



泥石流中球形巨石运动规律模型试验研究

娄灿昀¹, 王飞¹, 王家鼎¹, 陈晓清²

(1. 西北大学 地质学系/大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069;

2. 中国科学院/水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘要 该研究通过室外水槽模型试验,模拟了不同直径巨石与不同密度泥石流完全固液耦合作用下的运动状态,分析了泥石流沟内巨石在泥石流中的运动模式、运动的影响因素及其在泥石流中的受力情况,并探讨了泥石流密度与巨石粒径对其运动速度的影响。研究表明:巨石在运动过程中可能出现滚动、跳跃与滑动等运动模式,巨石出现的运动模式同泥石流的密度以及巨石粒径有关;巨石的直径越大,运动速度越小,它在泥石流中的运动模式越简单,越倾向于发生滚动运动,在泥石流流体中的跟随性越好,速度比 n 越容易趋近于1;巨石粒径对巨石运动速度的影响大于泥石流密度对它的影响。

关键词 泥石流;球形巨石;水槽试验;运动规律

中图分类号: P642.23 **DOI**: 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2024-01-015

Model experimental study on the movement of spherical boulders in debris flow

LOU Canyon¹, WANG Fei¹, WANG Jiading¹, CHEN Xiaoqing²

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, China Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China)

Abstract This study, an outdoor flume model test, was to model the movement of different-diameter boulders under the complete fluid-solid coupling with different-density landslides, analyze the movement patterns of boulders in landslides, the factors influencing the movement of boulders, and the force condition of boulders in a landslide and also explore the effect of the debris flow density and boulder diameters on the velocity of the boulders in landslides. The study found that the movement of boulders may be rolling, leaping or sliding, which is related to their density and diameter. That is, the greater the boulder's diameter and the smaller its velocity, the simpler its movement pattern in the landslide, it is more likely to roll, the better its following behaviour in the landslide; also, it is more likely for the speed ratio (n) to approach 1. The study showed that the boulder diameter affects boulder velocity more greatly than the landslide density.

Keywords debris flow; spherical boulders; flume model test; movement pattern

收稿日期: 2023-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(41807252)。

第一作者: 娄灿昀, 女, 从事泥石流运动机理研究, 690686423@qq.com。

通信作者: 王飞, 男, 讲师, 博士, 从事泥石流运动机理、山地灾害防治等研究, wf@nwu.edu.cn。

泥石流是山区常见的突发性自然灾害,暴发时会严重破坏自然环境,给世界各地带来巨大的损失。我国地形种类丰富、新构造运动活跃、气候类型多样^[1],因此也频受泥石流的危害^[2]。泥石流的危害除了源自浆体的冲刷和淤埋,最主要是由其挟带的固体颗粒造成^[3-4],因此,泥石流中的固体颗粒运动成为了学者研究的热门话题。赵琰鑫通过分析泥石流的运动与泥石流中大颗粒的耦合关系及大颗粒物质的受力特征,建立了大颗粒运动的基本方程^[5]。王飞等采用流固耦合的方法利用 FLOW3D 软件获得泥石流中巨石运动的参数,从而研究了巨石的滚动特征^[6]。陈红采用物理模拟试验的手段,探究了巨石形状、质量以及泥石流浆体的浓度对巨石启动方式、搬运规律以及冲击力的影响^[7]。汤碧辉等研究了泥石流中巨石在 3 种典型泥石流中启动时受力状态,推导出大颗粒启动时的临界指标^[8-9]。Wang 等将舟曲泥石流中的不同形状的巨石视为刚体,将泥石流视为黏性流,采用数值模拟研究了舟曲泥石流中浆体密度和地形变化对巨石各运动参数的影响^[10]。

目前,国内外学者对于泥石流中巨石的研究相对较少,对其他领域关于巨石的研究经验进行学习是必要的。在海啸对天然巨石运输方面的研究领域中,有学者从巨石大小、密度和形状等方面对流体动力学特征着手,并对特定的传输过程进行建模,该方法已经被广泛应用于海啸对天然巨石运输的研究^[11-13]。目前仍有一些影响数值模型改进的未知参数,前人通常采用在海啸或风暴后进行实地调查的方法以获取这些未知参数的信息^[14-15]。虽然风暴或海啸引起海岸巨石运输的研究和泥石流的巨石运动研究在流体介质是不同的,但是,关于流体中巨石的力学特征研究等方面对于泥石流中的巨石运动研究具有参考价值。

综上所述,在泥石流领域鲜少有人研究泥石流中巨石的运动特性。由于泥石流中巨石的运动特性同巨石自身条件及推动巨石运动的泥石流的性质息息相关。因此,本研究以 2010 年舟曲泥石流为研究背景,采用水槽模型试验,模拟不同直径巨石在不同密度泥石流作用下的运动状态,分析泥石流沟内巨石在泥石流中的运动情况,研究泥石流浆体密度和巨石直径对泥石流中巨石运动速度、运动方式和冲击特性的影响。研究成果可为泥石流防治工程设计提供一定的理论依据。

1 水槽试验

1.1 试验背景

2010 年 8 月 7 日,特大暴雨突降甘南藏族自治州舟曲县,引发三眼峪、罗家峪等 4 条沟系特大山洪地质灾害,上千人因此遇难或失踪,是我国泥石流历史上最严重的一次灾难。舟曲泥石流的一个显著特点是其浆体中混入大量巨石,这些巨石在运动的过程中对沿途城镇、道路造成了严重的破坏。图 1 显示了舟曲泥石流堆积区存在的巨石情况,这些巨石直径约为 3~4 m,现场甚至存在直径超过 10 m 的巨石^[10]。



图 1 舟曲泥石流中巨石

Fig. 1 Boulders in Zhouqu debris flow

1.2 试验装置

本试验在西北大学长安校区的大型泥石流模拟平台开展,试验装置主要包括:料斗、料斗架、水槽、水槽支架和尾料池等部分(见图 2)。试验水槽模型总长为 6 m,高度为 0.5 m。分为 3 段:第 1 段水槽内径 30 cm,外径 39 cm(Ⅰ);第 2 段水槽内径 37 cm,外径 50 cm(Ⅱ);第 3 段水槽内径 50 cm,外径 59 cm(Ⅲ)。相邻水槽连接处由于焊接及活动构件原因存在 5 cm 的陡坎。水槽顶部为料斗,用于放置配置好的泥石流浆体;水槽末端安置尾料池,其尺寸为 1.2 m × 1.2 m × 0.8 m,用于对试验的泥石流物质进行回收。



