

中国科学引文数据库核心期刊

中文核心期刊

中国科技核心期刊

ISSN 1006-7647  
CN 32-1439/TV



河海大学 主办  
HOHAI UNIVERSITY



# 水利水电科技进展

ADVANCES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WATER RESOURCES



2024年2月

第44卷 第2期

Vol. 44 No. 2

水利水电科技进展

(1981 年创刊,双月刊)  
第 44 卷第 2 期

2024

2024 年 3 月 10 日出版

SHUILI SHUIDIAN KEJI JINZHAN

中国科学引文数据库核心期刊  
中文核心期刊(2004—2024)  
中国科技核心期刊(2003—2024)  
中国高校百佳科技期刊  
中国高校优秀科技期刊  
全国水利系统优秀科技期刊  
江苏省优秀期刊

刊名题写 钱正英

顾 问 孔宪京 王思敬 邓铭江  
卢耀如 朱尔明 吴中如 张长宽  
张建民 张超然 李华军 汪集旸  
陆佑楣 陈厚群 陈祖煜 周君亮  
姜弘道 胡四一 索丽生 贾金生  
编委会主任 徐 辉  
主 编 顾冲时  
副 主 编 苏怀智 骆 超  
责任编辑 俞云利  
英文编辑 朱 海

主 管:中华人民共和国教育部  
主 办:河海大学  
编辑出版:《水利水电科技进展》编辑部  
地 址:210098 南京市西康路 1 号  
电 话:025-83786335  
电子邮箱:jz@hhu.edu.cn  
网络地址:http://jour.hhu.edu.cn  
印 刷:江苏省地质测绘院  
发行范围:公 开  
国内发行:中国邮政集团公司江苏省分公司  
订 阅:全国各地邮局  
邮发代号:28-244  
国外发行:中国国际图书贸易总公司  
(北京 399 信箱 100048)  
国外发行代号:BM2740  
广告许可证:苏工商 3200004960327  
中国标准连 ISSN 1006-7647  
续出版物号:CN 32-1439/TV  
CODEN: SSKJAT

国内定价:15.00 元

次

· 泵站水力优化专栏 ·

深层隧道进流式泵站前池流态及整流措施研究  
..... 冯建刚,曹亚萍,王晓升,费照丹(1)  
城市排水泵站水力特性及整流措施  
..... 丁 哲,张 睿,陈毓陵,徐 辉,冯建刚,牟 童(7)

· 研究探讨 ·

水灾害和谐防控与智慧模拟研究框架与展望  
..... 左其亭,程 琰,马军霞(15)  
基于组合赋权-云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法  
..... 高玉琴,汪 键,高 见,季孔阳,刘云革,高 力(22)  
基于改进 PIV 技术的库区滑坡涌浪试验研究  
..... 孟珍珠,胡林生,沈 优,蔡崇杰,谷 静(30)  
液柱分离型水锤新空腔模型  
..... 赵 莉,范 闯,申虎贵,颜建国,杨玉思,王 彤(37)  
基于两相流的氧化沟推流器分布特性研究  
..... 王启瑞,荣 红,郑 源,陈小翠(42)

· 工程技术 ·

基于主要驱动因子筛选法和深度学习算法的浙江省动态需水量  
预测 ... 许月萍,曾田力,周欣磊,章鲁琪,王 贝,王 冬(47)  
基于浮游植物生物完整性指数的福建省水库健康状态评价  
..... 王 雪,黄锦平,苏玉萍,陈颖欣,钟启俊,郑洪萍(54)  
南水北调中线工程输水建筑物整流累积效应研究  
...陈晓楠,白一墨,胡羽蝶,曾 诚,夏悦玥,尹雨然,王玲玲(61)  
考虑渐进灾变特性的高拱坝变形性态诊断方法  
...杨 光,赵阿辉,吴邦彬,黄振栋,左良育,陈光煜,李宗儒(66)  
基于 RUN-XGBoost 算法的土石坝渗流预测模型  
..... 马春辉,侯媛媛,杨 杰,袁 帅,徐笑颜(72)  
基于遗传算法的空箱式挡土墙多目标优化设计  
..... 王 丽,徐鹏飞,刘 松,郭 瑞,徐 昕,张 康(79)  
交通荷载下煤矸石路基填料累积变形 PSO-BP 神经网络预测  
模型 ..... 张宗堂,肖天祥,高文华,杨 洋,衣利伟(87)  
基于 VMD-XGBoost-GRU 模型的危岩体变形预测  
..... 许秋鸿,刘晓青(92)  
瓜洲泵站 ..... 摄影:顾永明(封面)

# 基于改进PIV技术的库区滑坡涌浪试验研究

孟珍珠<sup>1</sup>, 胡林生<sup>2</sup>, 沈 优<sup>2</sup>, 蔡崇杰<sup>2</sup>, 谷 静<sup>2</sup>

(1. 浙江水利水电学院南浔创新研究院, 浙江 杭州 310018;

2. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223005)

**摘要:**针对滑坡涌浪试验中内部运动场数据缺乏的问题,采用改进的粒子图像测速技术搭建滑坡涌浪试验平台,选取理想黏塑性材料卡波普作为滑坡材料,通过示踪粒子荧光染色技术对滑坡体和水体两相进行区分,实现了两相内部流态的同步观测,并解析出相应的速度场矢量图,进而基于速度场数据计算了入水滑坡体质量和平均速度的变化曲线,并分析了两相耦合过程中的动量变化过程线。研究结果表明滑坡和水体两相的动量变化趋势与滑坡体入水动量具有较高的相关性,可为两相耦合的动量转换机理理论研究提供更加复杂、多元的数据支撑。

