 PIV 分析系统构建

PIV 分析系统的构建以滑坡涌浪流场观测装置为基础,该装置通过科学布置多目阵列相机,实现对滑坡涌浪运动过程的连续记录。由于拍摄相机存在光学畸变,且单个相机拍摄视野有限,需将多台相机的观测区域拼接在一起以形成完整的试验区域,故引入多目阵列相机图像畸变校正与融合拼接技术 (具体包括广角畸变校正、不规则图像四角点映射、图像快速融合拼接),并结合大型滑坡涌浪流场 PIV 分析技术,最终实现对三维缩尺试验下滑坡涌浪运动过程的全过程观测与高精度 PIV 分析。

1.1 滑坡涌浪流场观测装置

滑坡涌浪流场观测装置主要由以下核心组件构成:高质量万兆网线、万兆交换机、大容量硬盘存储系统、8K 液晶显示器以及高清网络相机。各组件协同工作,实现了从数据采集、传输、存储到显示的全流程高效运作,保障了整个装置的稳定运行与数据的高效处理。

在滑坡涌浪流场观测装置中,多目阵列相机的

布置需遵循以下原则:①覆盖性原则。根据所需拍摄的试验场地面积,确定相机数量及排列方式,以实现有效覆盖;同时要确保所有相机的有效拍摄范围完整覆盖物理模型的涉水区域,以实现全面监测。②清晰度原则。考虑到安装便利性,相机通常安装在试验场顶板的主梁或次梁上。通过精确计算和反复调整,确定镜头与观测目标之间的最佳距离,以保证图像清晰度,还可通过调整相机焦距或增加相机数量来满足更高分辨率的要求。③重叠性原则。为便于后续图像处理中的裁剪与拼接,相邻相机的有效拍摄范围应保留一定重叠区域,实现图像的无缝融合。④可调节性原则。单个相机镜头位置的确定共涉及 5 个独立参数:镜头中心空间位置的坐标 (x, y, z) 、镜头成像平面的水平方位角和垂直方位角。通过微调这 5 个参数,可适应不同试验场景对相机视角、拍摄范围的要求,确保拍摄效果的稳定性与可靠性。

相机水平方位角与垂直方位角校正方法:结合显示终端输出的相机成像图像特征,在相机下方布置“十”字基准绳来实现校正。为使各相机镜头具有相同的水平方位角,旋转相机镜头,让上下方向的准绳上下对称,左右方向的基准绳左右对称。此时“十”字成像中心点可能未处于屏幕中心,主要由两种原因引起:一是垂直方位角不准确;二是镜头中心位置不正确。为校正相机镜头中心位置和垂直方位角,将水准仪置于相机上方,通过调整相机边缘的高度,使水准仪气泡居中,直至屏幕中“十”字中心与屏幕中心重合且上下、左右方向均对称时,单个相机校正完成。通过相同步骤再对其他相机进行校正。

1.2 多目阵列相机图像畸变校正与融合拼接技术

利用图像畸变的渐变特性和畸变分离相机模型 (一种将相机理想投影与光学畸变解耦建模的数学模型),本文提出了一种将畸变图像中的基准绳化曲为直的相机径向畸变校正方法,以便快速、高效地标定相机的径向畸变参数,消除图像畸变,进而提高图像量测与重建的效率及精度。

1.2.1 基于球面模型的广角畸变校正

为将鱼眼镜头的实际成像点恢复为理想像点,要建立理想像点与畸变图像对应像点间的映射关系。鱼眼镜头的成像球面模型为球面半径为 R 的半球形,投影面为 S ,将球面上的点投影到投影面 S 上,就可以实现图像的畸变校正^[25]。

空间中一条直线在透视投影的作用下,理应映射为一条直线,但由于相机的畸变,同一条直线的像点呈曲线分布。为得到准确的畸变校正系数 k_1 ,需要将畸变图像中的曲线拉直。受场地限制,且因相机数量众多,不能对每个相机布置众多纵横交错