图 2 水槽模型试验装置
Fig. 2 Flume model test setup

本次试验的检测系统,由 6 台帧率为 30 fps 的摄像机组成(见图 3)。沿水槽中轴线从水槽Ⅱ到水槽Ⅲ设置 4 个流速测量点,在其上方分别布置 4 台高速摄像机,在水槽侧面以及出口处也分别设置一台高速摄像机,用于记录泥石流与巨石模型的运动过程及辅助测量其他所需的参数,如泥石流的流深和流速等。通过对视频中巨石模型与泥石流帧间位移进行计算得到经过测点时块石模型的瞬时速度与泥石流表面瞬时流速。水槽上方 4 个相机相邻间距为 80 cm,巨石模型初始位置与水槽Ⅱ起点间距为 70 cm,与第 1 台相机间距为 50 cm。

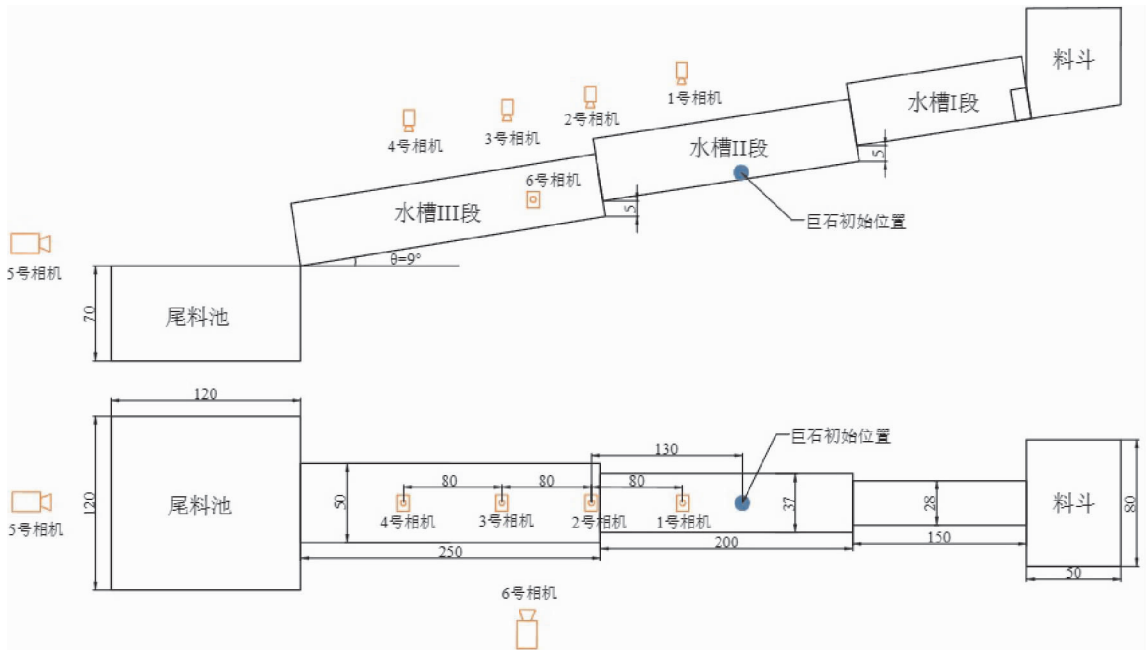


图 3 水槽模型试验装置尺寸图(单位:cm)
Fig. 3 Dimensional drawing of flume model test set (unit: cm)

1.3 试验设计

水槽模型试验以舟曲泥石流为原型,水槽的坡度参照舟曲泥石流堆积区的坡度选取为 9°。胡桂胜等将三眼峪泥石流沟的大颗粒形态划分为棱柱状、角锥状和菱形状^[16]。考虑到带有棱角的模型在运动过程中的复杂性,且不规则形状的大石块通常可以被简化为等体积球体或椭圆体^[17-18]。为更直观地研究巨石直径对巨石模型运动的影响,本试验选取了不同直径的球体模型以研究巨石直径对其运动的影响。试验中巨石的原型尺寸依据胡桂胜等的研究选取了 2.4、2.0、1.6、1.2、0.8 m 的 5 种尺寸^[16]。由于模型试验存在尺寸效应的限制,比如试验中液相黏度影响被

放大、水槽槽壁影响等,如果选取的模型尺寸不合适,将会导致模拟的结果精度下降,试验测量数据的误差也会增大。因此,泥石流模型需要在相似原理的基础上进行。然而在实际的模型设计中,由于模型材料、仪器装置以及试验方法等因素很难兼顾,一般优先选择最主要因素。为减小尺寸效应的影响,保证试验结果可靠,根据试验目的要求和模型场地条件的限制,本试验选取几何相似比尺 $\lambda_l = 12$,流速比尺 $\lambda_v = \lambda_l^{\frac{1}{2}} = 3.464$,泥石流流量比尺 $\lambda_Q = \lambda_l^{\frac{5}{2}} = 498.831$ 。故而球体模型的直径分别选取为 20、16、13、10、6.6 cm。模型由 3D 打印的树脂外壳填充混凝土制成,树脂外壳壁

厚 5 mm。

配置泥石流浆体所采用的试验物料为秦岭某矿区废弃沟道的矿渣堆积体,经过颗粒筛分试验,得到物料的粒径级配曲线(见图 4)。

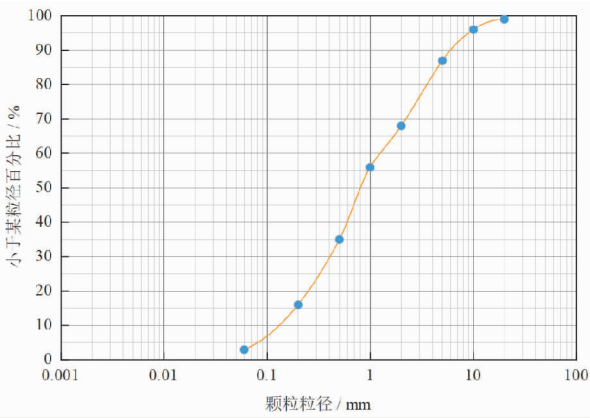


图 4 物料的粒径级配曲线

Fig. 4 Particle size composition of the material

物料分别配置成密度为 1 900、1 600、1 300 kg/m³ 的浆体,并采用清水作为对照试验,分别代表黏性泥石流、中性泥石流、稀性泥石流、山洪等 4 种情况。受水槽长度限制,在水槽Ⅱ中选取物体初始位置,并保证每次试验巨石模型都从初始位置开始运动。依次将不同直径的球形模型放入水槽初始位置,用不同密度的泥石流冲击,观察球形模型的运动现象,以研究不同直径的球形巨石在不同密度泥石流作用下的运动规律。试验工况如表 1 所示,球形巨石模型的基本参数如表 2 所示。