**关键词:**滑坡涌浪;粒子图像测速技术;速度场;黏塑性材料;卡波普

**中图分类号:**TV698.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7647(2024)02-0030-07

**Experimental study on landslide generated waves based on improved PIV technique//**MENG Zhenzhu<sup>1</sup>, HU Linsheng<sup>2</sup>, SHEN You<sup>2</sup>, CAI Chongjie<sup>2</sup>, GU Jing<sup>2</sup> (1. Nanxun Innovation Institute, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China; 2. Huai'an Water Conservancy Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Huai'an 223005, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of data lacking for internal dynamics in landslide surge tests, an improved particle image velocimetry technology was used to build a landslide surge test platform. A viscoplastic material called Carbopol was chosen as the landslide material. Using fluorescence seeding particles, the internal dynamics of the submerged sliding mass and body of water was obtained respectively, and then the velocity field of the two phases was estimated. Using the velocity field data, the evolution of the mass and mean velocity of the submerged sliding mass, as well as the momentum variation of the sliding mass and body of water were calculated and analyzed. The results show that there is a high correlation between the momentum change trend of landslide and water body and the momentum of landslide body entering water, providing more complex and multivariate data support for the theoretical research of momentum transformation mechanism of two-phase coupling.

**Key words:** landslide generated waves; particle image velocimetry; velocity field; viscoplastic material; Carbopol

滑坡涌浪灾害是近水滑坡诱发的一种重要的次生灾害<sup>[1]</sup>。涌浪的传播使小范围的滑坡运动破坏区变为长距离、大面积的水域波浪传播区,从而直接影响水域航道、沿岸居民及工程的安全<sup>[2]</sup>。近年来,滑坡涌浪灾害在全球范围内频发。2014年,冰岛近海岸发生2 000万m<sup>3</sup>的滑坡,引发波高超过50m的巨型海啸,造成了严重的财产损失<sup>[3]</sup>;2015年,重庆巫山发生23万m<sup>3</sup>的滑坡,引发6m巨浪,导致13艘船舶翻沉,59户居民被迫转移<sup>[4]</sup>;2017年,格陵兰岛的岩崩导致5 000万m<sup>3</sup>的滑坡体冲入Karrats水域,产生的巨型波浪蔓延32km,对沿海城市Nuugaatsiaq的基础设施造成重创<sup>[5]</sup>。

国内外学者们已采用多种方法对滑坡涌浪问题开展研究,包括物理模型试验、地理信息系统分析、水动力解析及数值计算等<sup>[6-10]</sup>,其中物理模型试验是揭示滑坡涌浪灾害影响因素、机制与规律的重要手段。基于试验数据可获得涌浪的波高、振幅、波长、最大爬升高度等参数,并建立峰值波高、峰值振幅等核心涌浪参数的经验公式<sup>[11-14]</sup>。以构建核心参数经验公式为导向的物理模型试验中,相关参数通常易于测得,测量手段包括流速计、特征点影像记录等水力学常规试验技术。此类试验技术通常仅能记录关键点过程特征,如水位变化曲线、滑坡体入水速度等,无法测得滑坡体与水体耦合的内部流态特征,因

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51909288);中国博士后科学基金项目(2021M693679);南浔青年学者项目(RC2023021192)

**作者简介:**孟珍珠(1990—),女,讲师,博士,主要从事滑坡涌浪研究。E-mail:mengzhzh@zjweu.edu.cn



而限制了滑坡体与水体两相耦合理论研究的深度。

随着计算机图像处理技术的逐渐成熟,粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术、粒子跟踪测速 (particle tracking velocimetry, PTV) 技术等流体内部流态观测技术得以不断发展。PIV 技术通过分析流场内示踪粒子的位移相关性获得流体的瞬时速度场,是目前流体力学领域最高精度、高信息量的试验技术手段之一<sup>[15]</sup>。Fritz 等<sup>[16]</sup>首次将 PIV 技术引入滑坡涌浪的物理模型试验中,并分析了涌浪形成过程中水体的内部流态。目前的滑坡涌浪 PIV 试验技术瓶颈可归纳为两个方面:①PIV 试验中滑坡材料通常选取散粒体材料,伴随散粒体材料入水的大量气泡会干扰水体内粒子的示踪效果,导致试验精度较低,进而致使试验数据分析仅停留在趋势分析上,无法进行有效的定量分析;②滑坡材料与水体的反射指数差异,导致激光照射下高反射指数的一相会对另一相产生干扰,从而难以同步观测两相的运动场<sup>[17-18]</sup>。针对第二个问题,陈小婷等<sup>[19]</sup>采用灰质颗粒初步实现了滑坡涌浪的两相运动场观测,但是由于灰质颗粒并非透明体,其观测面为靠近墙体的边缘面,无法规避边缘效应。

