

散粒体滑坡涌浪运动特征与能量转化规律研究

王佳佳, 陈浩, 肖莉丽, 李枝强, 许昕, 向宇恒, 车思璐

A study of the kinematic characteristics and energy conversion of waves generated by granular landslide

WANG Jiajia, CHEN Hao, XIAO Lili, LI Zhiqiang, XU Xin, XIANG Yuheng, and CHE Silu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202207022>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

正反粒序结构条件下滑坡堰塞坝破坏模式研究

A study of the failure mode of landslide dam under the structural conditions of positive and reverse grain sequences

吴茂林, 罗刚, 高延超, 陈西南, 翟新乐 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 124-132

不同加固技术在散粒体斜坡表层的应用对比研究

Research on the effect of different reinforcement methods on the surface of a granular slope

杨晴雯, 裴向军, 吴梦秋, 常志璐 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 139-139

基于物理模型试验的碎屑流流态化运动特征分析

An analysis of flow-like motion of avalanches based on physical modeling experiments

龙艳梅, 宋章, 王玉峰, 程谦恭, 李坤, 吴越 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 126-136

岩体结构对岩质滑坡运动过程和堆积特征的影响研究

A Study of the influence of rock mass structure on the propagation processes and deposit characteristics of rockslides

张恩铭, 程谦恭, 林棋文, 谢宇, 王玉峰, 姚志勇, 孙先锋 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 125-135

碎屑集合体撞击与停积过程的运动学特征研究

Study on kinetic characteristics of the collision and emplacement of grains aggregation

刘世涛, 程谦恭, 林棋文, 姚志勇, 孙先锋, 邓凯丰, 刘道胜, 王进华 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 140-150

基于能量耗散机制的粗粒土圆度损伤特性分析

Analyses of roundness damage characteristics of coarse-grained soil based on energy dissipation mechanism

何亮, 魏玉峰, 潘远阳, 雷壮 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 120-126



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202207022

王佳佳, 陈浩, 肖莉丽, 等. 散粒体滑坡涌浪运动特征与能量转化规律研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(4): 160-172.
WANG Jiajia, CHEN Hao, XIAO Lili, *et al.* A study of the kinematic characteristics and energy conversion of waves generated by granular landslide[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 160-172.

散粒体滑坡涌浪运动特征与能量转化规律研究

王佳佳, 陈浩, 肖莉丽, 李枝强, 许昕, 向宇恒, 车思璐
(长安大学公路学院, 陕西 西安 710000)

摘要: 滑坡涌浪灾害造成的伤亡和损失一般远超滑坡灾害本身, 已引起广泛关注。针对该类灾害的预测评价一直是研究的难点, 精细刻画滑坡涌浪运动特征和能量转化规律是解决问题的关键和前提。因此, 以天然碎石模拟散粒体滑坡, 建立缩尺的矩形水槽滑坡涌浪三维物理试验模型, 研究滑坡体积、速度和水深对堆积体形态和涌浪特征的影响以及滑体与水体能量转化规律。研究结论包括: (1) 滑体通过冲击、挤压和抬升水体形成涌浪的特征受滑体规模和形态影响显著; 厚度大且速度快的滑体趋向产生非线性过渡波, 厚度小且速度低的滑体一般产生非线性震荡波; (2) 基于试验提出的体积效应和速度效应揭示了一定水深的涌浪规模与滑坡体积和速度呈正相关规律, 水深效应则解释了一定波能的涌浪在波形和速度上的分布差异, 结果表明浅水比深水工况涌浪高度平均高出 67%、波速平均高出 51.17%; (3) 基于试验的数值反演总结了滑体势能与波能转化率为 1.00% ~ 3.07%, 由于三维试验中滑体与水体在水平和环向的扩散造成更多能量耗散, 相较二维试验转化率较低。通过探讨散粒体滑坡运动过程和首浪产生、传播及爬高特征, 揭示滑体-水体能量转化基本规律, 研究成果对滑坡涌浪防灾减灾工作具有一定的理论价值和意义。

关键词: 散粒体滑坡涌浪; 物理模型试验; 水/土相互作用; 运动学特征; Tsunami Squares 方法; 能量转化规律

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)04-0160-13

A study of the kinematic characteristics and energy conversion of waves generated by granular landslide

WANG Jiajia, CHEN Hao, XIAO Lili, LI Zhiqiang, XU Xin, XIANG Yuheng, CHE Silu
(School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi, 710000, China)

Abstract: The consequences of landslide waves are far beyond the landslide itself that has attracted widespread attention. The prediction and evaluation of this kind of disaster has always been difficult, and the precise description of landslide surge motion characteristics and energy conversion law is the key and premise to solve the problem. In this paper, we use gravel to mimic granular landslide and establish a 3D landslide wave model in a rectangular flume, aiming to analyze how the landslide volume, velocity and water depth affect landslide accumulation, wave characteristics and energy conversion. The results show that (1) the waves generated by solid impacting the water are affected by the landslide size and shape. Slides with larger thickness and faster speed tend to produce nonlinear transition wave, and thin and slow slides generally produce nonlinear oscillation wave.

收稿日期: 2022-07-22; 修订日期: 2022-10-28

投稿网址: www.swdggcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41907237; 41907234); 国家重点研发计划项目(2019YFB1600702; 2021YFB1600302); 云南省科技厅科技项目(云交科 2018-12)

第一作者: 王佳佳(1988-), 男, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害动力学研究。E-mail: jwang@chd.edu.cn

通讯作者: 肖莉丽(1985-), 女, 博士, 副教授, 主要从事滑坡涌浪灾害动力学研究。E-mail: llxiao@chd.edu.cn

(2) The volume effect and velocity effect based on the test reveal that the surge scale of a certain water depth is positively correlated with the landslide volume and velocity. The water depth effect explains the differences of waveform and velocity under a certain wave energy. Statistic results show that under the shallow water conditions, surge height on average is 67% higher and wave speed on average is 51.17% higher than those under the deep water conditions. (3) The conversion rate between landslide energy and wave energy ranges from 1.00% to 3.07%. 3D experiments encounter more energy dissipation due to diffusion and its conversion rate is lower than that in the 2D experiments. This study discusses the kinematic characteristics of granular landslide, first wave generation, propagation and inundation, and proposes the basic law of energy conversion between landslide and water. It is of certain value and significance for landslide wave hazard prevention and mitigation.

Keywords: granular landslide generated waves; physical model experiment; water/slide interactions; kinematic features; Tsunami Squares method; energy conversion law

大型水库运行过程中库水位一般经历周期性涨落, 易造成库岸边坡失稳, 产生水库滑坡涌浪灾害^[1-3]。滑坡涌浪是近水岸岩土体失稳后高速冲击水体产生的一类水库滑坡次生灾害, 具有成灾时间短、灾害强度大, 影响范围广等特点, 其破坏性远超滑坡灾害本身^[4]。国内外水库滑坡失稳诱发涌浪灾害的案例时有发生, 例如, 1958 年美国沿着费尔韦瑟断层发生的 8.3 级地震引发了一次重大冰川滑坡灾害, 巨量岩土体高速撞击水面引发浪高达 524 m 的巨大海啸, 导致 2 人死亡^[5]。2007 年湖北大堰塘水库蓄水至 342 m 时突发 $300 \times 10^4 \text{ m}^3$ 岩土体崩落灾害, 滑坡冲击水体产生涌浪在对岸的爬高达到 50 m, 造成水库沿岸 1 人死亡和 6 人失踪^[6]。2015 年巫山大宁河与巫峡交汇口东岸发生 $23 \times 10^4 \text{ m}^3$ 红岩子滑坡, 岩土体冲击水体在对岸产生约 6 m 的爬坡浪高, 造成 2 人死亡以及数千游客滞留^[7]。近年来, 随着我国水利水电设施的大规模建设运行, 国内报道的库岸滑坡涌浪灾害愈发频繁, 普遍造成了巨大的经济损失, 严重威胁着人民生命和财产安全, 引起社会和学界的广泛关注^[8]。因此, 滑坡涌浪灾害研究亟须发展相关理论和科学应对措施。