表 1 试验工况设计

Tab. 1 Design of test conditions

试验分组	水槽坡度 $\theta/(^{\circ})$	泥石流 密度 ρ $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	巨石模 型直径 D/cm
1	9	1 900	6. 67
2	9	1 900	10. 00
3	9	1 900	13. 33
4	9	1 900	16. 66
5	9	1 900	20. 00
6	9	1 600	6. 67
7	9	1 600	10. 00
8	9	1 600	13. 33
9	9	1 600	16. 66
10	9	1 600	20. 00
11	9	1 300	6. 67
12	9	1 300	10. 00
13	9	1 300	13. 33
14	9	1 300	16. 66
15	9	1 300	20. 00
16	9	1 000	6. 67
17	9	1 000	10. 00
18	9	1 000	13. 33
19	9	1 000	16. 66
20	9	1 000	20. 00

表 2 巨石模型基本参数
Tab. 2 Basic parameters of the boulder model

直径/cm	20	16	13	10	6. 6
质量/kg	8. 38	4. 28	2. 3	1. 04	0. 3
模型在 初始位 置的摆 放情况					

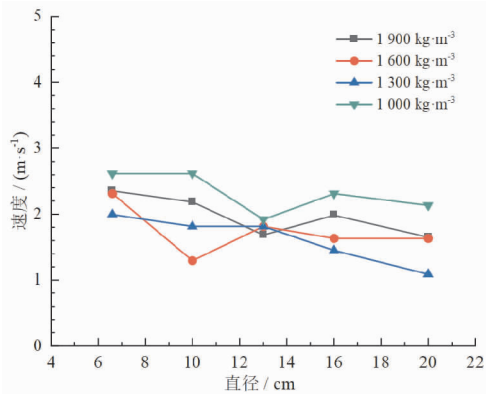
2 试验结果

2. 1 直径对巨石速度的影响

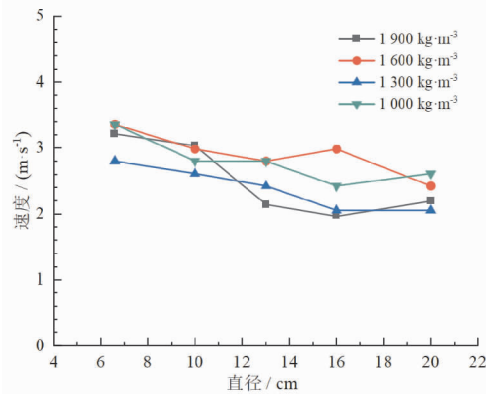
一般情况直径越大,巨石的质量也越大,平动的速度会相对减小^[10]。从图 5 可以看出,在整个运动过程中巨石模型的运动速度不断增大,其中

在清水的冲击下模型运动速度是最快的。例如:直径为 13 cm 的球体模型在密度为 1 300 kg/m³ 的泥石流冲击下,在 4 个测速点的速度分别为 1. 813、2. 425、2. 813、2. 975 m/s,呈现出递增趋势。另外还可看出,同一个测速点,巨石模型直径越大,其运动速度则越小。因为大直径的模型,质量大,自身重力势能大,被流体冲击启动后,导致

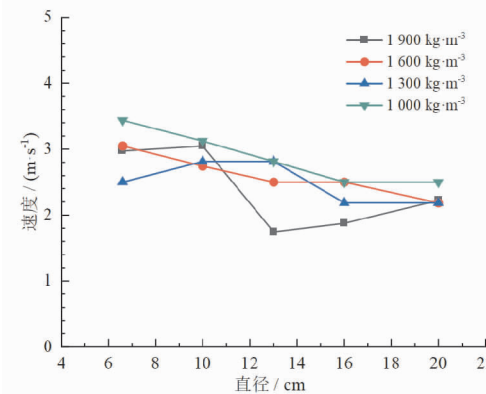
流体的跟随性较差,流体对其主要起着减阻作用;而小直径的模型质量小,自身重力势能小,被流体冲击启动后,速度会逐渐和流体运动速度趋向一致,流体对其减阻作用较小,有时甚至起到推动作用。因此,小直径的模型速度会比大直径的模型速度大。从动量守恒的角度分析,泥石流浆体将能量传递给巨石模型,直径大的球体质量就越大,那么同样的动量下其速度就越小;反之,直径小的模型速度则越大。在试验过程中也观察到直径为 6.6 cm 的巨石模型在密度为 1 900、1 300 kg/m³ 的泥石流冲击下,出现了模型运动速度超越流体运动速度的情况。



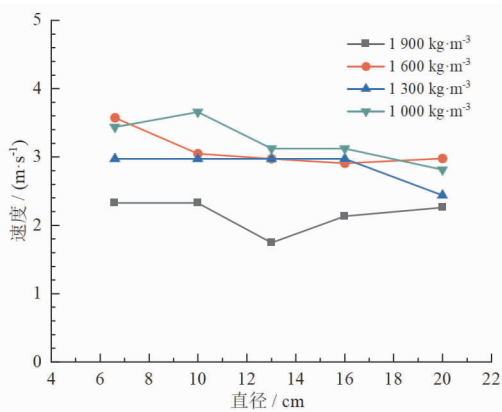
(a) 1号测速点



(b) 2号测速点



(c) 3号测速点



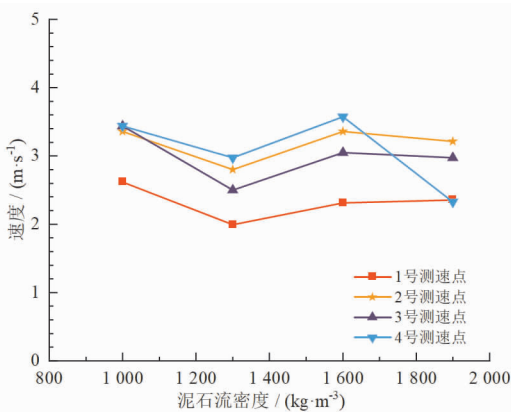
(d) 4号测速点

图 5 巨石直径与质心速度的关系

Fig. 5 Relationship between boulder diameter and centre-of-mass velocity

2.2 泥石流密度对巨石速度的影响

从能量传递角度来说,泥石流冲击巨石的过程是泥石流将浆体的动能传递给巨石的过程。泥石流密度越大,所具有的动能也相对较大,因而在与巨石相互作用后,巨石获得的动能也相对较大。Wang 等对舟曲泥石流中巨石运动特征进行数值模拟研究中得出的结论也验证了这个观点^[10]。图 6 呈现的是密度分别为 1 000、1 300、1 600、1 900 kg/m³ 的泥石流对不同直径巨石运动速度的影响。从图中可以看出,随着泥石流密度的增大,巨石的运动速度呈现出减小的趋势,这有悖于上述的分析结果。可以认为,这种结果是由试验条件与天然泥石流的运动存在一定差别造成的。因为前面的论述是建立在假定泥石流流速一定的情况下,而试验中泥石流流速是从 0 开始的。随着泥石流浆体密度的增加,流体的黏滞性越强,泥石流接触巨石模型时的流速会相对较小。因此,试验中会出现密度越大,同一测量点块石速度反而越小的情况。