滑坡试验材料的选取方面,Yavari-Ramshe 等<sup>[20]</sup>根据流速、黏性和含水量对自然界中常见的滑坡(广义)进行了归纳。滑坡的滑动机制试验中,滑坡材料通常选取黏性或散粒体材料;而滑坡涌浪的试验研究中,滑坡的模拟材料以块体和散粒体材料为主,黏性材料应用较少。其中,块体早期以长方体为主,并逐渐拓展了不同形状的块体模型如楔形体、半椭圆体、三角体等;散粒体材料包括不同粒径的沙、砾石、铁粒、高分子颗粒以及各种沙包等<sup>[11-14,16-19]</sup>。在黏性滑坡滑动机制研究中,宾汉模型、Herschel-Bulkley 模型等黏塑性模型均已广泛应用,可较好地表征泥石流、泥流、火山岩流等高含水量、高黏性的广义滑坡等在斜坡上的流变特性,理想黏塑性材料如卡波普 (Carbopol)、高岭土等也广泛应用于模拟该类滑坡的滑动机制的试验研究中<sup>[21]</sup>。滑坡涌浪数值研究中,不乏学者采用黏塑性模型表征滑坡的流变特性,但由于缺乏黏塑性材料涌浪试验数据,基于黏塑性模型构建的滑坡涌浪数值模型需通过散粒体的试验数据验证其有效性,导致模型的可靠性无法得到保障<sup>[10,22-23]</sup>。针对黏性土滑坡涌浪的研究缺乏试验数据支撑的问题,Meng<sup>[24]</sup>将流变特性服从 Herschel-Bulkley 方程的理想黏塑性材料卡波普引入滑坡体涌浪试验研究中,讨论了该材料应用于滑坡涌浪试验的相似率及试验假设的有效性,随后研究了黏塑性材料诱发涌浪的特点<sup>[25-26]</sup>,

并对比分析了黏塑性材料、散粒体材料和黏塑性-散粒混合材料产生涌浪的差异<sup>[27-28]</sup>,但是尚未探明黏塑性材料和水体两相耦合的运动场特征。

本文采用黏塑性材料卡波普作为试验材料,基于 PIV 技术搭建滑坡涌浪试验平台,通过示踪粒子染色技术改进 PIV 试验方法,同步获得了滑坡体和流体两相的速度场,并基于速度场求解滑坡体的水下平均速度及两相动量变化过程线,以验证试验方法的有效性,可为后续黏塑性材料和水体两相耦合的力学机理研究及理论模型构建提供数据支撑。

## 1 试验方法

### 1.1 PIV 技术

PIV 技术是一种瞬时、高精度的流体空间测速方法,可以捕获观测面上的大量质点的瞬时速度,进而分析出流场的速度特性和空间结构,其工作原理如图 1 所示。首先,在流体中均匀散播反光性较好且与流体具有相同密度的示踪粒子颗粒;其次,通过光学镜片将激光由点光源调整为线光源,并照亮待测流体的切面区域;再次,通过高速相机连续曝光和拍摄示踪粒子的分布图像;最后,通过相邻帧图像关联获得给定小区域中示踪粒子的平均位移,从而计算出粒子的速度场。示踪粒子对流体的运动具有跟随性,因此其流场特征与流体相同。

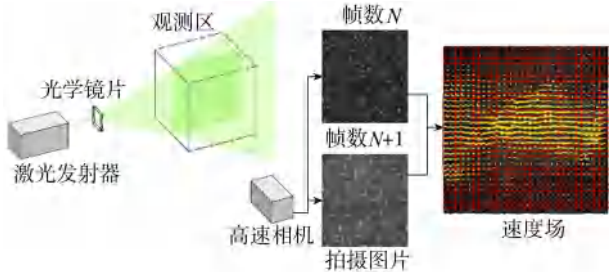


图 1 PIV 技术原理示意图

### 1.2 滑坡试验材料

滑坡材料采用透明水溶性复合高分子材料卡波普,该材料近年来已被广泛用于模拟黏性土滑坡,并已应用于滑坡涌浪试验研究中<sup>[22-24]</sup>。卡波普由 NaOH、高分子材料 Ultrez 10 和水搅拌溶解配置,其密度与水体近似,本构方程符合 Herschel-Bulkley 方程:

$$\tau = \tau_c + K\gamma^n \quad (1)$$

式中: $\tau$  为剪切应力; $\tau_c$  为屈服应力; $K$  为黏度系数; $\gamma$  为剪切速率; $n$  为流动行为指数,反映材料的流动特性。当  $n = 1$  时,其本构模型退化为 Bingham 模型;当  $n < 1$  或  $n > 1$  时,分别反映流体的剪切稀化或稠化现象。卡波普的流变特性主要受其浓度影响,本文采用质量分数为 2.0 % 的卡波普, $\tau_c = 58\text{Pa}$ ,

1.3 基于改进 PIV 技术的试验系统搭建

如图 2 所示,滑坡试验水槽包括两部分:一是长 1.5 m、宽 0.12 m、坡度可调节范围为 30°~50°的 PVC 材质斜坡;二是水平放置的长 2.5 m、深 0.4 m、宽 0.12 m 的透明玻璃水槽。斜坡上设置垂直于坡面的控制门。初始状态下,滑坡材料放置于控制门后方。控制门通过气动阀门控制,能够以 2.5 m/s 的速度迅速开启。控制门开启后,滑坡材料受重力作用沿斜坡下滑并冲入水中。

PIV 系统应用于滑坡涌浪试验存在两个问题:一是常规的 PIV 试验装置通常将激光系统和用于光线调整的光学器件安装于水槽底部,光线经角锥或棱镜等光学器件调整由线状变为以器件为顶点的三角面,随后照射入水中,由于滑坡涌浪试验中水深通常小于 0.5 m,水深限制了激光照射面的扩大,从而导致观测区范围受限;二是由于滑坡材料和水的反射指数的差异,滑坡材料中的示踪粒子在高速相机中成像的亮度远大于水体中的示踪粒子,当水体中的示踪粒子为可视状态时,滑坡材料中的示踪粒子的成像为大规模耀斑,无法区分单个粒子;而当滑坡材料中的示踪粒子为可视状态时,水体中的示踪粒子则因过暗而无法在高速相机中成像,导致实际操作中难以实现两相运动场同步观测。