目前, 国内外开展滑坡涌浪研究的主要手段包括野外调查、理论计算、数值分析和物理模型试验等。滑坡涌浪具有突发性、短历时性、复杂性等特征, 灾害现场的涌浪调查数据一般难以获取^[9]。一些学者基于理论推导提出半经验性的滑坡涌浪预测公式。由于经验公式是采用多因素相关性统计分析提出的成果, 对滑体/水体相互作用力学机制考虑不足, 在涌浪传播方面忽略了能量损失和非线性边界等问题, 导致这些经验公式预测精度普遍较低。

数值模拟方法是国内外研究滑坡涌浪灾害的重

要手段之一。滑坡涌浪的数值模拟需要分别考虑滑体和流体运动的建模, 研究中涉及滑体、水体与空气之间的耦合作用, 需要考虑多相介质在空间上的相互浸入, 很大程度增加了数值方法构建的难度。目前, 大部分数值方法都对研究对象进行了不同程度地简化, 例如 Long-wave 理论假设波浪水平方向的运动规模要远大于水深^[10], Boussinesq 方程在此基础上考虑了波浪的色散现象^[11]。完全求解三维 Navier-Stokes (N-S) 方程的数值方法能够获取精度较高的模拟结果, 但是 N-S 方程从拉格朗日描述转化为欧拉描述时派生出来具有二阶非线性的对流项使得计算时间成本巨大, 难以应用于大范围流体场景^[12]。肖莉丽^[13]提出的 Tsunami Squares (TS) 方法基于流体各项均质、不可压缩和深度平均的假设, 通过两套网格进行数值计算且严格遵守动量守恒和质量守恒定律。该方法在保证较高计算精度的同时极大降低计算时间成本, 很好地克服了以上问题, 具有良好的应用前景^[14-16]。

物理模型试验通过相似准则约束能够很好地重现滑坡涌浪灾害动力学过程^[17]。试验针对研究对象和复杂环境进行简化处理, 便于开展滑坡涌浪各项影响因素的研究, 被众多学者广泛使用。Fritz 等^[18]在二维水槽中以颗粒材料作为滑体物质, 分析波高与弗劳德数、滑体厚度和水深之间的关系, 研究涌浪引起的流场特点, 总结最大涌浪高度及能量传递公式。Ataie-Ashtiani 等^[19]通过 120 组物理模型试验分析坡角、水深、滑坡冲击速度、几何形状、滑体变形对冲击波特性的影响, 研究脉冲波的振幅、周期和能量守恒等特征, 提出了冲击波振幅和周期的经验公式。殷坤龙等^[20]设计了滑体入水控制系统, 构建 1:200 的白水河滑坡河道模型, 分析初始涌浪高度与水深、滑坡速

度、滑坡宽度、长度、厚度之间的关系,探讨涌浪在河道中的传播规律。王梅力等^[21]以刚性块体为材料进行物理模型试验,分析初始涌浪形态特征和首浪波高,通过波高等值线图分析首浪波峰线的分布特征,以波能流为主线,运用波能理论推导出首浪总波能公式。

综上,目前通过物理模型试验分析三维散粒体滑坡堆积形态、涌浪类型及能量转化的研究仍相对困难,主要归因于三维散粒体滑坡水-土相互侵入时更加复杂、散粒体堆积形态多变等。现阶段通过物理模型试验与数值手段相结合是研究滑坡涌浪水-土相互作用相对可行的手段。首先,通过物理模型试验结果能够直观分析滑坡涌浪水-土相互作用及运动特征和影响因素。其次,利用物理模型试验获取确定性的滑坡涌浪初始条件,边界条件和关键参数,能够提高数值模拟的可靠性和精度,以此可进一步分析滑体与水体能量转化规律。

基于以上考虑,聚焦滑坡体积、速度和水深等影响涌浪的三个重要因素,选取典型滑坡和河道作为原型,以 1:200 相似比建立物理试验模型,进行散粒体滑坡涌浪三维物理模型试验研究。充分考虑水-土相互作用现象,提出体积效应、速度效应和水深效应以解释滑坡涌浪运动特征和规律。基于滑体堆积形态观测结果,应用 TS 方法反演滑坡涌浪动力学参数以确保数值模型的可靠性。采用验证后的 TS 模型计算滑体和水体时序能量状态值,分析滑体与水体的能量转化规律。本文研究成果能为防灾减灾提供技术支撑,具有一定的理论价值。

1 滑坡涌浪物理模型试验

1.1 试验装置

散粒体滑坡涌浪物理试验模型主要由相似比为 1:200 的控制滑槽、滑坡体模型、矩形河道模型构成(图 1)。河道模型长 8.0 m、宽 4.5 m、高 0.75 m,两侧倾斜坡面倾角 $\alpha=45^\circ$,在试验过程中保持一定的静水位高度(SWL),具体模型示意图如图 1 所示。滑槽模型长 2.0 m,宽 0.5 m,高 0.5 m,贴河道斜坡设置固定倾斜角度 $\beta=45^\circ$ 。滑槽上设置控制板并通过多个位置孔调节滑体下滑高度和距离,以保证滑体达到不同的设计入水速度要求。滑槽中填放不同体积的天然卵石,可以满足不同体积的散粒体下滑试验要求。散粒体材料为天然河流鹅卵石,粒径范围为 1.0~5.0 cm,下滑后堆积形态见图 2(a)。为了方便后续对滑体

模型进行数值建模,将散粒体堆积形态设置成临空面垂直的三角体,滑体初始状态见图 2(b),表观密度为 2 610 kg/m³,堆积密度为 1 680 kg/m³。

试验过程中主要量测内容包括:滑体运动特征、滑体堆积特征(包括滑体堆积范围、堆积形状、堆积厚度等),以及涌浪形态特征(包括波形、波高、波速等)。采用两部高清摄像机从下滑侧面和正面分别记录散粒体下滑及涌浪产生全过程,高清摄像机采集图像分辨率为 1 440 p/60 fps。散粒体堆积形态特征由标注在水槽底部的正方形网格(10 cm×10 cm)和倾斜坡面的测量线确定。涌浪的波形特征由波高仪和高清摄像机监测获取。试验采用搭载 SAD1000 传感器的波高仪进行数据采集,以便后续研究分析。波高仪(编号 WG1—WG8)具体位置分布见图 1, WG1—WG4 以水槽底部水平间隔的距离分别为 55, 70, 70, 65 cm, WG2 和 WG5—WG8 在水槽横向平均分布,间隔为 125 cm。该物理试验模型具体几何尺寸如图 1 所示,试验模型和监控设备布置实景如图 2(c)所示。

1.2 试验方案设计

为了研究散粒体滑坡涌浪运动特征与能量转化规律,试验设置了单因素(散粒体体积、速率和水深)对照组试验。考虑数值分析中滑体模型建立的便利性,设置顺滑槽倾斜的三角体形状滑体,体积编号分别为:K1(25 cm×25 cm×50 cm×1/2)、K2(35 cm×35 cm×50 cm×1/2)和 K3(50 cm×50 cm×50 cm×1/2)。散粒体入水速度由下滑高度控制,该下滑高度是指散粒体底部距离静水面的距离,分别为 22.6, 53.0, 81.6 cm,对应编号为:V1、V2、V3。试验设置两种静水位,编号为:W1(25 cm)和 W2(50 cm)。那么,体积为 35 cm×35 cm×50 cm×1/2、下滑高度 53 cm、静水位 25 cm 的试验工况则命名为 K2V2W1。依此类推,共设置 18 组试验工况。

1.3 试验尺寸效应分析

本试验忽略滑体冲击区域表面张力和流体黏度产生的尺度效应对试验结果造成影响。Heller 等^[22]进行了一项关于水上滑坡产生波浪尺度效应的详细研究,认为可以采用 Reynolds 数($R = g^{1/2}h^{3/2}/v_w$)和 Weber 数($w = \rho_w gh^2/\sigma_w$)来分别评估流体黏度效应和液体表面张力对波浪运动的影响。其中 v_w 和 σ_w 是流体的运动黏度系数和表面张力系数。试验环境均处于室内常温环境(25 °C)和一个标准大气压下,水的运动黏度系数和表面张力分别为 8.937×10⁻⁷ m²/s、7.28×10⁻² N/m 不同静水位(0.25 m、0.5 m)条件下的 Reynolds 数 $R_1 \geq$