(a) D=6.6 cm

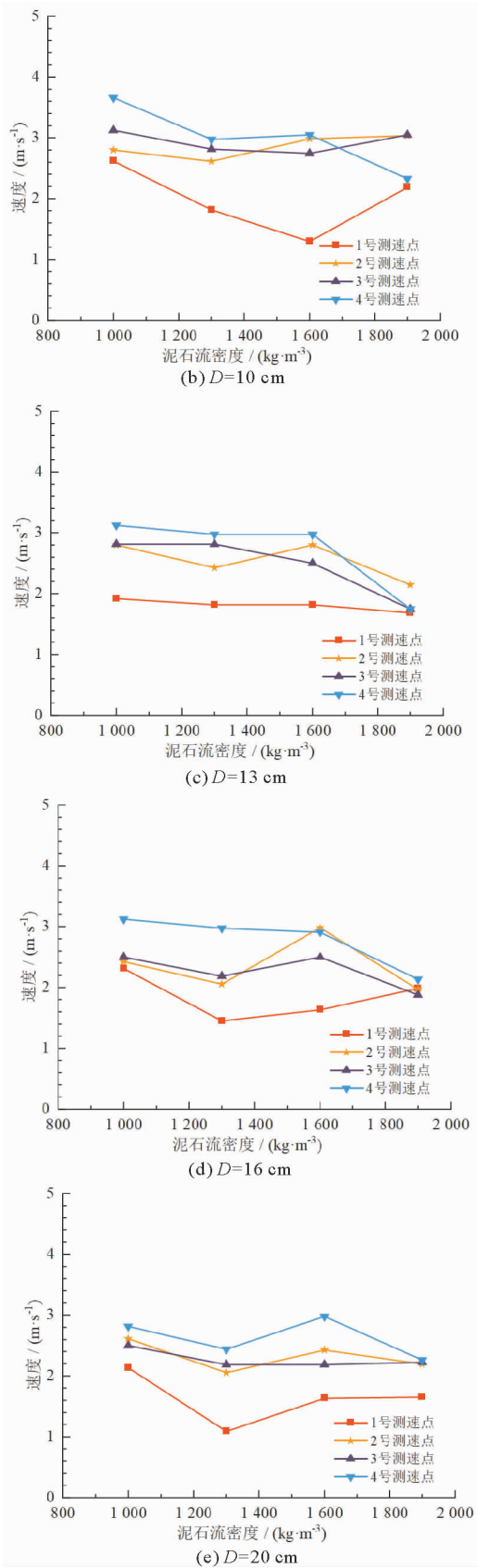


图 6 泥石流密度与巨石运动速度关系图

Fig. 6 Plot of mudslide density versus boulder movement velocity

3 讨论

3.1 运动模式分析

泥石流中巨石的运动受多种因素的影响,如巨石的质量及形状、泥石流的性质和地形坡度等。由于巨石的质量相对较大,因此,巨石的运动一般以滚动以及滑动为主,在地形允许的条件下会出现跳跃的现象。天然泥石流中巨石运动的启动一般是由于泥石流冲刷掏蚀导致的,在与泥石流的相互作用过程中开始运动;另一方面,由于地势原因巨石的运动也会受到其势能与动能转化的影响。本次试验中,上述 3 种运动模式均有出现。

3.1.1 第 1 类模式——滚动运动模式

本试验中,在密度为 $1\,900\text{ kg/m}^3$ 的泥石流冲击下,直径为 20 cm 的巨石模型在整个运动过程中都以滚动的形式运动(见图 7),直径为 16 、 13 、 10 cm 的巨石模型仅在水槽Ⅱ中以滚动的形式运动;在密度为 $1\,600\text{ kg/m}^3$ 的泥石流的冲击下,直径为 20 cm 的巨石模型全程为滚动的运动模式,直径为 16 、 13 、 10 、 6.6 cm 的巨石模型仅在水槽Ⅱ中以滚动的形式运动;在密度为 $1\,300\text{ kg/m}^3$ 的泥石流冲击下,直径为 20 cm 的巨石模型在整个运动过程中都以滚动的形式运动;在清水的冲击下,直径为 20 、 16 、 13 、 10 cm 的巨石模型,整个运动过程中都只出现了滚动的运动模式。

3.1.2 第 2 类模式——跳跃运动模式

本试验中,在密度 $1\,900$ 、 $1\,300\text{ kg/m}^3$ 的泥石流冲击下,直径为 16 、 13 、 10 cm 的巨石模型在水槽Ⅲ中都出现了跳跃的运动模式;在密度为 $1\,600\text{ kg/m}^3$ 的泥石流冲击下,除了上述直径的巨石模型以外,直径 6.6 cm 的巨石模型也出现了跳跃。直径 13 cm 的模型在密度为 $1\,600\text{ kg/m}^3$ 的泥石流冲击下的运动过程如图 8 所示,能看见跳跃的现象。可以发现,随着冲击巨石的泥石流密度的减小,巨石在水槽Ⅲ中的跳跃运动的幅度会逐渐变为不明显,在清水的冲击下,所有直径的巨石在水槽Ⅲ中都没有出现跳跃的现象。

3.1.3 第 3 类模式——滑动运动模式

本试验中,巨石出现滑动的现象比较少,只有直径为 6.6 cm 的巨石出现过该情况。直径为 6.6 cm 的巨石模型分别在 $1\,900$ 、 $1\,300\text{ kg/m}^3$ 密度的泥石流和清水的推动下,在水槽Ⅱ中受到流体冲击开始运动时,以及进入水槽Ⅲ后,都出现了

