

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202003066

二维条件下颗粒柱体崩塌入水堆积过程

冯万里^{1,2}, 黄波林^{1,2}, 张 全^{1,2}, 王 健^{1,2}, 郑嘉豪^{1,2}

(1. 防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002;

2. 湖北长江三峡滑坡国家野外研究站, 湖北 宜昌 443002)

摘要:在我国西南地区,以塔柱状危岩体崩塌为扰动源的涌浪次生灾害时有发生。涌浪特征与其扰动源的初始形状和破坏模式关系密切,塔柱状危岩体由下至上、空中崩解的破坏模式与颗粒柱体崩塌相似。区别于以往多试验采用的刚体材料和利用运动距离获得初始动力状态的涌浪试验,本研究设计并进行了不同高度和宽度的颗粒柱体在不同水深下自然崩塌的物理模型试验。运用 PIV 技术分析了颗粒体及水体的运动特征,按颗粒体与水体的相互作用关系将整个过程大致分为了 3 个阶段,并研究了颗粒柱体初始形态对试验结果的影响。结果表明,颗粒柱体崩塌后的残余体积受颗粒体初始形态影响较大,水深对其影响较小。涌浪产生早期,首浪位置与颗粒运动位置有着良好的对应关系;而后,两者的位置逐渐拉开。颗粒柱体高度越高,首浪最大波高出现时的位置与崩塌颗粒群前端位置的差值越大。这可能与流固相互作用后期水体流速大于颗粒流动速度有关。试验产生的涌浪大多具有完整波形,这与柱状颗粒体的散体性及其覆盖堆积特征对水体的作用呈不均匀性有关。涌浪传播过程中,水体在 z 方向上抬升幅度具有一定的渐变性。试验分析结果揭示了柱状危岩体引发涌浪的机制特点,为涌浪灾害防治提供了基础资料。

关键词:柱体崩塌;物理试验;颗粒堆积;涌浪灾害

中图分类号: P642.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)04-0090-07

A study of the process of particle column collapsing into water under 2D condition

FENG Wanli^{1,2}, HUANG Bolin^{1,2}, ZHANG Quan^{1,2}, WANG Jian^{1,2}, ZHENG Jiahao^{1,2}

(1. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang,

Hubei 443002, China; 2. National Field Observation and Research Station of Landslides in the Three

Gorges Reservoir Area of Yangtze River, Hubei Province, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: Impulsive wave and its secondary disasters, which are caused by the collapse of risky tower rocks, occur frequently in southwest China. Characteristics of the impulsive wave are closely related to the initial shape and failure mode of the disturbance source, the failure mode of collapse of risky tower rock mass from bottom to top and disintegrate in the air is similar to that of the collapse of granular column. Different from the rigid body materials and the motion distance to obtain the initial dynamic state used in the past wave test, this paper designs and carries out the physical model experiments of different heights and widths of particle column collapse at different water depths by using the PIV technology to analyze the movement characteristics of particle and water body. According to the interaction between particles and water, the whole process is roughly divided into three stages, and the influence of initial shape of particles on the test results is examined. The

收稿日期: 2020-03-18; 修订日期: 2020-04-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1504800)

第一作者: 冯万里(1997-),男,硕士研究生,主要从事地质灾害及涌浪灾害方面的研究。E-mail:1374023233@qq.com

通讯作者: 黄波林(1979-),男,研究员,博士生导师,主要从事水库地质灾害及涌浪灾害方面的教学与研究工作。

E-mail:bolinhuang@aliyun.com

results show that the residual volume after the collapse of the granular column is greatly influenced by the initial shape of the granular body, while the water depth has little influence on it. There is a good corresponding relationship between the position of the first wave and the position of particle movement in the early stage of impulsive wave, and the distance between them began to increase. The higher the particle column is, the greater the difference between the position of the maximum wave height of the first wave and the position of the front end of the collapse particle group is, which may be caused by the fact that the velocity of the water body in the later stage of the fluid solid interaction is greater than that of the particle flow. Most of the generated waves have complete waveforms, which is related to the inhomogeneity of the effect on the water body caused by the covering accumulation characteristics of the columnar particle collapse and the dispersibility of columnar particles. The experimental results reveal the characteristics of the mechanism of the impulsive wave caused by the risky columnar rocks and may provide the basic data for the prevention and control of the surge disasters.