规则网格线,并通过观察特征规则网格线的校正效果来实现畸变校正^[26]。为了便于标定和拼接裁剪,在相机底部布置4条相互垂直的基准线,根据径向畸变的原理可知,给定 k_1 一个初始值,使其渐变,将4条基准线逐渐由弯曲变化至拉直继而再次弯曲,在此过程中存在一个最优的 k_1 ,使特征规则网格线的校正效果最佳。其他相机以该畸变校正系数为参考,确保各相机畸变校正程度一致,以提升后续拼接裁剪的准确度。

1.2.2 不规则图像四角点映射

由于视角等多种因素的影响,鱼眼校正后的图像并不是规则的四边形,因此,基于不规则四角点映射原理,通过旋转、伸缩、投影、平移等变换将不规则的四边形变换为规则的四边形,将图像空间长与宽的真实比例调整为物体空间长与宽的真实比例,同时裁剪多余部分,以确保校正后图像的几何尺寸比例与实际物体的空间尺寸比例完全一致。

如图1所示,将原图像平面 $ABCD$ 上的一点 (X, Y) 映射至理想图像平面 $abcd$ 上的一点 (x, y) ,对应的三维齐次坐标转换关系可写成

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: a_{11} 、 a_{12} 、 a_{21} 、 a_{22} 为旋转与伸缩系数; a_{13} 、 a_{23} 为平移系数; a_{31} 、 a_{32} 为投影系数。

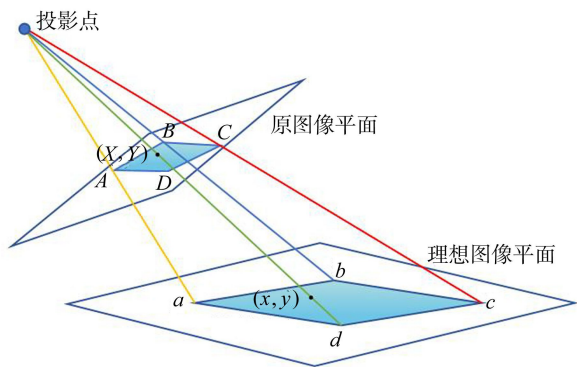


图1 透视变换示意图

分别在原图像平面和理想图像平面上选取4组对应点,即 $A(X_1, Y_1)$ 、 $B(X_2, Y_2)$ 、 $C(X_3, Y_3)$ 、 $D(X_4, Y_4)$ 与 $a(x_1, y_1)$ 、 $b(x_2, y_2)$ 、 $c(x_3, y_3)$ 、 $d(x_4, y_4)$,于是形成了对应点的映射关系。每组对应点有2个独立的线性方程,4组对应点共形成8个方程,通过求解该线性方程组即可得到8个参数的唯一解,进而得到单应矩阵 H 。对于校正后的规则网格点 (x, y) ,需按单应矩阵的逆矩阵 H^{-1} 反算其在原图像平面中的对应点,该对应点通常落在亚像素区域。最后采用双线性插值法(或更高阶插值法)通过邻近