针对水面折射导致的观测面积不足的问题,将激光发射器安装于水槽尾部,并通过组合安装角锥、聚焦镜片等光学器件调整观测区,且激光光线照射切面为水槽中轴线。通过计算分析光线经过各光学器件的焦距,在水槽尾部依次安装波长为 527 nm、最大输出功率为 300 W 的连续型激光发射器(Ⅰ),焦距为 90 mm 的圆形聚焦镜片(Ⅱ),扩散角度为 30°的角锥(Ⅲ),焦距为 200 mm 的垂向聚焦镜片(Ⅳ),焦距为 2.5 m 的横向聚焦镜片(Ⅴ)。各器件布设位置如图 2 所示。器件Ⅰ到Ⅴ的横向间距分别为 7、2、4、8 cm。相较于常规的激光系统置于水槽底部的 PIV 布设方案,本文的布设方案可使激光照射面有效覆盖高于静水面的波浪区域,并可有效增加观测区的横向观测范围。

1.4 滑坡-水体速度场同步观测方法

为解决滑坡体和水体的反射率差异导致的耀斑问题,通过在滑坡材料和水中加入两种不同的示踪粒子,并采用感光度不同的两个高速相机同时拍摄,实现了两相运动场的同步采集。在卡波普和水中分别散播无毒无腐蚀且性质稳定的 20 μm 和 50 μm 的聚苯乙烯微球作为示踪粒子,该粒子的密度与水体相同,既可均匀悬浮在水体内,又可均匀混于卡波普

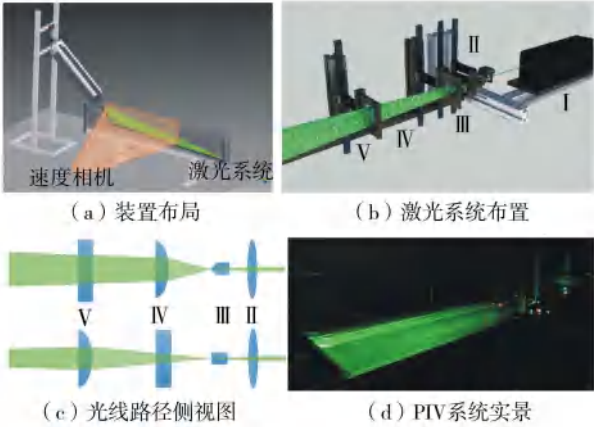


图 2 PIV 系统结构

材料中。其中,用于示踪卡波普流态的 20 μm 聚苯乙烯微球粒子需通过与荧光染料罗丹明 B 进行混合、烘干和蒸馏等步骤处理,使粒子具有荧光特性,从而在橙色滤镜下具有可视性。用于示踪水体流态的 50 μm 聚苯乙烯微球粒子不需要进行额外处理。卡波普运动过程由加装橙色滤镜的彩色高速相机拍摄,相机拍摄频率为 400 Hz、分辨率为 600×800 像素。水体由黑白高速相机拍摄,相机拍摄频率为 400 Hz,分辨率为 1 280×1 024 像素。

图 3(a)为彩色相机拍摄的试验图片,由于彩色相机增加了橙色滤镜且卡波普内添加了荧光染色的示踪粒子,卡波普内的示踪粒子为金黄色斑点成像且清晰可见;水体中示踪粒子未进行荧光染色,水体内的示踪粒子无法被带有橙色滤镜的相机捕获,在相机观测中不可视,因此在该相机中无法示踪水体内部流态。图 3(b)为黑白相机拍摄的试验图片,水体中的示踪粒子清晰可见;由于卡波普及其内示踪粒子反射率较高,在相机中成白色耀斑,因此在该相机中无法示踪卡波普内部流态。由于示踪粒子对流体运动具有跟随性,因此示踪粒子的运动场与流体相同。

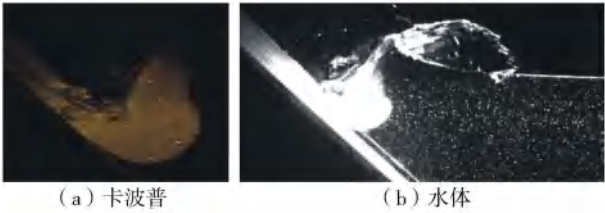


图 3 PIV 系统拍摄的试验图片

2 滑坡-水体两相速度场解析

滑坡-水体两相速度场解析步骤如下:①通过 Matlab 对 PIV 系统记录的原始图片进行预处理,自动识别出反应区,并剔除反应区以外的亮斑。②使用 MatPIV 工具箱对预处理后的图片进行解析,选取 32×32 像素的查询窗口,相邻窗口之间设置 50% 的



重叠区。为降低矢量速度场的误差,采用范围验证滤波器剔除所有大于 3m/s 的速度矢量值,并使用移动平均线验证滤波器,用插值代替偏离其周围  $3 \times 3$  像素矢量场平均值 15% 的数据。③将解析获得的矢量速度场图叠加在高速相机拍摄的原始图片上。本文以其中一组试验为例,展示卡波普和水体两相的矢量运动场,初始参数如下:静水深为 0.2 m,斜坡角度为  $45^\circ$ ,卡波普初始质量为 3.5 kg,气动阀门到静水面的长度为 0.75 m。将卡波普前端接触到静水面的时间定义为初始时间,即  $t=0$  s。