明显的滑动现象,但持续时间并不长。图 9 显示了在密度为 $1\,900\text{ kg/m}^3$ 的泥石流冲击下直径为

6.6 cm 巨石运动过程,白色箭头指示模型出现了滑动的现象。

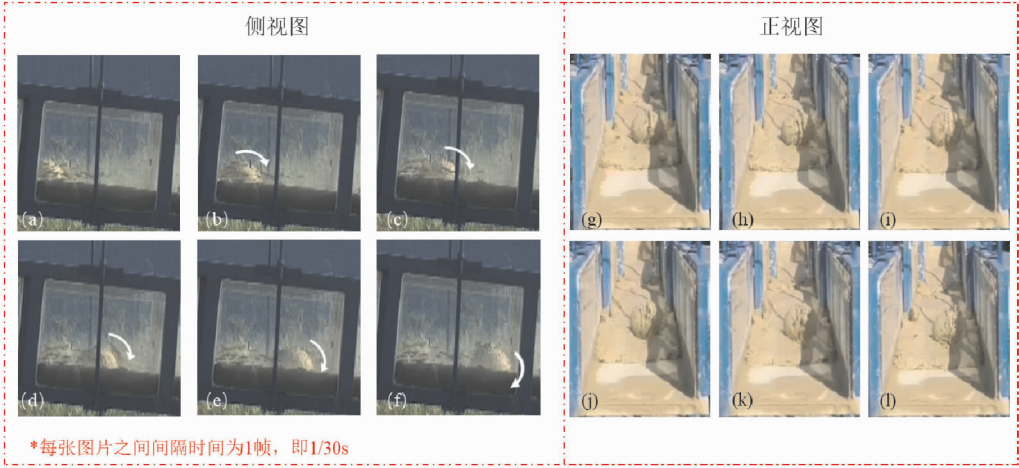


图 7 密度为 $1\,900\text{ kg/m}^3$ 的泥石流冲击下直径为 20 cm 巨石运动过程图

Fig.7 The movement process of boulders with a diameter of 20 cm under the impact of debris flow with a density of $1\,900\text{ kg/m}^3$

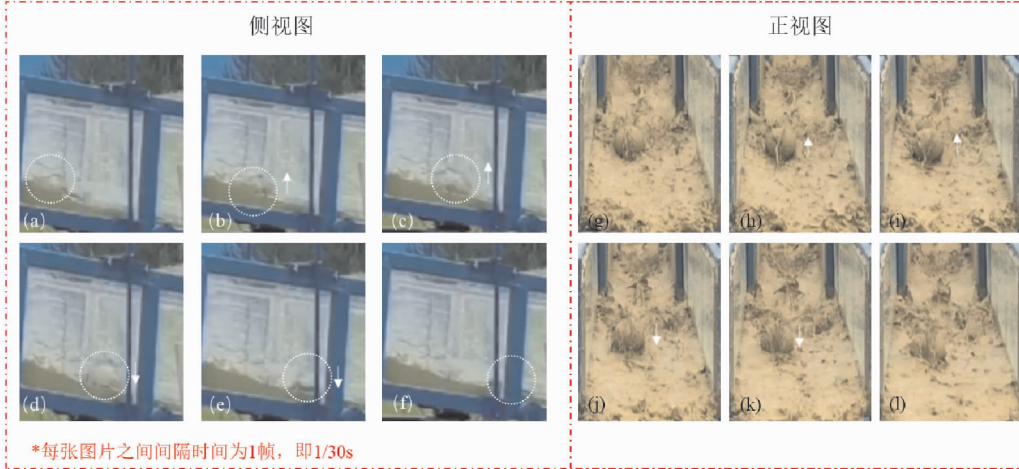


图 8 密度为 $1\,600\text{ kg/m}^3$ 的泥石流冲击下直径为 13 cm 巨石运动过程图

Fig.8 The movement process of boulders with a diameter of 13 cm under the impact of debris flow with a density of $1\,600\text{ kg/m}^3$

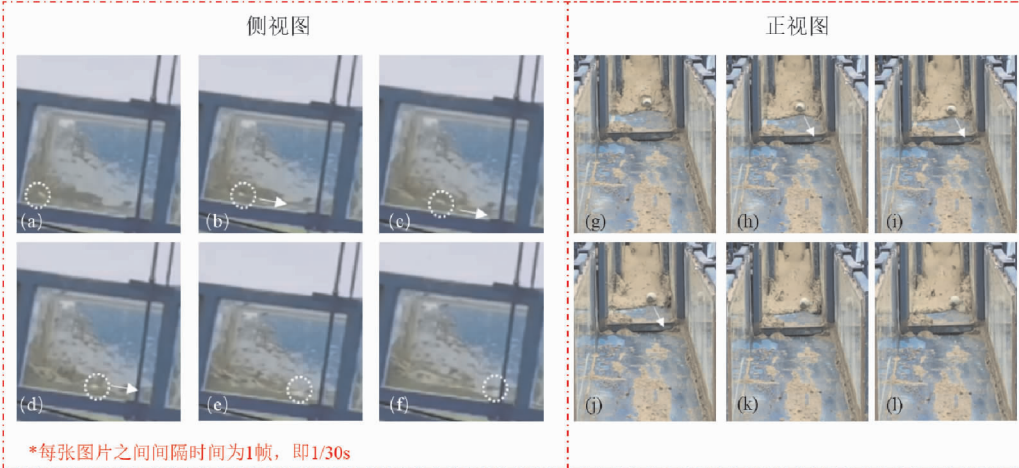


图 9 密度为 $1\,900\text{ kg/m}^3$ 的泥石流冲击下直径为 6.6 cm 巨石运动过程图

Fig.9 The movement process of boulders with a diameter of 6.6 cm under the impact of debris flow with a density of $1\,900\text{ kg/m}^3$

通过对试验中的现象按照上述 3 种运动模式归类后分析得到,在同等的泥石流密度条件下,巨石直径越大,在泥石流中的运动模式相对简单;巨石直径越小,在泥石流中的运动模式越复杂。

在坡度较缓且坡面光滑的边坡上,巨石容易在其运动开始和运动结束时发生滑动;若巨石的法向速度远小于切向速度,巨石可以被认为沿坡面做滚动运动^[19]。在本试验中,由于模型是球体,泥石流接触到模型后会有一个向上的分力,直径为 20 cm 的巨石,质量较大,在法向方向上受力基本保持平衡状态,它的法向速度总是远小于切向速度,因此发生滚动运动。而直径为 16、13、10 cm 的巨石模型由于质量不够大,法向方向受力不平衡,因此会出现跳跃的现象;而直径为 6.6 cm 的巨石模型则是因为太小了,泥石流接触模型的位置接近球体中部,冲击力的在法向方向的分力较小,因此出现滑动的现象。

同一直径的巨石,受不同密度的泥石流冲击时,泥石流密度越大,从水槽接缝处落下后的跳跃

现象越明显,在清水的冲击下 5 种粒径的巨石都未出现跳跃的运动模式。结合汤碧辉等的研究,可以认为由于巨石在密度较大的浆体中会受到更大的浮力,它在运动过程中更容易产生法向向上的运动趋势,因此,从水槽接缝处落下后,巨石模型在密度大的浆体中更容易产生跳跃的现象^[8-9]。