整数像素插值,确定这4组对应点的准确坐标。通过以上步骤,可将任意不规则四边形区域快速、准确地校正为符合物体空间长与宽的真实比例且无畸变的矩形图像。

1.2.3 基于基准面的图像快速融合拼接

传统图像融合拼接技术在处理特征细节和实时性方面要求较高,且拼接后物体位置可能发生偏移。针对此问题,本文提出了一种基于基准面的图像快速融合拼接技术,专门用于流动场图像的高效处理。该技术的核心在于自动拼接基准面,其关键步骤是精确选取重叠矩形区域的4个角点。这4个角点不仅是重叠区域的关键特征点,也是不规则四边形映射的几何控制点。如图2所示,以水池表面作为基准面,该基准面的4个角点为 $H_1 \sim H_4$ 。当流动场发生变化时,位于其上方的基准绳位置保持不变。不同工况下水池表面会发生变化,若在水池表面布置基准绳网络,不仅工作量大,还可能因地形复杂而难以布置。因此,在基准绳交叉点处悬挂一个小浮标作为标识,该浮标的投影点即为交叉点在水池表面的投影,可作为单个相机不规则映射的特征点。不规则映射区域对应图2中黄色矩形区域的一个角点,该角点因相机拍摄视野重叠,会同步出现在相邻3台相机的拍摄图像中。基于此,首先通过不规则图像四角点映射,建立该角点在不同相机图像中的坐标关联,再使多相机图像中的该角点实现坐标重合,以该角点为基准,即可自动实现不同相机图像的快速融合拼接。这种固定的映射关系不仅适用于同一时刻的图像拼接,还适用于不同帧图像的拼接,从而显著提高了图像融合拼接的效率。

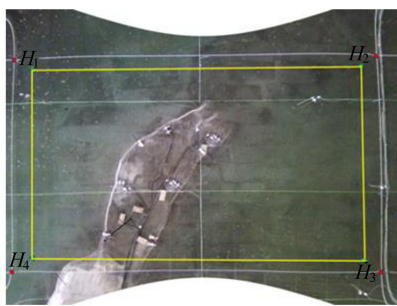


图2 水池表面基准面的映射特征点

在四角点映射过程中,理想图像的坐标应为像素坐标,而非长度单位坐标,因此需根据比例尺来计算图2中黄色矩形区域长和宽所对应的像素数量。按比例尺 s 将物理坐标换算为像素坐标时,设外围白色区域基准绳的长为 w 、宽为 h ,则黄色区域像素矩阵4个角点的坐标分别为 $(0, 0)$ 、 $(0, h/s)$ 、 $(w/s, h/s)$ 、 $(w/s, 0)$ 。经图像畸变校正与四角点映射后,可得到如图3(a)所示的试验区域全图像,再

通过融合拼接与裁剪优化,最终得到如图 3(b) 所示的适用于 PIV 分析的标准化图像。

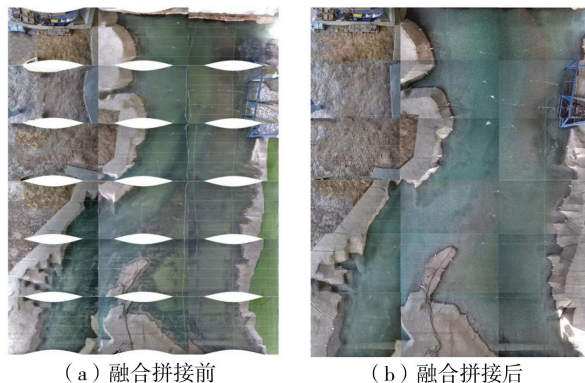


图 3 融合拼接前后图像示意图

2 PIV 分析系统应用实例

以大型三维王家山滑坡涌浪物理模型试验为例,进行滑坡涌浪 PIV 分析。为模拟王家山滑坡涌浪在大尺度复杂河谷中的传播,采用 1:150 的几何相似比,建立了如图 4 所示的大型三维王家山滑坡涌浪物理模型试验场,模型尺寸为 30.0 m×27.0 m×1.5 m,以大缩尺复现金沙江 4500.0 m×4050.0 m×225.0 m 的实际河谷^[27]。在模型上方布置 14 个相机,以实现对试验模型中有效河道区域的全覆盖监测。高清相机像素为 4000×3000,焦距取 2.8 mm,每台相机拍摄范围约为 8.0 m×6.0 m,通过对 14 台相机的视角调试与优化排布,最终形成 23.4 m×22.9 m 的 PIV 观测场。



图 4 大型三维王家山滑坡涌浪物理模型试验场

2.1 示踪颗粒选择

示踪颗粒在 PIV 技术中至关重要,若示踪颗粒具有足够高的流动跟随性,示踪颗粒的运动就能真实地反映流场的运动状态^[28-29]。在滑坡涌浪流场记录过程中,水流的成像效果受自由表面光照条件与示踪颗粒分布状态的双重影响。示踪颗粒的分布均匀性与成像清晰度直接决定图像是否满足后续 PIV 分析要求。图像尺寸应与其分辨率相匹配,并且能够区分水体在图像对(连续两帧图像)中的运