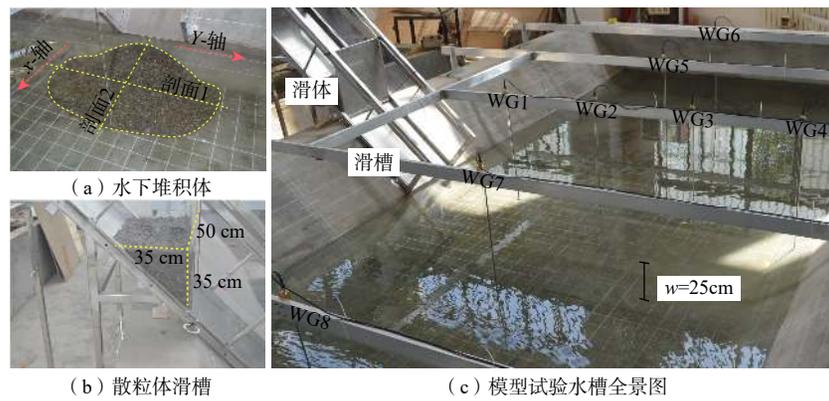


图 2 滑坡涌浪物理试验模型实景图

Fig. 2 Physical experiment model of landslide waves

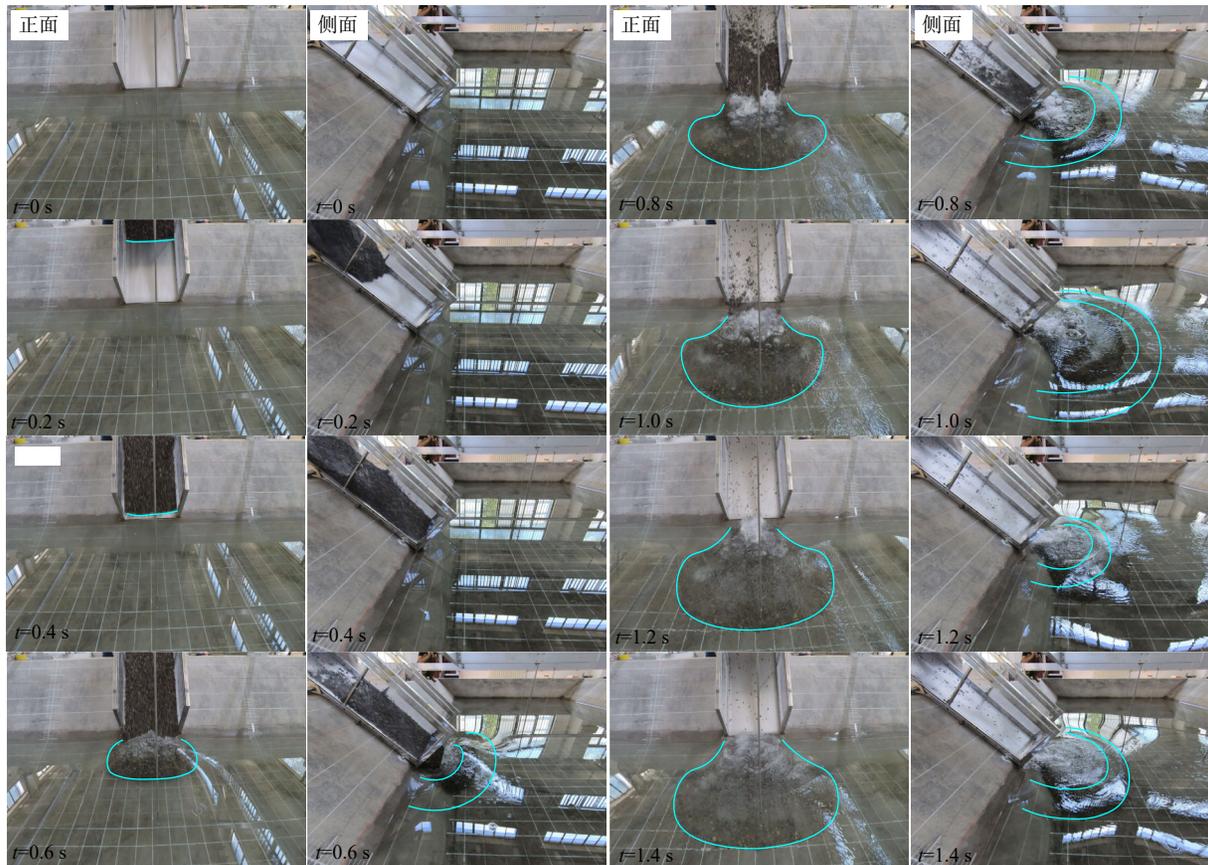


图 3 水/土相互作用正面、侧面图

Fig. 3 Front and side diagrams of water/soil interaction

后,滑体与水体充分接触且通过复杂相互作用交换大部分能量。WG1 波高数据显示该时段被滑体抬升的水体高度达到最高 40.91 mm, 见图 4(c), 表明滑体机械能转化成水体波能已经基本完成。(3)在 1.0~1.4 s 时段,滑体运动基本趋于稳定,少量滑体颗粒由于前部滑体和水体阻力的存在就近堆积在后缘,增加该位置堆积体厚度,滑体厚度呈现中间厚两边薄的特征,见图 4(b)。滑体速度变化主要是由于受到水体和滑

槽底部的阻力,见图 4(d)。此时段,首浪能量开始通过波动形式向整个水槽扩散传播直至全部耗散。

试验中主要观测到滑坡涌浪的形态为非线性振荡波^[23]和非线性过渡波^[24](图 5a—b)。非线性过渡波的特征是一个较长的初始波谷将初始波峰和随后的弱色散波列分隔开。图 5(a)记录了试验中一系列非线性过渡波(工况 K3V3W1),该类波形主要发生在相对较厚且滑动较快的滑坡体情况下。弱色散尾波列主