3.2 巨石运动速度的影响因素分析

为研究直径对巨石运动速度的影响,取泥石流中巨石质心速度(平动速度)与其周围泥石流浆体表面速度的比值为 n 进行定量分析研究,所用公式为

$$n = \frac{u_s}{u_c} \tag{1}$$

式中: u_s 为巨石模型质心平动速度; u_c 为泥石流浆体表面速度。

将巨石运动速度与浆体表面的比值 n 设置为纵坐标,并将巨石直径设置为横坐标,绘制出巨石直径与速度比之间的关系图(见图 10)。

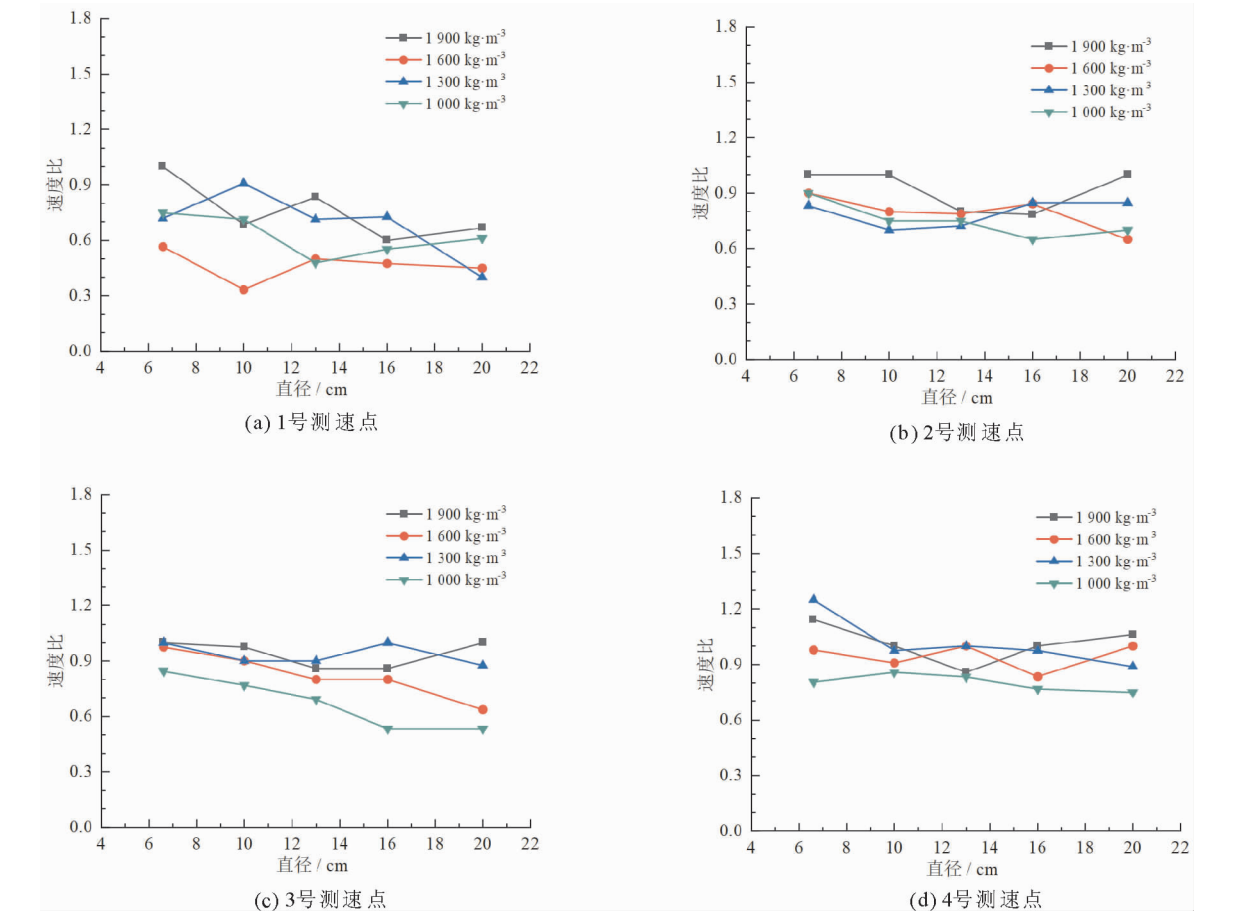


图 10 巨石模型直径与速度比值之间的关系

Fig. 10 Relationship between boulder model diameter and velocity ratio

从图 10 可以看出,流体推动巨石模型从开始运动至结束,速度比 n 不断增大,说明巨石模型开始运动后沿程速度在不断提高,并与流体速度越来越接近。此外,从图中还可以看出,随着巨石模型直径增大,速度比 n 不断减小,这说明直径越小的巨石模型在泥石流中跟随性越好,其运动速度越容易和流体速度趋同。大多数情况下,模型的运动速度和流体速度在最后一个测速点趋向一致,模型的运动速度不会超越流体速度。而直径为 6.6 cm 的巨石模型甚至在泥石流密度为 $1\,900$ 、 $1\,300\text{ kg/m}^3$ 的时候出现了巨石模型运动速度超越流体运动速度的情况。分析认为,这是因为直径为 6.6 cm 的模型尺寸小,质量较小,在被流体推动的时候出现了滑动的情况,球体模型同时发生滚动与滑动现象,导致最后球的运动速度超越了流体的运动速度。从动量守恒的角度理解,直径为 6.6 cm 的模型,质量小则速度大,同泥石流浆体的速度差就比较小,因此在泥浆中的跟随性就比较好。而直径为 20 cm 的模型在 $1\,900\text{ kg/m}^3$ 的泥石流推动下不断加速,在第 4 个测速位置时模型速度也略高于流体运动速度。分析认为,直径为 20 cm 的球体模型尺寸大,质量较大,重力势能要大于其它直径的球体模型,被泥石流流体推动后,运动过程虽然也受流体作用,但同其他较小尺寸的模型相比,它在运动过程中受到流体的减阻效果的影响不及自身重力作用影响大。因此,当其滚动至水槽末端时,便出现了模型速度略高于流体速度的现象。

将直径为 6.6、10、13、16、20 cm 的模型运动速度与泥石流密度进行线性拟合,得到模型的运动速度与泥石流密度之间的相关关系(见图 11)。可以看出,无论是哪种直径的巨石模型,在泥石流和巨石模型初速度都为零的工况下,它们的运动速度都随着泥石流密度的增加而呈现出减小的趋势。这说明泥石流的密度与巨石的运动速度呈负相关关系,具体原因在前文中已经做了分析。由于天然泥石流的运动过程非常复杂,巨石运动速度与泥石流密度的关系还需综合考虑泥石流的成分、黏性和流速等因素,并结合它们的运动状态进行具体分析。