动。有时需从不同位置连续获取多张图像,再进行融合拼接以覆盖整个试验区域。

高质量示踪颗粒应满足以下要求:相对密度尽可能与试验流体一致,粒径足够小且大小分布均匀,形状尽可能为圆形,光散射效率足够高。为有效测得库水面上涌浪速度,PIV 示踪颗粒的密度应略小于水。选用超高分子乳白色蜡状聚乙烯(PE)圆形颗粒作为 PIV 示踪颗粒,该颗粒不溶于水,粒径为 4.0 mm,密度为 0.92 g/cm³。为了提高示踪颗粒在水面上的 PIV 分析辨识度,将其染至黑色。

2.2 涌浪传播分析

王家山滑坡位于会泽县娜姑镇王家湾村大水沟沟口段至石门坎段。王家山岸坡山顶高程为 1575~1770 m,高程 1125 m 以下以土质斜坡为主,坡度为 15~40°,高程 1125 m 以上为基岩陡坡,坡度为 50~60°。结合野外调查和勘探钻孔数据,滑体中部厚,两侧和后缘较薄,厚度为 14.1~87.6 m,滑坡面积约为 23.5 万 m²,总体积约为 611 万 m³,滑动方向为 260°。王家山滑坡为大型土质滑坡,滑坡破坏后带来的涌浪灾害严重威胁包括象鼻岭居民点在内的广大沿江移民的生命财产安全和基础设施安全。因此,对王家山滑坡涌浪的危害性进行风险评估非常必要。

以蓄水高程 825 m(此时滑坡最大启动速度为 4.42 m/s)工况为例,基于 14 台相机全场拼接图像,完成滑坡涌浪 PIV 运动数据采集。通过自主研发的 PIV 解算程序,获取滑坡运动过程和涌浪传播过程的流场(图 5、图 6),实现运动学特征的量化分析。

由图 5 可见,滑坡运动过程先加速后减速:28.8 s 时滑坡扰动水体有限,平面速度仅为 2.0 m/s,此时水体以局部振动为主;44.8 s 时扰动范围扩大,形成半环状涌浪,此时顺滑坡运动方向的水质点速度成为运动主导因素;53.6 s 时滑坡运动速度达到峰值 4.21 m/s,此时涌浪传播速度同步激增,水质点速度为 2.42 m/s;61.6 s 时滑坡运动终止,涌浪转入自由传播阶段。

由图 6 可见,涌浪传播过程受复杂地形影响显著:在金沙江河道内,94.4 s 时半环状涌浪遇左岸约束后发生分流,形成下游向冲沟爬高(最大爬高为 13.91 m)、岸坡反射(冲击速度为 2.39 m/s)及上游有侧限传播的三维效应。134.4 s 时涌浪首次冲击象鼻岭,鼻头区域局部淹没(冲击速度为 1.22 m/s);随后第二波涌浪沿两侧凹槽侵入,在小江侧形成速度为 3 m/s 的爬坡浪。206.4 s 时涌浪在河道内形成复杂的反射叠加流场,呈现全域覆盖态势。