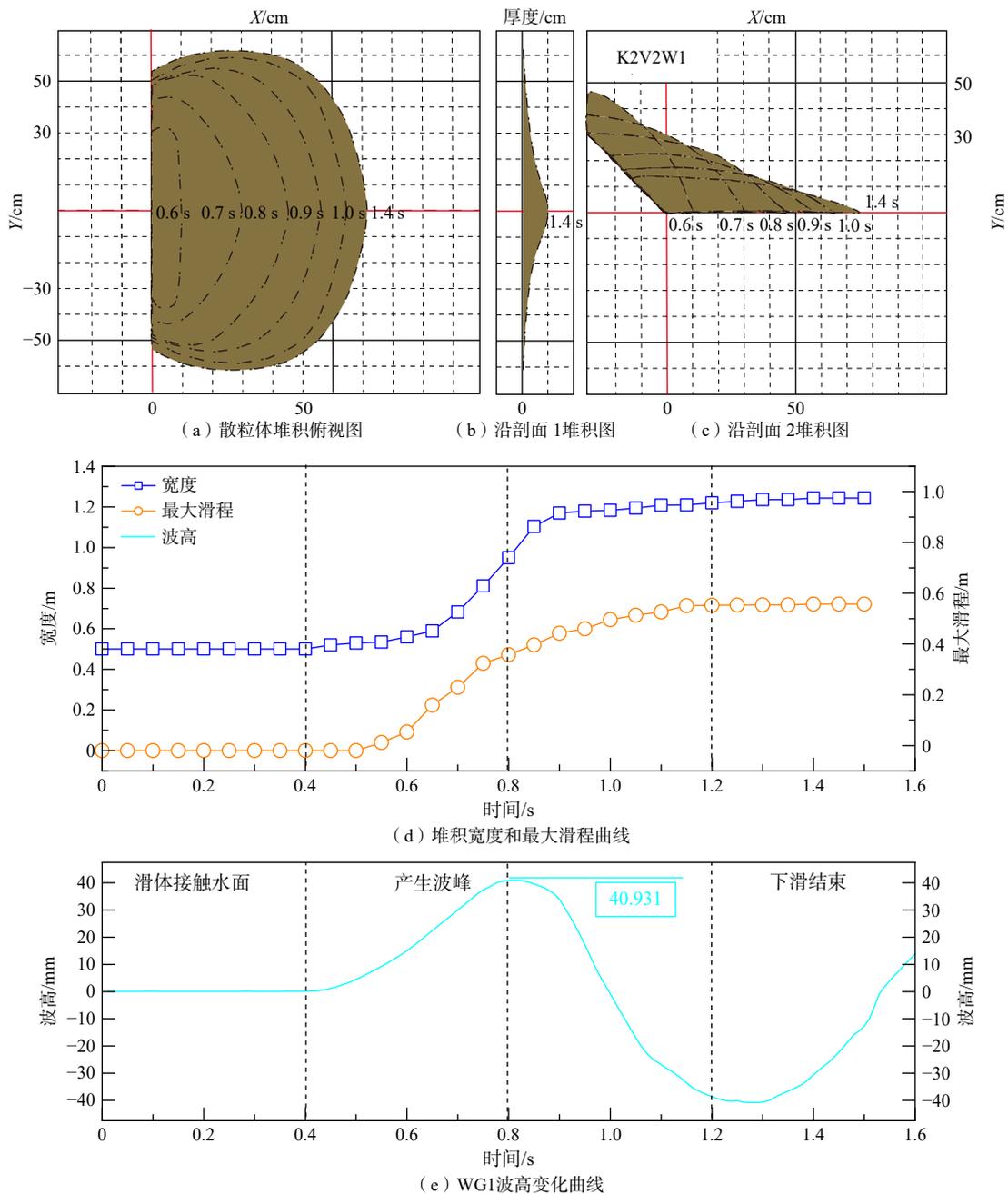


图 4 散粒体堆积展布形态及 WG1 波高变化

Fig. 4 Landslide accumulation and wave forms of WG1

要是通过冲击区岸线周期性振荡产生的,且随着传播距离的增加而衰减,见图 5(a)中灰色区域。由于频散作用,分散后的前导波可使后续拖尾波在短时间内得到增强^[25],试验中最高可达 24.18 mm,达到首浪高度的 46%,见图 5(a)中蓝色虚线框。因此,即使在远离波源的地方,得到增强的尾波依然具有很强的破坏性^[26]。

非线性震荡波的特征是初始波峰后接一个色散振荡波列,具有很强的频散特性。图 5(b)记录了试验

中由速度小且厚度较薄的滑体产生的一系列非线性振荡波(工况 K1V3W1)。当滑坡体前缘冲击水体产生初始涌浪后,尾波则是由后缘变薄的滑坡体缓慢流入水体以及冲击区岸线周期性振荡而产生的叠加。由图 5(c)中 K2V2W1 工况下 WG1—WG6 处的波形曲线可知,该涌浪波形为非线性过渡波,在主导波产生后横向涌浪沿斜坡的上升和下降,发生折射叠加现象导致水面振荡产生拖尾波列,最高波峰达 14.47 mm,见图 5(c)红色虚线框。此外, WG4 处的波高较 WG3

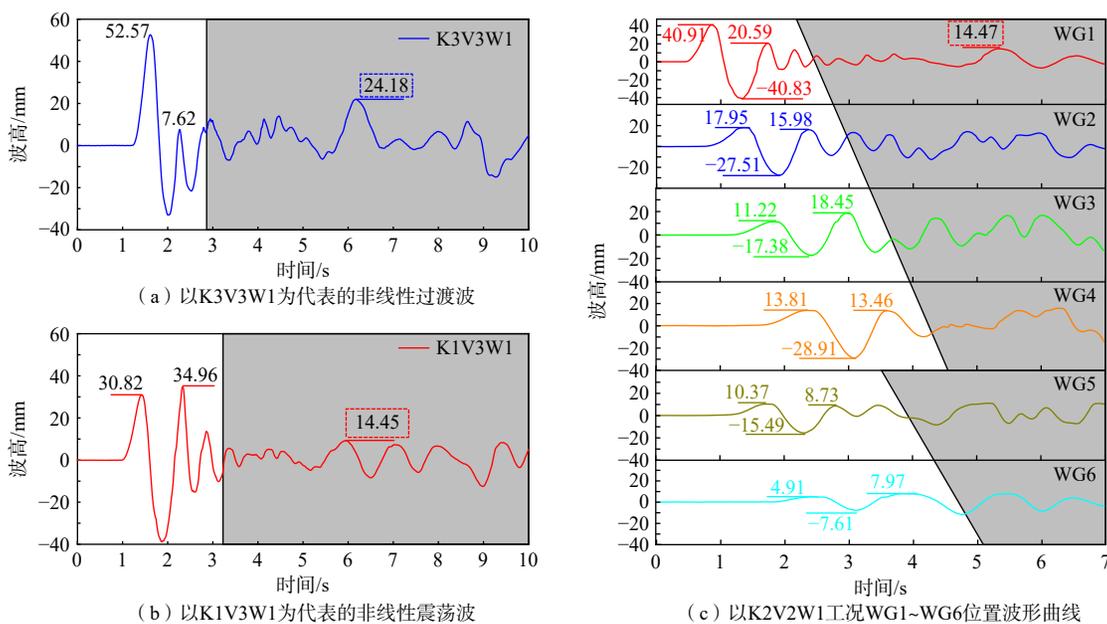


图 5 散粒体滑坡涌浪两种典型波形及 K2V2W1 工况 WG1—WG6 位置波形曲线

Fig. 5 Two typical waveforms of granular landslide generated impulse wave and wave curves at gauges WG1—WG6 in K2V2W1

处大, 导致波高“翘尾”现象的原因为首浪传播至 WG4 时水位逐渐变浅, 在波浪能量相对不变的情况下波幅稍微增大, 产生浅水变形效应。

2.2 滑坡体积对涌浪特征影响

选取具有相同下滑高度(入水速度)但滑体体积变化的试验工况研究滑体体积变化对涌浪特征的影响。

图 6 记录了两种水深工况下沿水槽纵剖面 Z(滑坡中心至对岸方向)和横剖面 H(垂直于滑体下滑方向, 图 1)相同入水速度条件下不同滑体体积产生的首浪波高变化曲线。

图 6(a)表明首浪高度沿水槽纵剖面 Z 传播过程中逐渐衰减, 但在 WG4 处(距离滑坡入水点 2.6 m 处)记录的波高呈稍微增大趋势, 存在明显的浅水变形效应。由图 6(a)可知, 水深相同时, 随着滑坡体积增大, 滑体对水体的抬升作用增强, 同时滑体前缘的迎水面积变大以致相应的冲击挤压作用增大, 因此首浪高度随着体积的增大而增大。统计结果表明浅水比深水工况涌浪高度平均高出 67%, 揭示水-土相互作用中存在水深效应, 即水深较大时相同速度和体积的滑体受到水体阻力更大, 对水体的抬升作用减弱导致波高较小。

图 6(b)描述的是首浪沿水槽横剖面 H 传播的波高曲线, 首浪传播至正对滑体的监测点 WG2 达到最大浪高并向两侧逐渐衰减。横剖面 H 的波高曲线同样表明相同速度下首浪高度与滑体体积的正相关规

律, 而首浪沿横剖面 H 的传播过程符合水深与波高负相关的规律, 表明此规律不会因为方向而改变, 因此滑坡涌浪沿河道两岸传播规律也需重点关注。

波速是衡量涌浪传播能量大小的重要特征之一。本试验中, 通过两组波高仪的间距以及涌浪在两者间的传播时间来计算单个波峰的传播速度, 因此计算得到的波速实际上是两组波高仪间的平均波速, 即 $c = \Delta x / \Delta t$ 。此外, 由于拖尾波列在整个涌浪传播过程中对灾害影响程度很轻, 所以本文只对前两个波形的波峰波速进行分析。

图 7(a)显示首浪波速传播沿纵剖面 Z 先增大后减小的特征。由于首浪在传播过程中, 波浪势能部分转化成涌浪的动能增加了涌浪的传播速度, 表明涌浪产生时越靠近滑坡区域的波速更加值得关注。从 WG1 处的首浪波速来看, 相同下滑速度, 随着体积增大首浪波速具有减小的趋势, 表明滑体体积与首浪波速具有负相关趋势。此外, 统计表明当水深较大时涌浪首浪波速比浅水时平均高出 51.17%, 揭示后浪波速与水深正相关的水深效应。