将巨石的直径与巨石的运动速度进行线性拟合,得到巨石模型直径与模型运动速度之间的相关关系(见图 12)。结果表明,随着巨石直径的增大,巨石运动速度呈现减小趋势,说明巨石的直径

与巨石运动速度呈负相关关系。图 11、12 的线性拟合结果差异表明,巨石直径与巨石运动速度拟合出的直线斜率远大于泥石流密度与巨石运动速度拟合直线的斜率。这说明巨石直径对巨石运动速度的影响要大于泥石流密度对巨石运动速度的影响。

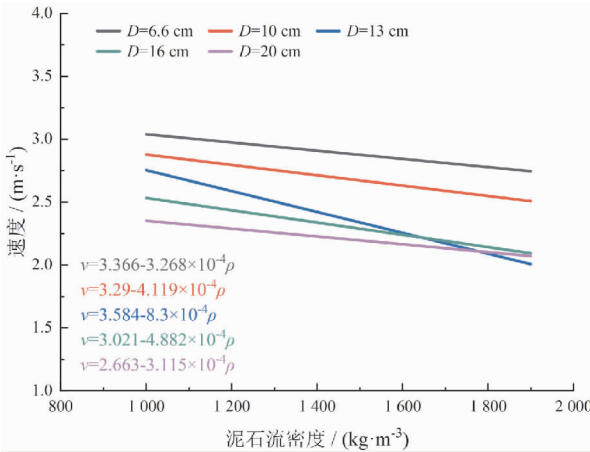


图 11 泥石流密度与巨石运动速度拟合图

Fig. 11 Plot of mudslide density versus boulder movement velocity

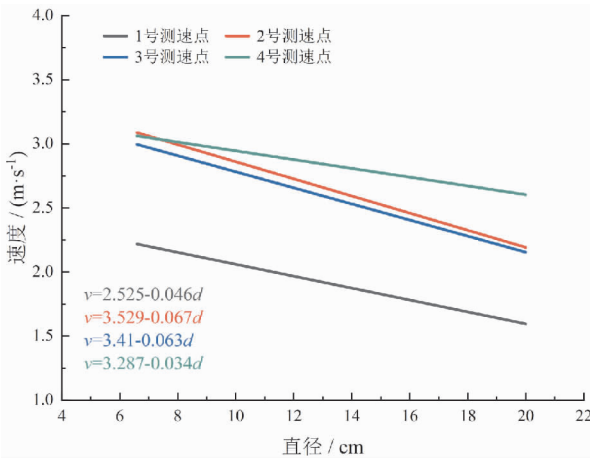


图 12 巨石直径与巨石运动速度拟合图

Fig. 12 Plot of boulder diameter versus boulder motion velocity

3.3 巨石的受力分析

对于泥石流中的巨石受力情况,国内外学者都做了一定的研究^[20-22]。本次试验中,巨石在泥石流中处于半淹没状态,参照前人的工作,将本次试验中巨石在泥石流中运动所受的力划分为浮力、重力、拖曳力与摩擦力 4 种,受力状态如图 13 所示。

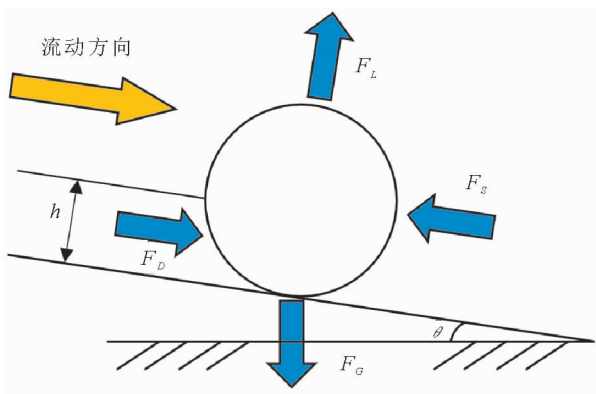


图13 巨石在水槽中的受力示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the forces on the boulder in the flume

1) 重力 (\$F_G\$)

巨石的自身重力 \$F_G\$ 的计算公式为

$$F_G = m_s g \quad (2)$$

式中: \$m_s\$ 为巨石的质量(kg)。

2) 浮力 (\$F_L\$)

浮力 \$F_L\$ 的计算公式为

$$F_L = \rho_c g V_L = \rho_c g \left(\pi D h^2 - \frac{1}{3} \pi h^3 \right) \quad (3)$$

式中: \$V_L\$ 为巨石淹没在浆体中的体积; \$D\$ 为巨石粒径(m); \$\rho_c\$ 为浆体密度(\$\text{kg}/\text{m}^3\$); \$h\$ 为泥石流深度(m)。

3) 拖曳力

当泥石流浆体流经巨石模型时, 巨石会受到拖曳力(\$F_D\$)的作用, 其计算公式为

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_c A_d C_d u^2 \quad (4)$$

式中: \$u\$ 为实际作用在巨石模型上的有效流速; \$\rho_c\$ 是浆体密度(\$\text{kg}/\text{m}^3\$); \$A_d\$ 为拖曳力作用面积; \$C_d\$ 为拖曳力系数。

4) 摩擦力

摩擦力(\$F_s\$)作用在巨石与水槽底部的接触面上, 其表达式为

$$F_s = \mu \left[m_s g \cos \theta - \rho_c g \left(\pi D h^2 - \frac{1}{3} \pi h^3 \right) \right] \quad (5)$$

式中: \$\mu\$ 是摩擦系数。

从力学角度可以看出, 同一直径条件下, 巨石的浮力、拖曳力会随着泥石流密度增大而增大, 摩擦力则会随着泥石流密度增大而减小; 泥石流密度相同的情况下, 巨石直径越大重力越大, 浮力也

会越大, 摩擦力则取决于巨石重力与浮力的差值。本次研究中, 由于随着巨石模型直径的增加, 其质量的增量远大于浮力的增量, 因此, 随着直径的增大巨石的摩擦力也在增大。

然而, 上述的受力分析是建立在巨石处于即将失稳时的临界条件下, 在研究巨石的运动过程中只能作为大致参考的手段, 巨石在实际中的运动过程较为复杂, 例如拖曳力的方向可能在不断发生改变等, 可以采用数值模拟的手段进一步研究。

4 结论

本文以舟曲泥石流为背景, 通过水槽模型试验和理论分析研究了泥石流中球形巨石的运动状态, 结论如下。

1) 整个运动过程中巨石运动速度在不断增大, 同一个测速点, 巨石直径越大, 其运动速度越小。对于不同直径的巨石在泥石流中运动, 随着泥石流密度的增大, 巨石的运动速度呈现出减小的趋势。