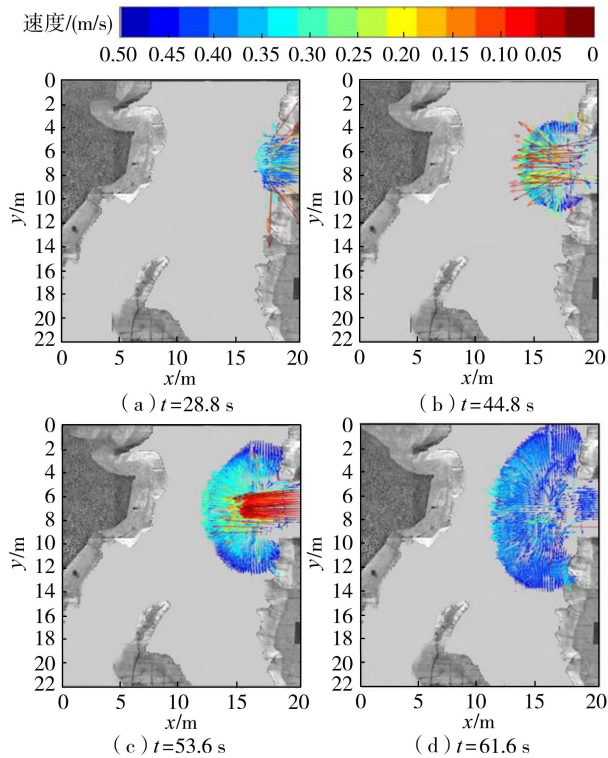


图5 王家山滑坡运动过程流场

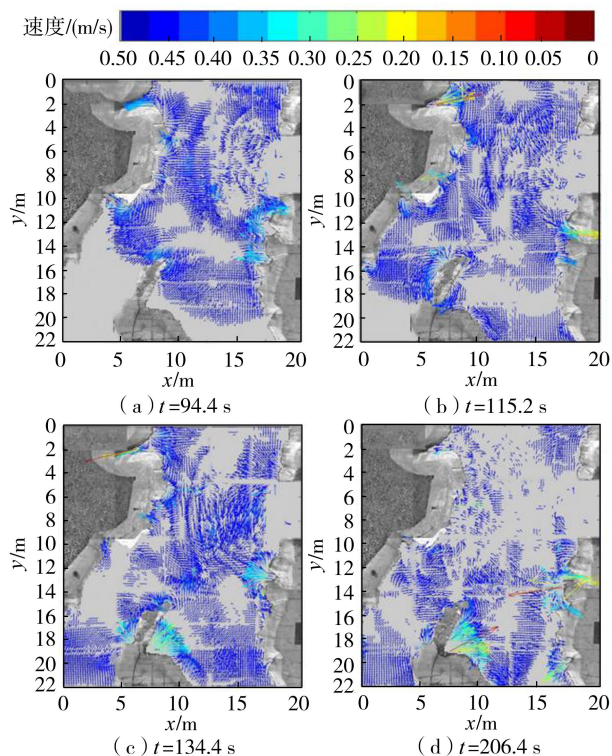


图6 王家山涌浪传播过程流场

3 PIV 分析系统精度验证与研究展望

3.1 精度验证

通过多组平行试验,对位移计测得的滑坡速度曲线和 PIV 分析系统测得的滑坡速度曲线进行标定。在 D3 相机图像中的滑坡区域选取 1 m^2 的矩形区域,统计该区域的滑坡历时速度曲线,与对应位置

位移计测得的滑坡速度时程曲线进行对比,结果如图 7 所示。由图 7 可见,PIV 分析系统的滑坡速度时程曲线与位移计的滑坡历时速度曲线几乎一致,仅因测量维度差异存在幅值偏差——位移计获取的是滑坡体空间合速度,而 PIV 分析系统测量的是 xOy 平面二维速度(未包含 z 向速度分量)。对两种方法所获取的滑坡速度时程曲线进行标定,将 PIV 分析系统测得的滑坡速度时程曲线进行垂直缩放,采用 0.838 作为标定系数,即将 PIV 分析系统的结果乘以 0.838,就可以得到和位移计相同的结果,表明 PIV 分析系统的测速结果可靠,精度较高。