2.3 滑坡速度对涌浪特征影响

选取具有相同滑体体积但下滑高度(入水速度)变化的试验工况研究滑体速度变化对涌浪特征的影响。图 8(a)显示了纵剖面 Z 两种水深工况下相同体积不同下滑速度的滑体产生涌浪首浪高度变化曲线。

由图 8(a)可知, 两种水深下, 首浪高度都随着下

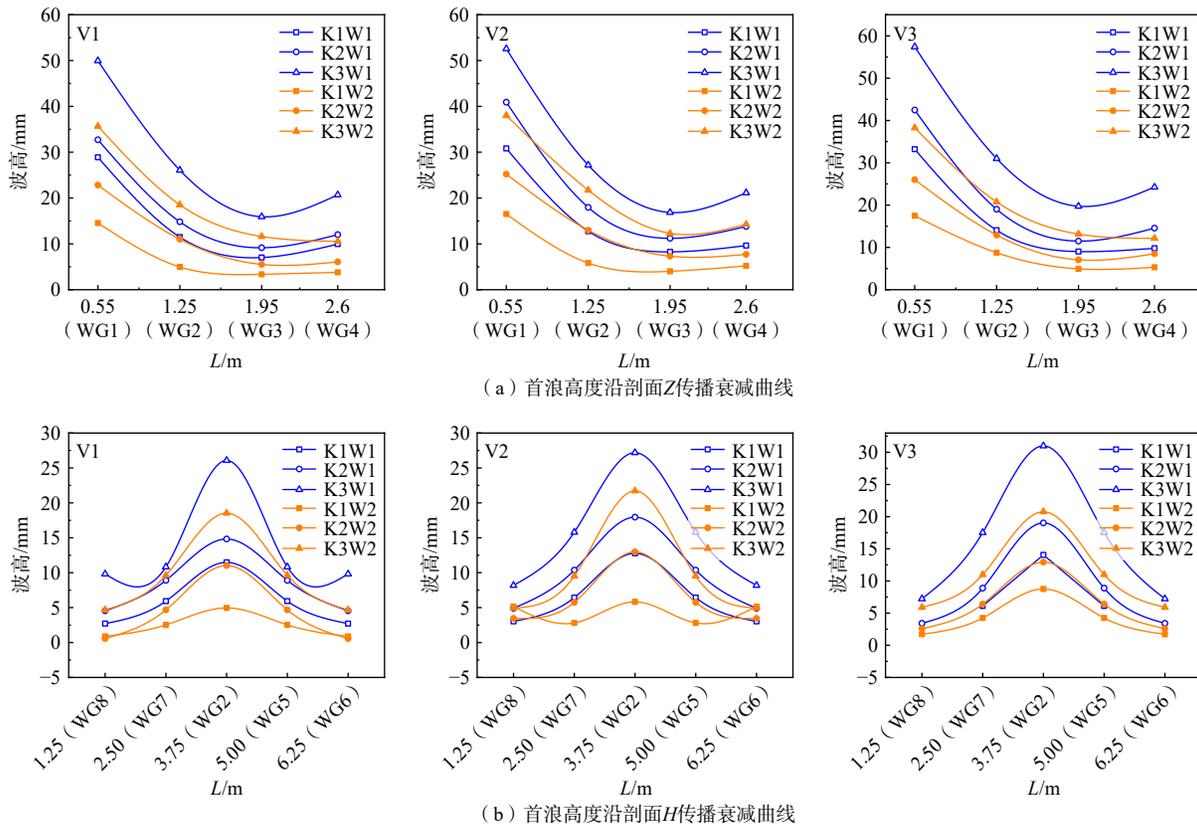


图 6 不同下滑速度 (V1、V2、V3) 下首浪高度传播衰减曲线

Fig. 6 Wave attenuation under scenarios of V1, V2 and V3

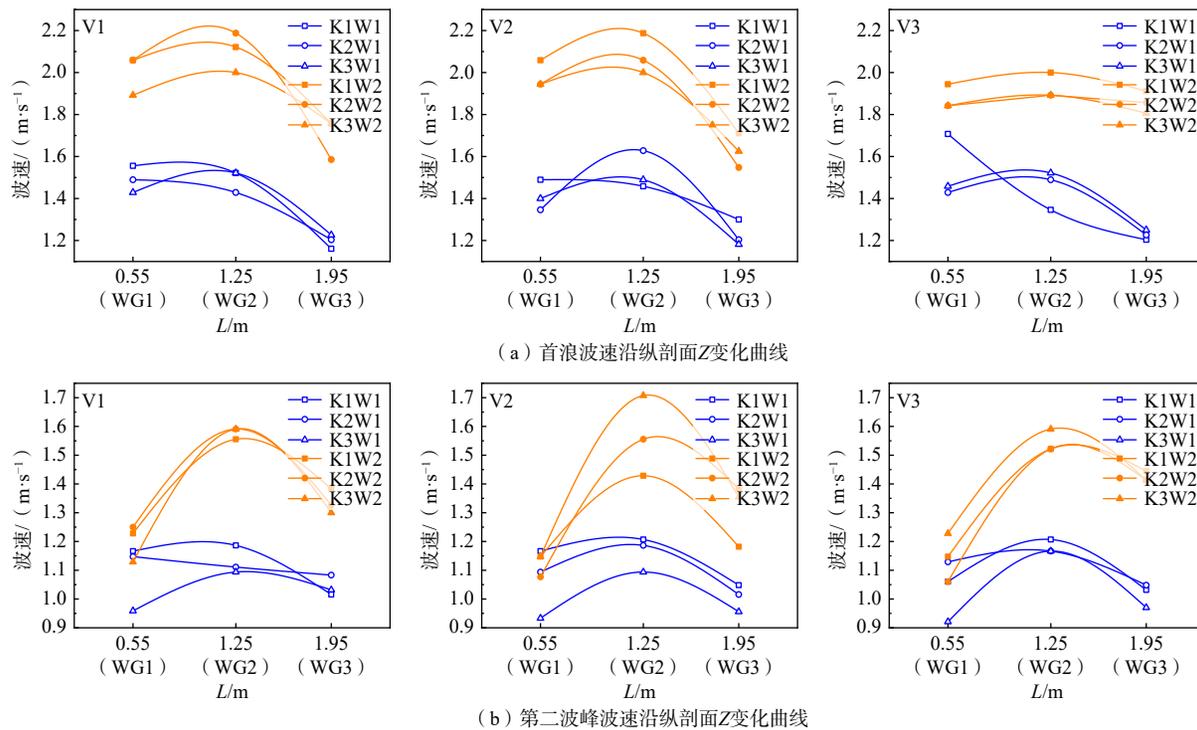


图 7 不同下滑速度 (V1、V2、V3) 下沿纵剖面 Z 波速变化曲线

Fig. 7 Wave velocity at longitudinal section Z under scenarios of V1, V2 and V3

滑速度的增大而增大。相同体积下滑体颗粒对水体的抬升作用和界面摩擦力几乎相当,但由于滑体速度

增加,对水体的冲击挤压作用更显著,导致首浪高度的增加。图 8(b)记录了横剖面 H 首浪高度的传播衰减

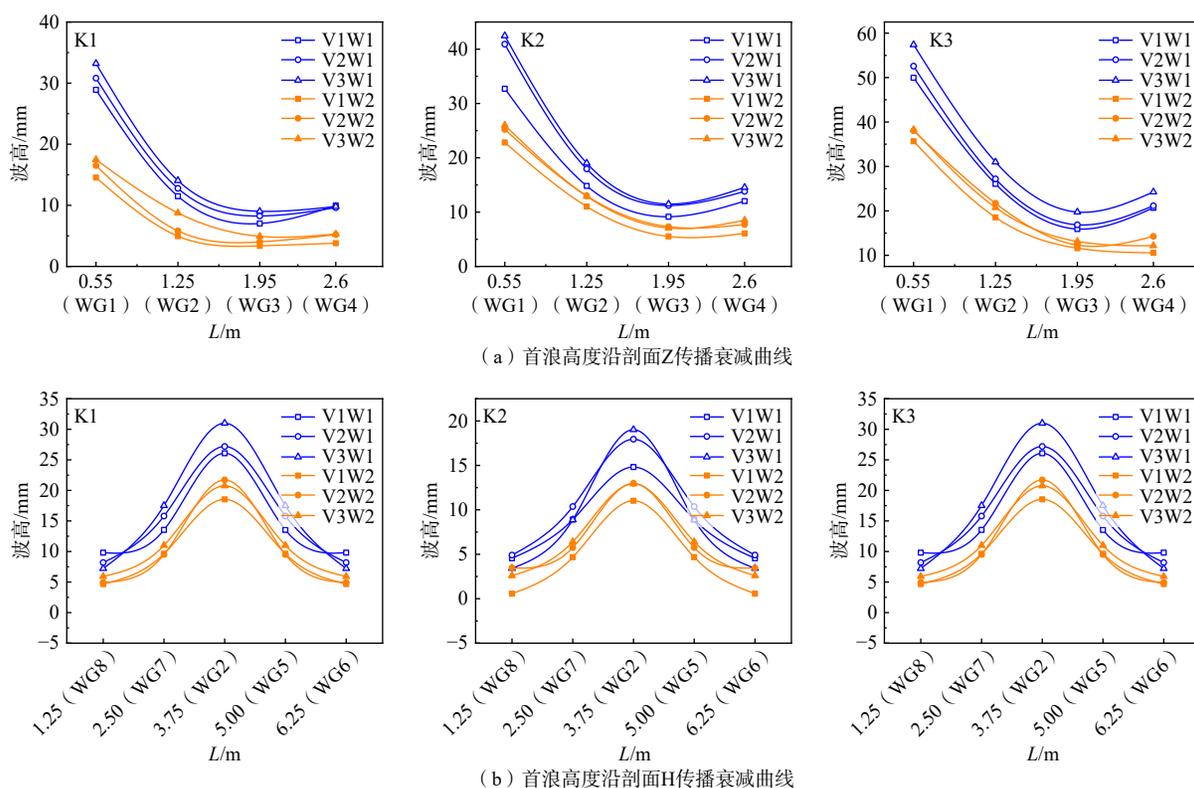


图 8 不同滑坡体积 (K1、K2、K3) 下首浪高度传播衰减曲线
 Fig. 8 First wave attenuates under scenarios of K1, K2 and K3

变化。由图可知,水深和体积相同但滑体速度不同时首浪高度沿剖面 H 衰减幅度基本相当,表明不同滑体速度对涌浪在河道中心传播衰减的影响不显著。同时,距离首浪中心越近,滑体与水体的冲击挤压作用对首浪的影响越显著;距离首浪中心越远时,由于频散和阻尼作用带来的不可预测的影响,涌浪高度随下滑速度变化无明显规律。