图 4 为示例试验中卡波普入水后在不同时间节点的速度场,每间隔 0.1 s 选取 1 个时间节点,即  $t$  分别取 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 s,红色箭头为速度矢量,箭头方向代表速度方向,箭头长度代表速度大小,箭头越长则速度越大。为了更清晰地展示速度场数据,将速度矢量图叠加在 PIV 系统拍摄的原始图片上。滑坡体内示踪粒子速度区间为  $0 \sim 1.2$  m/s,每个矢量箭头所在的方格对应的实际尺寸为  $0.114\text{ cm} \times 0.114\text{ cm}$ 。卡波普入水之后首先沿斜坡坡面运动,然后受静水压力的作用,在  $t=0.1$  s 时出现明显的向上弯曲,且越靠近卡波普与水体的交界面卡波普的速度越大,且弯曲程度越大。在  $t=0.2$  s 时,卡波普内部的速度场分化为底部和顶部两个区域,底部区域继续沿坡面下滑,顶部区域停止向前运动并产生堆积,底部区域的速度整体大于顶部区域。自  $t=0.3$  s 起,卡波普的顶部区域开始向

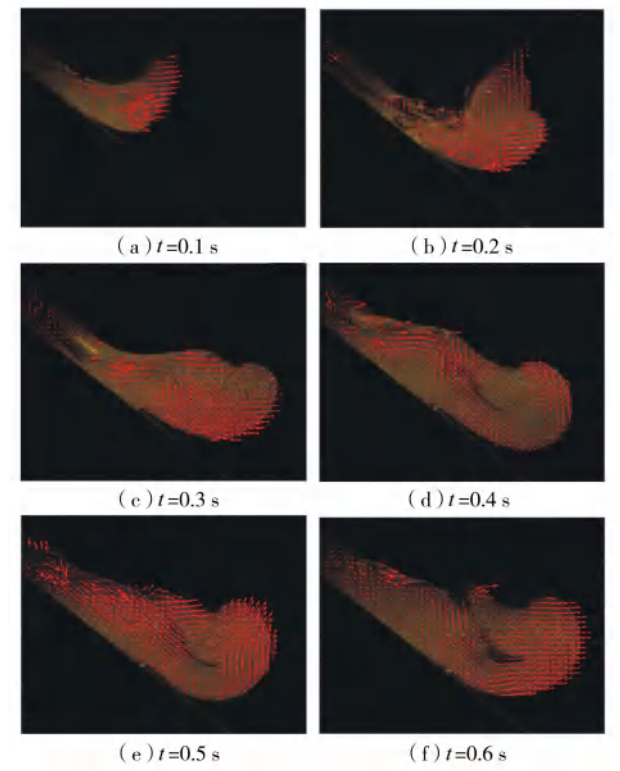


图 4 入水滑坡体速度场

岸边方向运动,而底部区域继续向远离岸边的方向运动,导致卡波普内部形成涡旋结构。

图 5 为示例试验中水体在不同时刻的速度场,此时水体内部示踪粒子速度区间为  $0 \sim 2.5$  m/s,每个速度矢量箭头所在的方格对应的实际尺寸为  $0.024\text{ cm} \times 0.024\text{ cm}$ 。在滑坡体入水和涌浪波产生及衰落的过程中,水体位移主要发生在卡波普前方区域,并朝远离岸边的方向运动和衰减。涌浪波的主要形成机理是滑坡体与水体的动量转换,试验中低于卡波普底部的水体未观测到明显位移,说明滑坡和水体的动量转换主要发生在两相接触面,即涌浪波的波高主要取决于入水滑坡体的动量,水深对波高影响有限。卡波普入水后的 0.2 s 内,水体受卡波普的挤压和冲击作用形成涌浪波,波浪高度呈非线性;随后,涌浪波受重力作用回落,向远离岸边的方向传播并逐渐衰减,传播过程中越靠近水面区域速度越大,且水体内部未出现明显的紊流。

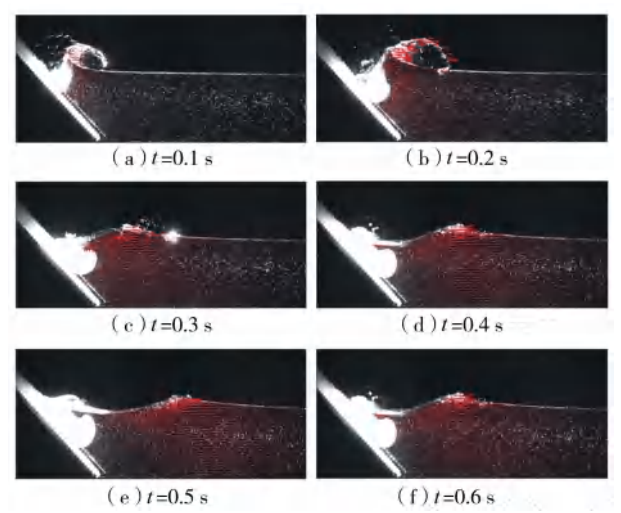


图 5 水体速度场

### 3 基于速度场的滑坡-水体运动特征

#### 3.1 入水滑坡的运动特征

常规的滑坡涌浪试验研究通常通过滑坡体的速度、质量、厚度等参数,构建最大波高、最大相位等涌浪波参数的预测公式。由于试验方法的局限性,仅能测得滑坡体入水时的瞬时速度,而无法测得其入水后的速度和质量随时间变化的过程线,因此滑坡体的速度通常简化为入水时刻的瞬时速度,滑坡体的质量通常简化为初始质量。本文通过改进 PIV 技术获得的滑坡体运动矢量场,可以解析出其速度和质量的 变化过程线。在 PIV 矢量速度场中,任意查询窗口流体质量  $\Delta m_i$  及任意选定区域流体质量  $M$  的计算公式如下:

$$\Delta m_i = \rho w \Delta S \tag{2}$$

$$M = \rho w \sum_{i=1}^a \Delta S \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为流体密度;  $w$  为水槽宽度;  $\Delta S$  为查询窗口的面积;  $i$  为查询窗口的编号;  $a$  为选定区域包含的查询窗口数量。任意选定区域平均速度矢量  $\mathbf{V}$  及其在水平方向和垂直方向的分量 ( $u, v$ ) 的计算公式为

$$\mathbf{V} = (u, v) = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a \Delta \mathbf{V}_i \quad (4)$$

$$u = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a \Delta u_i \quad (5)$$

$$v = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a \Delta v_i \quad (6)$$