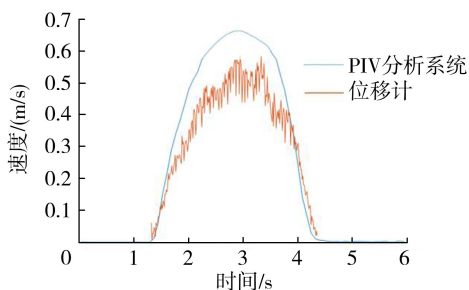


图7 两种方法测得的滑坡速度时程曲线对比

3.2 研究展望

当前 PIV 分析系统虽实现了三维缩尺试验下滑坡涌浪的二维流场观测,但仍存在优化空间,后续可从以下方面拓展研究:①三维速度测量优化:由于相机安装于天花板上,难以直接反映速度在深度方向上的变化,后续可以考虑安装水下相机,即可获得三维空间中的速度变化。另外 PIV 分析系统测得的速度为水平面上的二维速度,实际上运动的水表面为曲面,可以考虑在同一空间位置处安装多个相机从不同角度观测同一个区域,实现类似人类双眼视觉的立体成像效果,从而准确反映流场的景深特征。②系统应用场景拓展:若将该系统用于泥石流和碎屑流的运动观测,示踪颗粒的选择和布置成为准确反映泥石流和碎屑流运动规律的关键。目前国内地质工程领域,显微荧光技术主要用于特殊岩性识别和储层物性的微观评价,可以考虑将该技术引入大范围流场观测领域,对滑体材料进行荧光标记,并利用相机捕捉荧光信号,从而通过追踪标记材料来揭示泥石流和碎屑流的运动轨迹。

4 结论

a. 建立了 PIV 分析系统,采用广角畸变校正、不规则图像四角点映射、图像快速融合拼接以及大型滑坡涌浪流场 PIV 分析等 4 项关键技术,实现了对三维缩尺试验下滑坡涌浪运动过程的观测与 PIV 分析。

b. 该 PIV 分析系统已成功应用于王家山滑坡

涌浪物理模型试验。试验采用 1 : 150 几何相似比, 构建了尺寸为 30.0 m×27.0 m×1.5 m 的大型三维物理模型, 精准复现了金沙江原型河谷(4500.0 m×4050.0 m×225.0 m)的地形特征与边界条件。

c. 通过多组平行试验对位移计实测滑坡速度曲线和 PIV 分析系统测得的滑坡速度曲线进行标定, 结果显示二者速度变化趋势高度一致, 将 PIV 分析系统的结果乘以标定系数后, 可得到和位移计相同的结果, 验证了 PIV 分析系统的准确性。

参考文献:

[1] 黄波林, 殷跃平, 王世昌, 等. GIS 技术支持下的滑坡涌浪灾害分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32 (增刊 2): 3844-3851. (Huang Bolin, Yin Yueping, Wang Shichang, et al. Landslide impulsive wave hazard study supported by GIS technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (S2): 3844-3851. (in Chinese))

[2] 司鹏飞, 田利勇. 基于流固耦合方法的滑坡涌浪数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(6): 28-32. (Si Pengfei, Tian Liyong. Numerical simulation of landslide-induced impulse waves based on fluid-solid coupling method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(6): 28-32. (in Chinese))

[3] 殷坤龙, 张宇, 汪洋. 水库滑坡涌浪风险研究现状和灾害链风险管控实践[J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 1-12. (Yin Kunlong, Zhang Yu, Wang Yang. A review of landslide-generated waves risk and practice of management of hazard chain risk from reservoir landslide[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 1-12. (in Chinese))

[4] Wang Wei, Chen Guangqi, Yin Kunlong, et al. Modeling of landslide generated impulsive waves considering complex topography in reservoir area [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(5): 372.

[5] 陈世壮, 徐卫亚, 石安池, 等. 高坝大库滑坡涌浪灾害链研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 83-93. (Chen Shizhuang, Xu Weiya, Shi Anchi, et al. Review of hazard chain of landslide surge for high dams and large reservoirs [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3): 83-93. (in Chinese))

[6] Hunt J E, Tappin D R, Watt S F L, et al. Submarine landslide megablocks show half of Anak Krakatau Island failed on December 22nd, 2018 [J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 2827.