图 9 揭示了散粒体下滑速度对首浪波速及第二波峰波速(纵剖面 Z)的影响。涌浪波速总体上呈现先增大后减小的衰减趋势特征,且水位越深第二波峰波速随滑体速度增大的幅度越明显。此外,从图 9(a)中可知,水深较大时,波速较高但波高较低,由于水深增加,滑体颗粒与水体的接触面增加,界面摩擦力增大,但体积抬升效应减弱,因此造成波速较大波高较小的现象。

2.4 影响滑坡涌浪特征的关联效应

滑坡涌浪的产生和传播衰减过程涉及复杂的水土相互作用和波浪动力学问题。通过对上述试验数据的分析,提出滑坡涌浪产生过程运动学特征与三种因素的关联效应,即体积效应、速度效应和水深效应。图 10 显示了三种滑坡涌浪特征关联效应的概化规律。从图 6(a)和图 10(a) ($\eta_1 > \eta_4$) 可知,同等下滑速

度和水深时,体积越大,滑体对水体的抬升作用越强(体积效应),而下滑速度对水体的冲击挤压作用(速度效应)和水深引起的界面摩擦作用(水深效应)基本相当,因此涌浪首浪高度随着滑坡体积的增大而增大。体积效应可理解为滑体冲击水体过程瞬时改变了河道底部的地形,对水体产生垂直方向的抬升力,导致水体发生竖直方向的雍高,且滑体体积越大浪高越大。结合图 8(a)和图 10(a) ($\eta_1 > \eta_2$) 与 b ($\eta_3 > \eta_5$) 可知,同一水深相同体积下,滑体颗粒对水体的抬升作用(体积效应)和界面摩擦力(水深效应)几乎相当,但由于滑体速度增加,对水体的冲击挤压作用更显著(速度效应),导致首浪高度增加。速度效应表现为水土相互作用过程中滑体前缘迎水面推动水体产生了额外加速度,若滑体体积(特别指入水形状和迎水面积)和水深条件相当,则速度越大产生涌浪越大。

结合图 10 ($\eta_1 > \eta_3$) 与 ($\eta_2 > \eta_5$) 可知,同等滑体体积和下滑速度条件下,当水深较大时滑体水下运动时长和阻力增大,导致体积对水体的抬升作用稍微降低,因此水深越大产生涌浪首浪的波高反而较小。由图 7(a) 可知, $c_3 > c_1$ 、 $c_5 > c_2$, 即同速度同体积滑体下滑,当水深较深时滑体物质受到水体界面摩擦时间更长、阻力更大,同时传递给水体的动量更多(水深效应),因此