Keywords: column collapse; physical test; particle accumulation; surge disaster

我国西南部灰岩山区广泛分布塔柱状危岩体^[1]。此地区水库、河道内有大量塔柱状危岩体分布,如位于长江巫峡段左岸的箭穿洞危岩体,其本身的破坏及其引发的涌浪对航道和附近居民建筑等造成严重威胁^[2-3]。塔柱状危岩体压溃式的破坏模式^[4]与柱状颗粒体崩塌相似。国内外学者对塔柱状危岩体的形成条件、破坏模式以及稳定性已进行了多方面的研究。Poisel等^[5]认为硬岩地下伏软弱层是此类危岩体发育的主要特点。贺凯^[6]以甄子岩为例对塔柱状危岩体的变形破坏特征、损伤演化及力学机制等进行了研究。在物理模型方面,用颗粒柱体模拟研究柱体崩塌导致的碎屑流问题屡见不鲜。Lube等^[7]利用散粒材料进行二维柱状崩塌试验,对颗粒滑动距离、残余高度等进行了定量描述。Nguyen等^[8]根据以往研究成果,利用铝棒作为实验材料模拟了真二维条件下的柱状崩塌。黄波林等^[9]利用不同粒径的实验材料进行试验,结果表明崩塌堆积范围受上部颗粒运动特征影响较大。

涌浪作为一种常见于水库、湖泊及河道的地质灾害,会对附近的船只、房屋等造成严重损害,涌浪的扰动源如滑坡、崩塌、泥石流等也会对涌浪形成区造成影响。国内外学者对于涌浪的传播特征如波高、波速及爬高等已进行了多方面的研究。例如:Slingerland^[10]通过模型试验,研究了涌浪的波高与传播距离的关系。潘家铮^[11]依据连续原理推导出水库滑坡垂直和水平运动时涌浪的最大波高公式。石传奇等^[12]假设滑坡体为刚性边界,采用SPH方法模拟了三维条件下的滑坡涌浪过程。宋新远等^[13]采用数值模拟方法较好地模拟了孤立波及涡流的产生。这些学者的研究多集中在涌浪本身的传播特征,对于引发涌浪的扰动源研究

较少。在物理模型实验方面大多采用刚性材料模拟滑体的运动过程和依靠机械设备改变滑体的运动特征,对于运动过程中滑体形态变化关注较少。

对于危岩体崩塌导致的涌浪问题也有一些学者进行了研究^[14-15]。但针对涉水条件下的柱状危岩体崩塌引发的涌浪问题国内关注较少。本次实验采用灰岩颗粒柱体作为涌浪扰动源分析其崩塌—堆积过程,对颗粒柱体的残余体积、颗粒堆积与首浪关系等进行了研究,为水库、河道地区发生的柱状危岩体崩塌产生的涌浪灾害防治提供技术支撑。

1 试验设计

本次试验利用狭长箱体结构模拟二维涉水条件下颗粒柱体崩塌堆积过程。试验数据采集窗口的玻璃箱体尺寸为160 cm×30 cm×120 cm(长×宽×高),箱体透明。试验开始时水体静止,颗粒柱体堆积在箱体一侧,通过滑轮组快速拉动阀门形成临空面创造颗粒崩塌条件。颗粒柱体及主要试验设备见图1。试验的主要目的为:(1)研究涉水崩塌体崩塌入水过程中,各因素对颗粒体最终形态的影响;(2)研究颗粒体与水体的相互作用关系及涌浪特征。

颗粒柱体崩塌过程图像由一台位于实验设备正前方的高速工业相机记录(帧率100 fps)。根据试验图像并基于粒子图像测速(PIV)技术^[16]可获得试验窗口内颗粒的二维流场速度的实时变化值。柱体颗粒的速度可直接捕捉并记录,水体的速度由分布在水体中的示踪粒子的速度近似表示(图1)。柱体颗粒为次棱角乳白色灰岩颗粒,颗粒密度约为2.81 g/cm³,堆积密度约为1.45 g/cm³,粒径为8~13 mm;示踪粒子为黑

色聚碳酸酯颗粒,密度为 $1.10 \sim 1.22 \text{ g/cm}^3$ (图 1)。水体形态变化特征可由位于实验箱体后壁面的网格板结合实验图像辅助记录,网格板精度为 2 cm 。