[7] 徐文杰. 库岸滑坡涌浪链生灾害动力学研究进展[J]. 工程地质学报, 2023, 31(6): 1929-1940. (Xu Wenjie. Research advances in disaster dynamics of landslide tsunami [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(6): 1929-1940. (in Chinese))

[8] 马鑫磊, 任光明, 夏敏. 滑坡涌浪预测评价方法综述

[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(3): 89-98. (Ma Xinlei, Ren Guangming, Xia Min. Review on the forecast evaluation methods of landslide surge [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(3): 89-98. (in Chinese))

[9] Heller V. Landslide generated impulse waves: prediction of near field characteristics [D]. Zurich: Eth Zurich, 2007.

[10] Miller G, Take W A, Mulligan R. Parametric study of landslide generated impulse wave physical modelling [C]//Proceedings of the 6th Canadian Geo Hazards Conference. Kingston: Canadian Geotechnical Societ, 2014: 1-7.

[11] Mohammed F, Fritz H M. Experiments on tsunamis generated by 3D granular landslides [C]//Mosher D C, Shipp R C, Moscardelli L, et al. Submarine Mass Movements and Their Consequences. Dordrecht: Springer, 2010: 705-718.

[12] Scarano F. Tomographic PIV: principles and practice [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(1): 012001.

[13] Fritz H M, Hager W H, Minor H E. Landslide generated impulse waves [J]. Experiments in Fluids, 2003, 35(6): 505-519.

[14] Fritz H M, Hager W H, Minor H E. Near field characteristics of landslide generated impulse waves [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2004, 130(6): 287-302.

[15] Fritz H M, Hager W H, Minor H E. Landslide generated impulse waves: hydrodynamic impact craters [J]. Experiments in Fluids, 2003, 35(6): 520-532.

[16] Zweifel A, Hager W H, Minor H E. Plane impulse waves in reservoirs [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2006, 132(5): 358-368.

[17] Huang Bolin, Li Bin, Zheng Jiahao, et al. Dynamic analysis of impulse waves generated by the collapse of granular pillars [J]. Journal of Mountain Science, 2022, 19(1): 198-210.

[18] 陈小婷, 黄波林, 王健, 等. 基于粒子图像测速技术的滑坡-涌浪两相运动分析系统 [J]. 地质力学学报, 2020, 26(4): 492-499. (Chen Xiaoting, Huang Bolin, Wang Jian, et al. Two-phase motion analysis system for landslide-induced impulse wave based on the particle image velocimetry [J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(4): 492-499. (in Chinese))

[19] 孟珍珠, 胡林生, 沈优, 等. 基于改进 PIV 技术的库区滑坡涌浪试验研究 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2): 30-36. (Meng Zhenzhu, Hu Linsheng, Shen You, et al. Experimental study on landslide generated waves based on improved PIV technique [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2): 30-36. (in Chinese))