式中:  $\Delta \mathbf{V}_i$  为第  $i$  个查询窗口的速度矢量;  $\Delta u_i$  为第  $i$  个查询窗口速度矢量的水平方向分量;  $\Delta v_i$  为第  $i$  个查询窗口速度矢量的垂直方向分量。

图 6 为示例试验入水滑坡体的质量  $M_s$ 、水平方向平均速度  $u_s$  和垂直方向平均速度  $v_s$  随时间变化的过程线。可见  $M_s$  随时间增大而增大, 但其增速逐渐趋缓。滑坡体入水后的水平方向速度以沿静水面远离坡岸为正方向, 垂向速度以垂直静水面向下为正方向。  $u_s$  和  $v_s$  在  $0s < t < 0.28s$  均随时间增大而增大, 自  $t = 0.28s$  起随时间增大而减小。滑坡体入水后水平方向速率值大于垂直方向,  $u_s$  的最大值为  $0.62 \text{ m/s}$ ,  $v_s$  的最大值为  $0.25 \text{ m/s}$ 。在  $u_s$  和  $v_s$  达到极值时,  $M_s$  为  $0.86 \text{ kg}$ 。由于本文采用的滑坡试验材料为黏塑性材料, 黏塑性材料本身的黏性导致部分材料在沿斜坡滑动过程中滞留在坡面上。由图 6 可知, 在  $t = 0.6s$  时, 滑坡体入水诱发的涌浪已经衰减, 而该时刻仅  $1.75 \text{ kg}$  滑坡材料进入水中, 其余部分仍滞留在坡面上。在  $u_s$  和  $v_s$  达到极值时实际入水的滑坡质量仅为  $0.86 \text{ kg}$ , 因此可认为实际作用于滑坡体与水体动量转换过程的滑坡材料的有效质量仅为  $0.86 \text{ kg}$ , 而滑坡体在斜坡上的初始质量为  $3.5 \text{ kg}$ , 有效质量占初始质量比为  $24.5\%$ 。

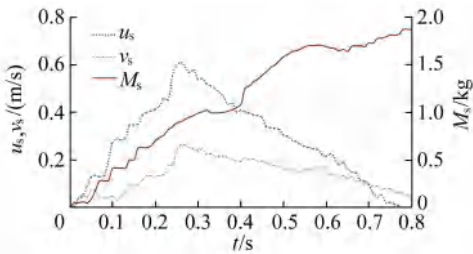


图 6 入水滑坡体的质量及平均速度过程线

### 3.2 滑坡-水体的动量转换

滑坡体在入水的过程中和水体发生动量转换, 从而推动水体产生位移, 滑坡体与水体两相的边界面随着滑坡体的入水逐渐向远离岸边的方向推进。

由图 5 可以观察到, 在滑坡体的推动下, 动态水体 (速度非零) 的区域逐渐扩大, 动态水体和静态水体 (速度为零) 之间形成一个虚拟的边界面, 该边界面逐渐向远离坡岸的方向推进。如图 7 所示, 在滑坡体进入水体后出现两个边界面: 一是滑坡体与水体的接触面, 即第一边界面; 二是动态水体与静止水体的接触面, 即第二边界面。两个边界面和水体-空气边界面将滑坡涌浪的观测区划分为 3 个区域: 入水滑坡体 (I 区域)、动态水体 (II 区域) 和静止水体 (III 区域)。滑坡涌浪过程为复杂的两相流耦合问题, 其力学本质为滑坡体与水体的动量转换, 为降低数学分析的复杂度, 该物理过程可简化为 I 区域和 II 区域的动量转换过程。区分 II 区域的范围是量化动态水体体积及水体动量变化过程线的必要步骤, 对两相动量转换机制研究具有重要意义。第一边界面可在高速相机记录的原始图片 (图 3) 中直接识别, 而第二边界面无法在原始图片中直接识别。水体速度场 (图 5) 中, 相邻查询窗口的水体速率呈渐变式递增或递减变化, 将小于  $0.01 \text{ m/s}$  的速率值定义为  $0 \text{ m/s}$ , 则速率小于  $0.01 \text{ m/s}$  的查询窗口区域可认为是静态水体。因此, 可通过速度场数据识别出速度非零的动态水体和速度为零的静态水体的边界面。

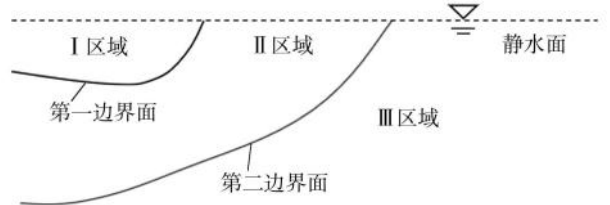


图 7 I 区域、II 区域和 III 区域示意图

基于 PIV 技术可获得流体内部全区域的速度变化过程, 通过速度场的矢量图可以实现全区域速度的可视化。由于滑坡体和水体两相耦合的基本力学机理可简化为入水滑坡体 (I 区域) 和动态水体 (II 区域) 的动量转换过程, 本文基于卡波普和水体的矢量速度场分别计算了 I 区域和 II 区域的动量随时间变化过程线。其中, 水平方向以沿静水面远离坡岸为正方向, 垂直方向以垂直静水面向下为正方向。任意选定区域流体动量表达式的一般形式为

$$\mathbf{P} dt = M \mathbf{V} dt \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{P}$  为选定区域流体动量;  $t$  为时间。