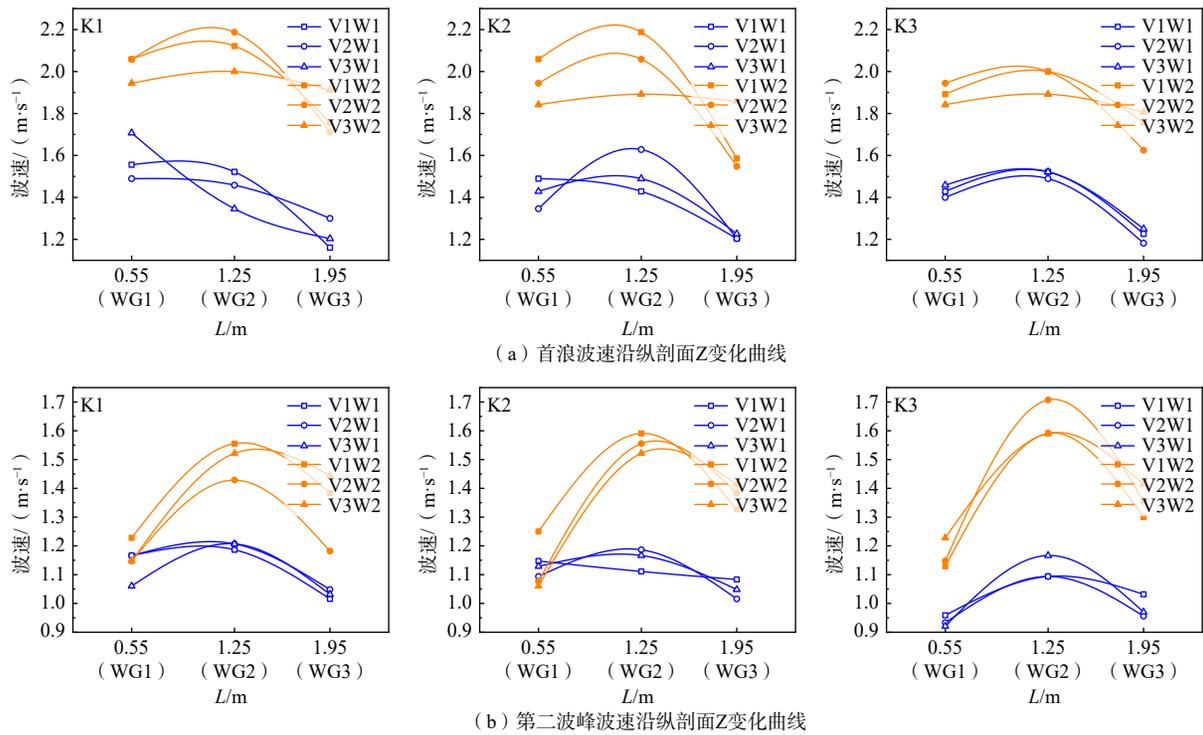


图 9 不同滑体体积 (K1、K2、K3) 沿纵剖面 Z 波速变化曲线

Fig. 9 Wave velocity at longitudinal section Z under scenarios of K1, K2 and K3

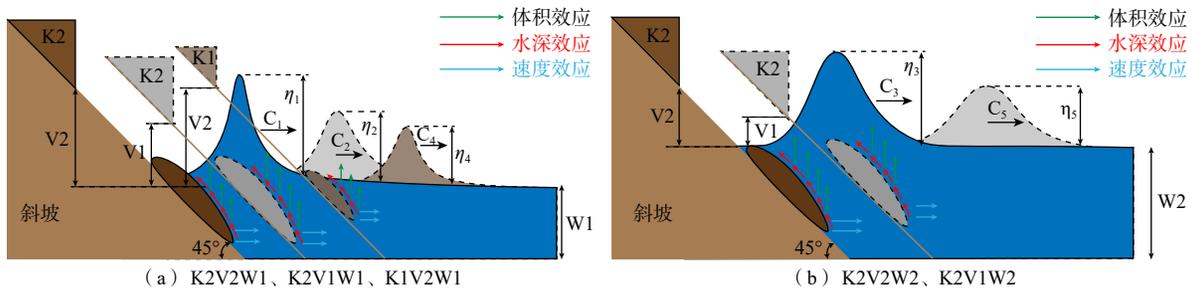


图 10 试验工况波形简图

Fig. 10 Sketch diagrams of test model waveforms

水深越大产生涌浪首浪的波速也越大。水深效应可理解为滑体进入水体后,在水-土接触面上存在剪切摩擦力,该摩擦力阻碍滑体运动的同时也推动水体前进。因此,在水深效应影响下,同体积同速度的滑体,在不同水深条件下产生的涌浪首浪可能表现为浅水环境首浪波形瘦高、波速低,深水环境首浪波形矮胖、波速高的特征,但滑体传递给水体的总能量大致相同。

3 滑坡涌浪能量转化规律

3.1 首浪波能计算方法

采用 TS 数值方法模拟试验模型中滑坡涌浪运动过程,计算滑体和水体时序状态能量,分析滑坡涌浪中滑体与水体能量相互转化的基本规律。TS 是一种

针对流体各向均质、深度平均、不可压缩假设下的无网格化流体数值模拟方法^[14-16],也是对“Tsunami Balls”理论工作的延伸^[27]。该方法数值过程采用一种免解流体控制方程的思路,通过网格移动与分配严格遵守质量和动量守恒的第一性原理。TS 能够模拟海啸、碎屑流、沉积物运输、风暴潮、冰川运动和各类两相流运动等。

滑坡滑动时势能部分转化为动能,部分以摩擦内能形式损失。在冲击水体后,滑坡的部分能量转化为水体的动能和势能。本研究重点关注滑坡动能 (KE_s)、滑坡势能损失 (GPE_s)、波动能 (KE_w) 和波势能损失 (GPE_w),详细计算公式可参考 Xiao 等^[15] 和 Wang 等^[16] 等文献。

3.2 滑体与水体能量转化规律

利用上述分析方法,分析计算本试验中 9 组 25 cm

水位的试验工况,图 11 显示 K2V2W1 试验工况的能量图谱。

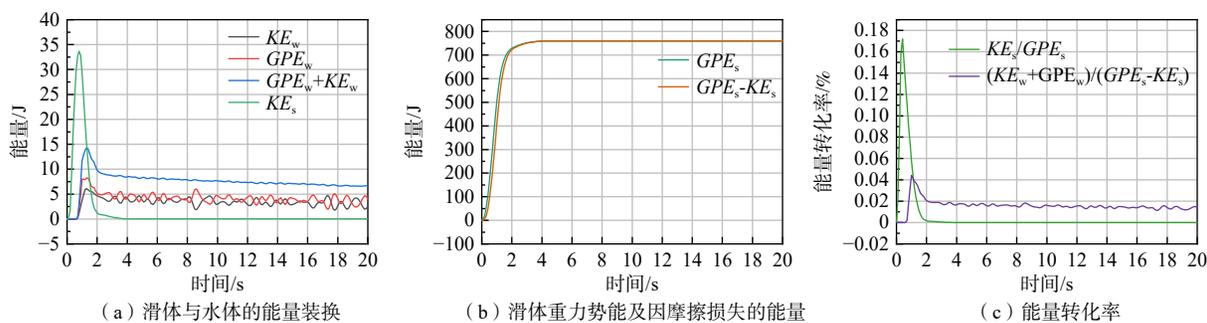


图 11 K2V2W1 试验工况能量转化图

Fig. 11 Energy conversion of the test model K2V2W1

滑坡涌浪可视为一个动力学保守系统,其初始总能量为滑坡体入水前的总机械能,由滑坡体所具有的势能和动能构成。滑体入水前距离水面的高度及入水时的速度决定其拥有的势能与动能大小。以整体能量角度出发,滑坡体入水过程,就是滑坡和交换能量的过程,滑坡入水前能量的大小和交换的充分程度决定着涌浪能量大小。由图 11 可知,散粒体的势能 GPE_s 、动能 KE_s 和摩擦内能相互转换。在散粒体下滑接触水体前,重心距离河道底部的高度(势能 GPE_s)逐渐减小,散粒体的速度(动能 KE_s)逐渐增加,最大值可达到滑体损失机械能的 4.44%,见图 11(a) 绿线,同时散粒体与坡面间产生摩擦内能,并以热能、声能等形式向周围环境耗散。

在散粒体下滑接触水体时,散粒体距离河道底部的高度(势能 GPE_s)继续减小,水体势能 GPE_w 和动能 KE_w 开始增加,滑体损失的机械能转化水体的总能量最大达到 4.44%,见图 11(b) 蓝线。受地面摩擦和水体阻力的作用,散粒体的速度(动能 KE_s)逐渐减小,滑体与地面间产生摩擦内能耗散至停止。综上,前期滑体势能的减小部分转换成了滑体动能、水体动能、水体势能和摩擦内能,后期水体动能和势能也转换成了内能逐渐耗散殆尽。其他工况总能量转化率计算结果见表 1。表中,最大总波能为 GE_w+GPE_w , 能量转化率为 $(KE_w+GPE_w)/GPE_s$ 。

由表 1 可知,本试验中滑体的势能与涌浪波能的转化率在 1.00% ~ 3.07%,涌浪波能为最大波峰能量。针对滑坡涌浪能量转化问题,国内外已有较多学者开展相关研究,主要集中在二维、三维散粒体和刚体的能量转化规律与产生涌浪类型的差异。Mohammed 等^[28]在平面山坡上进行的三维砾石滑坡试验发现,滑

体势能转化波峰能量为 0.5% ~ 3%,传递到波列能量为 1% ~ 15%。二维散体滑坡试验的波能转换范围为 1.0% ~ 85.7%^[23, 29]。二维块体试验中的波能转换率 2.0% ~ 50%^[18, 30]。将 Mohammed 等^[28]的三维试验和本试验对比发现,二维试验中滑坡与波能的转换效率较大,其主要原因在于试验过程中将滑坡和交换能量的过程,滑坡入水前能量的大小和交换的充分程度决定着涌浪能量大小。而在三维试验中,滑体与水体都可在水平和环向扩散而产生更多耗散。散粒体能量在水下运动过程中通过摩擦耗散,也会在坡面-河道底部过渡处受到冲击变形而发生内耗。此外,滑坡能量耗散的其他来源也包括气体阻力和侧面摩阻力,以及冲击区的湍流和多相混合等方面。对比分析可知,本试验中获取的散粒体滑坡与水体能量转化效率的取值范围具有较高的可靠性,可为滑坡涌浪能量转化规律研究提供参考价值,支撑散粒体滑坡涌浪防灾减灾工作。

表 1 W1 水位工况下的能量转化率

Table 1 Energy conversion rate at W1 water level

工况	最大总波能/J	滑体势能/J	能量转化率/%
K1V1W1	7.32	238.64	3.07
K1V2W1	10.76	364.88	2.95
K1V3W1	10.83	455.81	2.38
K2V1W1	13.04	510.06	2.56
K2V2W1	14.31	759.51	1.88
K2V3W1	9.37	940.57	1.00
K3V1W1	23.97	1 179.35	2.03
K3V2W1	23.25	1 608.39	1.45
K3V3W1	60.82	2 083.75	2.92