[20] Mohammed F, Fritz H M. Physical modeling of tsunamis

- generated by three-dimensional deformable granular landslides[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(11): C11015.
- [21] Umeyama M. Coupled PIV and PTV measurements of particle velocities and trajectories for surface waves following a steady current[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2011, 137(2): 85-94.
- [22] 殷坤龙, 刘艺梁, 汪洋, 等. 三峡水库库岸滑坡涌浪物理模型试验[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2012, 37(5): 1067-1074. (Yin Kunlong, Liu Yiliang, Wang Yang, et al. Physical model experiments of landslide-induced surge in Three Gorges Reservoir [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(5): 1067-1074. (in Chinese))
- [23] Xu Weiya, Lei Jie, Tian Lei, et al. Three-dimensional geomechanics experimental investigation on potential impulse waves generated by Wangjiashan Landslide in Baihetan Reservoir, China[J]. *Physics of Fluids*, 2025, 37(2): 026601.
- [24] Cao Ting, Wang Pingyi, Hu Jielong, et al. Experimental study on the pressure of impulse waves generated by landslides on a bank slope [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2021, 39(9): 1125-1138.
- [25] 熊琨, 何旭然, 王春喜, 等. 用于高精度准直测量的鱼眼相机标定方法[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(2): 202305. (Xiong Kun, He Xuran, Wang Chunxi, et al. Calibration method of fisheye camera for high-precision collimation measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(2): 202305. (in Chinese))
- [26] Adrian R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1991, 23: 261-304.
- [27] 黄波林, 胡刘洋, 李仁江, 等. 水库区低 Froude 数的典型涉水滑坡涌浪缩尺物理模型试验研究: 以王家山滑坡为例[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(8): 1899-1909. (Huang Bolin, Hu Liuyang, Li Renjiang, et al. Scaled experimental study on impulse wave generated by a typical semi-submerged landslide with a low Froude number in reservoir areas: taking Wangjiashan landslide as an example [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(8): 1899-1909. (in Chinese))
- [28] 万立国, 任庆凯, 田曦, 等. PIV 技术及其在两相流测量中的应用[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(12): 463-467. (Wan Ligu, Ren Qingkai, Tian Xi, et al. PIV technique and its application in two-phase flow measurement [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(12): 463-467. (in Chinese))
- [29] 蔡楚江, 沈志刚, 肖昆, 等. 一种高散射率 PIV 实验用示踪粒子的制备[J]. *实验流体力学*, 2005, 19(4): 65-68. (Cai Chujiang, Shen Zhigang, Xiao Kun, et al. The preparation of tracer particles with excellent scattering performance used in PIV experiment [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2005, 19(4): 65-68. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-08-15 编辑: 骆超)

(上接第 36 页)

- [21] 田富强, 胡和平, 雷志栋. 流域热力学系统水文模型: 本构关系[J]. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2008, 38(5): 671-686. (Tian Fuqiang, Hu Heping, Lei Zhidong. Hydrological model of watershed thermodynamic system: constitutive relations [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2008, 38(5): 671-686. (in Chinese))
- [22] Reggiani P, Sivapalan M, Hassanizadeh S M. A unifying framework for watershed thermodynamics: balance equations for mass, momentum energy and entropy, and the second law of thermodynamics[J]. *Advances in Water Resources*, 1998, 22(4): 367-398.
- [23] 梁忠民, 赵建飞, 段雅楠, 等. 微分形式新安江模型[J]. *水科学进展*, 2024, 35(3): 374-386. (Liang Zhongmin, Zhao Jianfei, Duan Ya'nan, et al. Differential-form Xin' anjiang model [J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(3): 374-386. (in Chinese))
- [24] 童冰星, 陈瑜彬, 张潇, 等. 考虑坡面沟流的土壤含水量精细化模拟及应用[J]. *水科学进展*, 2025, 36(3): 493-504. (Tong Bingxing, Chen Yubin, Zhang Xiao, et al. Elaborate simulation of dynamic soil moisture considering gully flow [J]. *Advances in Water Science*, 2025, 36(3): 493-504. (in Chinese))
- [25] 李致家, 邓帆, 张汉辰, 等. 基于遥感土壤湿度数据的分布式水文模型参数联合率定方法[J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2026, 54(1): 1-7. (Li Zhijia, Deng Fan, Zhang Hanchen, et al. Joint calibration method of distributed hydrological model parameters based on remote sensing soil moisture data [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2026, 54(1): 1-7. (in Chinese))
- [26] 何涯舟, 张珂, 晁丽君, 等. 基于多源遥感土壤湿度与模型数据同化的流域径流模拟[J]. *水资源保护*, 2023, 39(2): 145-151. (He Yazhou, Zhang Ke, Chao Lijun, et al. Watershed runoff simulation based on multi-source remotely sensed soil moisture and data assimilation [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(2): 145-151. (in Chinese))
- [27] Liu Yuan, Qin Shujing, Cheng Lei, et al. Parameterization of the generalized complementary principle approach for evaporation using soil moisture measurements [J]. *Journal of Hydrology*, 2026, 664: 134344.

(收稿日期: 2025-10-11 编辑: 俞云利)