滑坡体动量  $\mathbf{P}_s$  和水体动量  $\mathbf{P}_f$  的表达式分别为

$$\mathbf{P}_s = \Delta m_s \sum_{i=1}^{a_s} \Delta \mathbf{V}_{s,i} \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_f = \Delta m_f \sum_{i=1}^{a_f} \Delta \mathbf{V}_{f,i} \quad (9)$$

式中:  $i, j$  分别为入水滑坡体和动态水体的查询窗口

编号; $\Delta m_s$ 、 $\Delta m_f$  分别为单个查询窗口滑坡体和水体的质量; $\Delta V_{s,i}$  为入水滑坡体在第  $i$  个查询窗口速度矢量值; $\Delta V_{f,j}$  为水体第  $j$  个查询窗口速度矢量; $a_s$ 、 $a_f$  分别为滑坡体和动态水体查询窗口的总数量。滑坡体动量  $\mathbf{P}_s$  在水平方向的分量  $P_{s,x}$  和垂直方向的分量  $P_{s,y}$  以及水体动量  $\mathbf{P}_f$  在水平方向分量  $P_{f,x}$  和垂直方向分量  $P_{f,y}$  分别为

$$P_{s,x} = \sum_{i=1}^{a_s} \Delta m_s \Delta u_{s,i} \quad (10)$$

$$P_{s,y} = \sum_{i=1}^{a_s} \Delta m_s \Delta v_{s,i} \quad (11)$$

$$P_{f,x} = \sum_{j=1}^{a_f} \Delta m_f \Delta u_{f,j} \quad (12)$$

$$P_{f,y} = \sum_{j=1}^{a_f} \Delta m_f \Delta v_{f,j} \quad (13)$$

式中: $\Delta u_{s,i}$ 、 $\Delta v_{s,i}$  分别为入水滑坡体第  $i$  个查询窗口速度矢量在水平方向和垂直方向的分量; $\Delta u_{f,j}$ 、 $\Delta v_{f,j}$  分别为动态水体第  $j$  个查询窗口速度矢量在水平方向和垂直方向的分量。

如图 8 所示,伴随着滑坡体的入水过程,入水滑坡体动量的水平方向和垂直方向的分量均不断增大, $P_{s,x}$  在  $t=0.30\text{ s}$  达到最大值, $P_{s,y}$  在  $t=0.29\text{ s}$  达到最大值,随后动量值随着入水滑坡体趋于静止逐渐减小。 $u_s$  和  $v_s$  分别在  $t=0.28\text{ s}$  和  $t=0.25\text{ s}$  达到最大值,因此动量达峰值的时间略早于速度达到峰值的时间。在入水滑坡体的推动下, $P_{f,x}$  和  $P_{f,y}$  均不断增大, $P_{f,x}$  在  $t=0.45\text{ s}$  达到最大值, $P_{f,y}$  在  $t=0.32\text{ s}$  达到最大值,随后动量值随着涌浪波的衰减逐渐减小。

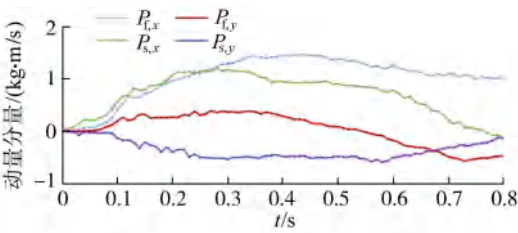


图 8 入水滑坡体和水体两相动量随时间变化过程线

## 4 结 论

a. 利用斜坡、水槽、高速相机、激光器等搭建了滑坡涌浪试验的 PIV 系统,并通过角锥、聚焦镜等光学器件的组合设计实现了观测区在 PIV 系统中的高清成像。

b. 采用理想黏塑性材料卡波普作为滑坡材料,通过示踪粒子荧光染色技术和双高速相机搭配,实现了两相内部流态的同步观测,并解析出相应的速度场,使两相耦合的全过程实现可视化。

c. 基于速度场计算了入水滑坡的质量和平均速度的变化曲线,并得到了两相耦合过程中的动量变化过程线,可为滑坡涌浪相关动力学的深入研究提供更加复杂、多元的数据支撑。

## 参考文献:

- [1] 徐文杰. 滑坡涌浪流-固耦合分析方法与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7): 1420-1433. (XU Wenjie. Fluid-solid coupling method of landslide tsunamis and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(7): 1420-1433. (in Chinese))
- [2] 汪洋, 殷坤龙. 水库库岸滑坡涌浪的传播与爬高研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1031-1034. (WANG Yang, YIN Kunlong. Research on propagation and climb height of surge triggered by landslide in reservoir [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1031-1034. (in Chinese))
- [3] GYLFAÐOTTIR S S, KIM J, HELGASON J K, et al. The 2014 Lake Askja rockslide induced tsunami: optimization of numerical tsunami model using observed data [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2017, 122(5): 4110-4122.
- [4] HUANG B, YIN Y, DU C. Risk management study on impulse waves generated by Hongyanzi landslide in Three Gorges Reservoir of China on June 24, 2015 [J]. Landslides, 2016, 13(3): 603-616.
- [5] GAUTHIER D, ANDERSON S A, FRITZ H M, et al. Karrat Fjord (Greenland) tsunamigenic landslide of 17 June 2017: initial 3D observations [J]. Landslides, 2018, 15(2): 327-332.
- [6] 肖莉丽, 王佳佳, 李枝强, 等. 考虑滑体-水体相互作用的滑坡涌浪产生过程动力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(12): 2404-2416. (XIAO Lili, WANG Jiajia, LI Zhiqiang, et al. Research on dynamic models of landslide tsunami generation considering slide/water interactions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(12): 2404-2416. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 郑飞东, 王平义, 李云. 滑坡体散体化对涌浪波动特征的影响[J]. 水科学进展, 2022, 33(5): 826-834. (ZHENG Feidong, WANG Pingyi, LI Yun. Effect of landslide disintegration on free-surface characteristics of landslide-generated waves [J]. Advances in Water