4 结论

本文以天然碎石模拟散粒体滑坡模型,研究水

深、速度和体积对散粒体滑坡堆积体形态和涌浪波形特征的影响,采用 TS 数值方法,研究散粒体滑坡涌浪能量转化规律。得到以下结论:

(1)试验表明:滑体通过下滑冲击、挤压和抬升水体形成首浪,滑体的规模与形态对涌浪形成与传播具有显著影响;入水速度较小且相对厚度较薄的滑体入水趋向于产生非线性震荡波而入水速度较快且厚度较厚时入水一般产生非线性过渡波,且水深是影响涌浪波形的关键因素之一。

(2)基于试验提出的体积效应和速度效应揭示了一定水深的涌浪规模与滑坡体积和速度呈正相关规律;水深效应则表明水-土接触面上的摩擦力阻碍滑体的同时推动水体,解释了一定波能的涌浪在波形和速度上的分布差异,三者之间关联密切,共同影响涌浪特征形态变化。

(3)基于模型试验和数值反演分析结果总结了三维散粒体滑坡涌浪中滑体与水体能量的转化效率为 1.0%~3.07%,由于二维模型试验滑体和水体的变形约束在二维水槽的垂直平面上,而三维试验两者都可在水平和环向扩散,造成更多能量耗散,相较于二维试验转化率较低。

参考文献 (References) :

- [1] 黄波林,殷跃平,陈小婷,等.地质灾害涌浪研究综述[J].水文地质工程地质,2014,41(1):112-118. [HUANG Bolin, YIN Yueping, CHEN Xiaoting, et al. A review on impulse wave generated by geohazards[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(1): 112-118. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 汤明高,吴川,吴辉隆,等.水库滑坡地下水动态响应规律及浸润线计算模型——以石榴树包滑坡为例[J].水文地质工程地质,2022,49(2):115-125. [TANG Minggao, WU Chuan, WU Huilong, et al. Dynamic response and phreatic line calculation model of groundwater in a reservoir landslide: Exemplified by the Shiliushubao landslide[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 115-125. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 黄达,匡希彬,罗世林.三峡库区藕塘滑坡变形特点及复活机制研究[J].水文地质工程地质,2019,46(5):127-135. [HUANG Da, KUANG Xibin, LUO Shilin. A study of the deformation characteristics and reactivation mechanism of the Outang landslide near the Three Gorges Reservoir of China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 127-135. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 蒋权,陈希良,肖江剑,等.云南黄坪库区滑坡运动及其失稳模式的离散元模拟[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(3):53-59. [JIANG Quan, CHEN Xiliang, XIAO Jiangjian, et al. Discrete element numerical simulation and analysis of Yunnan Huangping Reservoir Areas landslide and its failure mode[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(3): 53-59. (in Chinese with English abstract)]
- [5] FRITZ H M, MOHAMMED F, YOO J. Lituya Bay Landslide Impact Generated Mega-Tsunami 50th Anniversary[M]//Tsunami Science Four Years after the 2004 Indian Ocean Tsunami, 2009: 153-175.
- [6] 殷坤龙,杜娟,汪洋.清江水布垭库区大堰塘滑坡涌浪分析[J].岩土力学,2008,29(12):3266-3270. [YIN Kunlong, DU Juan, WANG Yang. Analysis of surge triggered by Dayantang landslide in Shuibuya Reservoir of Qingjiang River[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3266-3270. (in Chinese with English abstract)]
- [7] XIAO L L, WANG J J, WARD S N, et al. Numerical modeling of the June 24, 2015, Hongyanzi landslide generated impulse waves in Three Gorges Reservoir, China[J]. Landslides, 2018, 15(12): 2385-2398.
- [8] 罗冠枝,高文伟,王国卫,等.库岸斜坡失稳及其涌浪灾害风险分析[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(1):8-17. [LUO Guanzhi, GAO Wenwei, WANG Guowei, et al. Risk analysis of surge disaster and slope instability on reservoir bank[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(1): 8-17. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 龙艳梅,宋章,王玉峰,等.基于物理模型试验的碎屑流流态化运动特征分析[J].水文地质工程地质,2022,49(1):126-136. [LONG Yanmei, SONG Zhang, WANG Yufeng, et al. An analysis of flow-like motion of avalanches based on physical modeling experiments[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 126-136. (in Chinese with English abstract)]
- [10] KELFOUN K, GIACHETTI T, LABAZUY P. Landslide-generated tsunamis at réunion island[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(F4): F04012.
- [11] LØVHOLT F, PEDERSEN G, HARBITZ C B, et al. On the characteristics of landslide tsunamis[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society: Mathematical,

- Physical, and Engineering Sciences, 2015, 373(2053): 20140376.
- [12] MA Gangfeng, KIRBY J T, HSU T J, et al. A two-layer granular landslide model for tsunami wave generation: theory and computation[J]. *Ocean Modelling*, 2015, 93: 40 – 55.
- [13] 肖莉丽. 库岸滑坡涌浪数值模拟研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2015. [XIAO Lili. Numerical simulation of landslide generated waves in reservoir[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [14] WANG Jiajia, WARD S N, XIAO Lili. Numerical modelling of rapid, flow-like landslides across 3-D terrains: a Tsunami Squares approach to El Picacho landslide, El Salvador, September 19, 1982[J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 201(3): 1534 – 1544.
- [15] XIAO Lili, WARD S N, WANG Jiajia. Tsunami squares approach to landslide-generated waves: application to Gongjiafang landslide, Three Gorges Reservoir, China[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2015, 172(12): 3639 – 3654.
- [16] WANG Jiajia, WARD S N, XIAO Lili. Tsunami Squares modeling of landslide generated impulsive waves and its application to the 1792 Unzen-Mayuyama mega-slide in Japan[J]. *Engineering Geology*, 2019, 256: 121 – 137.
- [17] 孙永福, 黄波林, 赵永波. 基于物理试验的海底滑坡涌浪研究[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(1): 116 – 122. [SUN Yongfu, HUANG Bolin, ZHAO Yongbo. A study of the submarine landslide-induced impulse wave based on physical experiments[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(1): 116 – 122. (in Chinese with English abstract)]
- [18] FRITZ H M, HAGER W H, MINOR H E. Landslide generated impulse waves[J]. *Experiments in Fluids*, 2003, 35(6): 505 – 519.
- [19] ATAIE-ASHTIANI B, NIK-KHAH A. Impulsive waves caused by subaerial landslides[J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2008, 8(3): 263 – 280.
- [20] 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*, 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*, 2012, 37(5): 1067 – 1074. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 王梅力, 祖福兴, 王平义, 等. 山区河道型水库滑坡涌浪首浪波能分析[J]. *水运工程*, 2020(4): 79 – 83. [WANG Meili, ZU Fuxing, WANG Pingyi, et al. Study on head wave energy of landslide surge in mountainous river reservoir[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2020(4): 79 – 83. (in Chinese with English abstract)]
- [22] HELLER V, HAGER W H, MINOR H E. Scale effects in subaerial landslide generated impulse waves[J]. *Experiments in Fluids*, 2008, 44(5): 691 – 703.
- [23] FRITZ H M. Initial phase of landslide-generated impulse waves[D]. Zuerich: Eidgenoessische Technische Hochschule Zuerich, 2002.
- [24] NODA E. Water waves generated by landslides[J]. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 1970, 96(4): 835 – 855.
- [25] LØVHOLT F, GLIMSDAL S, HARBITZ C B, et al. Tsunami hazard and exposure on the global scale[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 110(1/2/3/4): 58 – 73.
- [26] WARD S N. Landslide tsunami[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2001, 106(B6): 11201 – 11215.
- [27] WARD S N, DAY S. The 1958 lituya bay landslide and tsunami: A tsunami ball approach[J]. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 2010, 4(4): 285 – 319.
- [28] MOHAMMED F, FRITZ H M. Physical modeling of tsunamis generated by three-dimensional deformable granular landslides[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C11): 3221 – 3221.
- [29] HELLER V. Landslide generated impulse waves: prediction of near field characteristics[D]. Southampton, South East England, UK: University of Southampton, 2008.
- [30] WATTS P. Tsunami features of solid block underwater landslides[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2000, 126(3): 144 – 152.

编辑: 王支农