2) 在相同的泥石流密度条件下, 巨石模型直径越大, 越倾向于发生滚动运动; 巨石模型直径越小, 在泥石流中的运动模式越复杂, 越容易出现滚动以外的其他形式运动, 这可能是由于泥石流接触巨石模型的位置不同, 导致球体模型在法向方向力受力情况不同造成的。在相同直径条件下, 巨石模型在密度大的浆体中更容易产生跳跃的现象。

3) 巨石开始运动后沿程速度在不断增大, 会与流体运动速度越来越接近, 速度比 \$n\$ 越趋向于 1。从动量守恒的角度分析, 直径越小的巨石, 质量越小, 因此获得的速度越大, 同泥石流浆体的速度差小, 在泥石流中跟随性越好, 速度比越容易趋向于 1。直径越大巨石, 质量越大, 获得的速度越小, 同泥石流浆体速度差越大, 因此跟随性越差, 速度比 \$n\$ 越难以趋向于 1。

4) 在泥石流和巨石初始速度为零的试验条件下, 巨石运动速度会随着泥石流密度的增加而呈现出减小的趋势, 也会随着巨石直径的增加也呈现出减小的趋势。巨石直径对巨石运动速度的影响要大于泥石流密度对巨石运动速度的影响。

参考文献

- [1] 孙昊,赵万玉,游勇,等.梯-潭结构型泥石流排导槽消能特征试验研究[J].防灾减灾工程学报,2019,39(1):132-140.
- SUN H, ZHAO W Y, YOU Y, et al. Experimental study on energy dissipation characteristics of debris flow in a drainage channel with step-pool configuration [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(1): 132-140.
- [2] 万飞鹏,杨为民,渠敬凯,等.甘肃岷县中寨沟流域内泥石流发育差异的主控因素分析[J].防灾减灾工程学报,2022,42(4):683-694.
- WAN F P, YANG W M, QU J K, et al. Analysis on main controlling factors of debris flow development difference in Zhongzhai gully basin of Minxian County, Gansu Province [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(4): 683-694.
- [3] SU Y, CHOI C E, NG C W W, et al. New lightweight concrete foam to absorb debris-flow-entrained boulder impact: Large-scale pendulum modelling[J]. Engineering Geology, 2020, 275: 105724.
- [4] LUO G, ZHAO Y J, SHEN W G, et al. Dynamics of bouldery debris flow impacting onto rigid barrier by a coupled SPH-DEM-FEM method[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 150: 104936.
- [5] 赵琰鑫. 沟道泥石流运动—淤塞—堵溃数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
- [6] 王飞, 陈晓清, 李云, 等. 拦砂坝淤满后沟道中巨石与泥石流浆体的流固耦合分析[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(10): 14-20.
- WANG F, CHEN X Q, LI Y, et al. Fluid-solid coupling analysis of boulder rolling in channel after silt dam based on flow-3d [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(10): 14-20.
- [7] 陈红. 泥石流中巨砾的启动、搬运规律以及冲击力研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [8] 汤碧辉, 孙红月. 泥石流中大颗粒的起动与水流条件的关系[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(3): 132-138.
- TANG B H, SUN H Y. Relationships between starting motion of large-sized particles in debris flow and water flow condition [J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(3): 132-138.
- [9] 汤碧辉, 孙红月, 胡杭辉, 等. 黏性泥石流对球型大颗粒启动的临界条件分析[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1631-1637.
- TANG B H, SUN H Y, HU H H, et al. Analysis on critical by hadraulic condition for starting motion of large-sized particles in viscous debris flow [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1631-1637.
- [10] WANG F, WANG J D, CHEN X Q, et al. Numerical simulation of boulder fluid-solid coupling in debris flow: A case study in Zhouqu County, Gansu Province, China [J]. Water, 2022, 14(23): 3884.
- [11] LORANG M S. A wave-competence approach to distinguish between boulder and megaclast deposits due to storm waves versus tsunamis [J]. Marine Geology, 2011, 283(1/2/3/4): 90-97.
- [12] ENGEL M, MAY S M. Bonaire's boulder fields revisited: Evidence for Holocene tsunami impact on the Leeward Antilles [J]. Quaternary Science Reviews, 2012, 54: 126-141.
- [13] LAU A Y A, TERRY J P, SWITZER A D, et al. Advantages of beachrock slabs for interpreting high-energy wave transport: Evidence from Luda Island in south-eastern Taiwan [J]. Geomorphology, 2015, 228: 263-274.
- [14] MAY S M, ENGEL M, BRILL D, et al. Block and boulder transport in Eastern Samar (Philippines) during Supertyphoon Haiyan [J]. Earth Surface Dynamics, 2015, 3(4): 543-558.
- [15] SORIA J L A, SWITZER A D, PILARCZYK J E, et al. Surf beat-induced overwash during Typhoon Haiyan deposited two distinct sediment assemblages on the carbonate coast of Hernani, Samar, central Philippines [J]. Marine Geology, 2018, 396: 215-230.
- [16] 胡桂胜, 陈宁生, 邓明枫, 等. 甘肃舟曲三眼峪沟泥石流粗大颗粒冲击力特征分析[J]. 地球与环境, 2011, 39(4): 478-484.
- HU G S, CHEN N S, DENG M F, et al. Analysis of the characteristics of impact force of massive stones of the Sanyanyu debris flow gully in Zhouqu, Gansu Province [J]. Earth and Environment, 2011, 39(4): 478-484.
- [17] PERERA S, LAM N, PATHIRANA M, et al. Deterministic solutions for contact force generated by impact of windborne debris [J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 91: 126-141.
- [18] YAN P, ZHANG J H, FANG Q, et al. Numerical simulation of the effects of falling rock's shape and impact pose on impact force and response of RC slabs [J]. Construction and Building Materials, 2018, 160: 497-504.

[19] 吕庆, 孙红月, 翟三扣, 等. 边坡滚石运动的计算模型[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 79-84.
LYU Q, SUN H Y, ZHAI S K, et al. Evaluation models of rockfall trajectory[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(2): 79-84.

[20] 夏军强, 古安川, 舒彩文, 等. 洪水中人体稳定性条件的理论分析及试验研究[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 4-11.
XIA J Q, GU A C, SHU C W, et al. Criterion of human stability in floodwaters based on theoretical and experimental studies[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(3): 4-11.

[21] BRESSAN L, GUERRERO M, ANTONINI A, et al. A laboratory experiment on the incipient motion of boulders by high-energy coastal flows[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018, 43(14): 2935-2947.

[22] LODHI H A, HASAN H, NANDASENA N A K. The role of hydrodynamic impact force in subaerial boulder transport by tsunami-experimental evidence and revision of boulder transport equation[J]. Sedimentary Geology, 2020, 408: 105745.

(编辑 张 欢)