Science, 2022, 33(5): 826-834. (in Chinese))

[ 9 ] 徐卫亚,秦创创,张贵科,等. 基于分流比的复杂分汊河道滑坡涌浪远场传播计算方法[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 ( 3 ): 20-24. ( XU Weiya, QIN Chuangchuang, ZHANG Guike, et al. Calculation method for far-field propagation of landslide surge based on flow diversion ratio of a bifurcated river[J]. Advances Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3): 20-24. (in Chinese))

[10] 黄瑞启,黄筱云,张少强,等. 水上滑坡冲击涌浪的远场传播特征数值模拟分析[J]. 水利水电科技进展,2023, 43 ( 1 ): 36-42. ( HUANG Ruiqi, HUANG Xiaoyun, ZHANG Shaoqiang, et al. Numerical simulation analysis on far-field propagation characteristics of impulse waves generated by subaerial landslides [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (1):36-42. (in Chinese))

[11] ATAIE-ASHTIANI B, NIK-KHAH A. Impulsive waves caused by subaerial landslides [ J ]. Environmental Fluid Mechanics, 2008, 8(3): 263-280.

[12] ZITTI G, ANCEY C, POSTACCHINI M, et al. Impulse waves generated by snow avalanches: momentum and energy transfer to a water body [ J ]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2016, 121(12): 2399-2423.

[13] HELLER V, HAGER W H. Impulse product parameter in landslide generated impulse waves [ J ]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2010, 136(3): 145-155.

[14] MCFALL B C, MOHAMMED F, FRITZ H M, et al. Laboratory experiments on three-dimensional deformable granular landslides on planar and conical slopes [ J ]. Landslides, 2018, 15(9): 1713-1730.

[15] ADRIAN R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics [ J ]. Annual Review of Fluid Mechanics, 23(1): 261-304.

[16] FRITZ H M, HAGER W H, MINORH E. Landslide generated impulse waves [ J ]. Experiments in Fluids, 2003, 35(6): 505-519.

[17] VIROULET S, SAURET A, KIMMOUN O, et al. Granular collapse into water: toward tsunami landslides [ J ]. Journal of Visualization,2013, 16(3):189-191.

[18] MULLIGAN R P, TAKE W A. On the transfer of momentum from a granular landslide to a water wave[J]. Coastal Engineering, 2017, 125: 16-22.

[19] 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))

[20] YAVARI-RAMSHE S, ATAIE-ASHTIANI B. Numerical modeling of subaerial and submarine landslide-generated tsunami waves: recent advances and future challenges[J]. Landslides, 2016, 13(6): 1325-68.

[21] ANDREIN I N, EPELY-CHAUVIN G, ANCEY C. Internal dynamics of Newtonian and viscoplastic fluid avalanches down a sloping bed [ J ]. Physics of Fluids, 2012, 24(5): 053101.

[22] CREMONESI M, FRANGI A, PEREGO U. A Lagrangian finite element approach for the simulation of water-waves induced by landslides[J]. Computers & Structures,2011, 89(11/12):1086-1093.

[23] ZHA O L, MAO J, BAI X, et al. Finite element simulation of impulse wave generated by landslides using a three-phase model and the conservative level set method [ J ]. Landslides,2016,13(1):85-96.

[24] MENG Z. Experimental study on impulse waves generated by a viscoplastic material at laboratory scale [ J ]. Landslides, 2018, 15(6): 1173-1182.

[25] MENG Z,LI X,HAN S,et al. The motion and deformation of viscoplastic slide while entering a body of water[J]. J Mar Sci Eng,2022(10): 778.

[26] MENG Z,ZHANG J,HU Y,et al. Temporal prediction of landslide-generated waves using a theoretical-statistical combined method[J]. J Mar Sci Eng, 2023(11): 1151.

[27] MENG Z, ANCEY C. The effects of slide cohesion on impulse-wave formation [ J ]. Experiments in Fluids, 2019, 60(10): 1-4.

[28] MEN G Z, HU Y, ANCEY C. Using a data driven approach to predict waves generated by gravity driven mass flows[J]. Water, 2020, 12(2): 600.

( 收稿日期:2023 -04 -15 编辑:骆超)

( 上接第 29 页)

[32] 刘常昱,冯芒,戴晓军,等. 基于云 X 信息的逆向云新算法[J]. 系统仿真学报,2004,16(11):2417-2420. ( LIU Changyu, FENG Mang, DAI Xiaojun, et al. A new algorithm of backward cloud [ J ]. Journal of System Simulation,2004,16(11):2417-2420. (in Chinese))

[33] XU Changlin, WANG Guoyin, ZHANG Qinghua. A new multi-step backward cloud transformation algorithm based on normal cloud model [ J ]. Fundamenta Informaticae, 2014,133(1):55-85.

[34] 杨洁,王国胤,刘群,等. 正态云模型研究回顾与展望 [ J ]. 计算机学报,2018,41(3):724-744. ( YANG Jie, WANG Guoyin, LIU Qun, et al. Retrospect and prospect of research of normal cloud model [ J ]. Chinese Journal of Computers,2018,41(3):724-744. (in Chinese))

( 收稿日期:2023 -04 -01 编辑:俞云利)