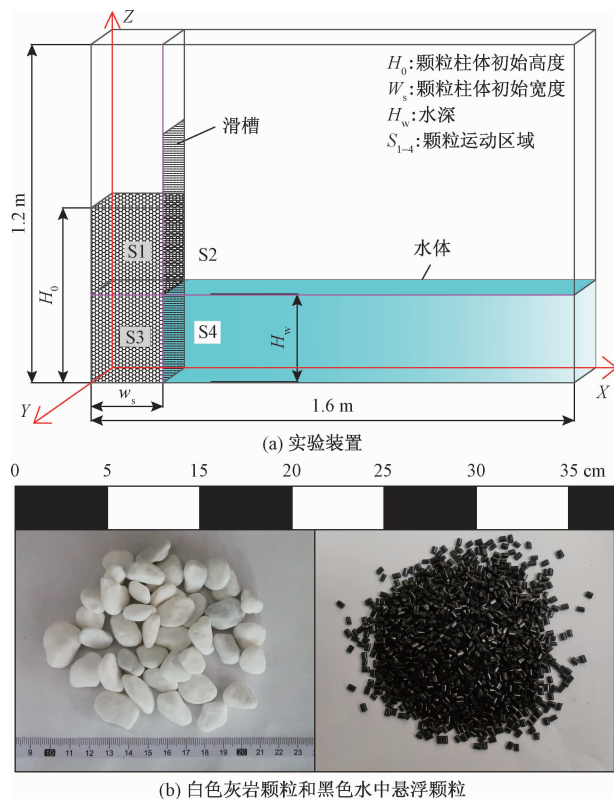


图 1 实验装置和白色灰岩颗粒和黑色水中悬浮颗粒图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental device and photo of the test particles

在二维模型试验研究中,涌浪经验公式考虑的影响因素主要有弗劳德数、滑坡相对单宽体积、滑坡相对厚度、滑坡相对质量^[17]。据此,本次试验人为改变的试验条件有颗粒柱体的高度($40 \sim 120 \text{ cm}$)、宽度($20 \sim 40 \text{ cm}$)及涉水深度($10 \sim 50 \text{ cm}$)。实验组次及条件设计见表 1。

表 1 实验设计及组次编号

Table 1 Orthogonal table and group number of the experimental design

$W_s, H_0 / \text{cm}$	$H_w = 10 \text{ cm}$	$H_w = 30 \text{ cm}$	$H_w = 50 \text{ cm}$
20, 40	NO. 1	NO. 2	NO. 3
20, 60	NO. 4	NO. 5	NO. 6
20, 80	NO. 7	NO. 8	NO. 9
20, 100	NO. 10	NO. 11	NO. 12
20, 120	NO. 13	NO. 14	NO. 15
30, 60	NO. 16	NO. 17	NO. 18
30, 90	NO. 19	NO. 20	NO. 21
30, 120	NO. 22	NO. 23	NO. 24
40, 40	NO. 25	NO. 26	NO. 27
40, 80	NO. 28	NO. 29	NO. 30
40, 120	NO. 31	NO. 32	NO. 33

2 试验过程分析

颗粒柱体崩塌产生涌浪的整个过程可分为三个阶段:颗粒崩塌阶段、颗粒与水体相互作用阶段和涌浪运动阶段。颗粒崩塌阶段以颗粒柱体的崩塌为主,其主要驱动力为颗粒自重,此阶段颗粒重力势能不断转换为颗粒动能。颗粒与水体相互作用阶段为颗粒与水体的相互作用,此阶段的能量转换非常复杂,包括颗粒固体、颗粒间隙中的气体以及水体之间的能量交换^[18]。按照颗粒体与水体相互作用的强弱可分为前期的崩落强作用阶段和后期的覆盖堆积弱作用阶段。期间颗粒动能不断转移至水体,水体势能及动能增加形成涌浪。涌浪运动阶段以水体运动为主,涌浪波高和波速随运动距离的增加而消减。

以编号 NO. 20 组实验为例,图 2 为该组实验的崩塌过程图,图 3 为该组试验颗粒体的平均速度分量变化图。依据颗粒及水体的运动特征可将颗粒崩塌-堆积过程分为四个阶段。

(1) 初始阶段

在滑板抽出的短时间内,柱体颗粒发生应力重分布形成相对滑动-静止面。相对滑动-静止面下方颗粒保持静止,上方颗粒在重力作用下发生下沉。靠近临空面的颗粒以水面为界以自下而上顺序开始向外涌出如图 2(a)。此阶段颗粒速度变化不大(图 3)。

(2) 崩落阶段

此阶段主要是水上颗粒涌出并受重力作用下坠至水平底面的过程。其间颗粒速度不断增加但在进入水体的短时间内,颗粒 Y 方向速度突然减缓(图 3)。柱体崩落过程,由于介质不同,水下颗粒和水上颗粒在运动初期速度存在明显差异,水上颗粒启动快于水下颗粒。当在一定水深及高宽比的条件下时,可观测到颗粒柱体在水面附近出现“折断”现象。在运动方式上,水上颗粒做近似自由落体运动;水下颗粒有多种移动方式:重力驱动为主的垂直移动,由水体带动的漂移以及在底部平板上由于颗粒间作用的水平移动等。

(3) 堆积阶段

在颗粒群运动至底面后的短时间内上部颗粒不断进行覆盖堆积,堆积角度与相对静止角大致相当,相对静止面不断向右上方平移。此阶段颗粒 Y 方向速度急剧减小, X 方向速度不断增大(图 3)。

(4) 涌浪传播阶段

在颗粒运动基本停止后,涌浪继续向远处传播,波高和波速逐渐降低。

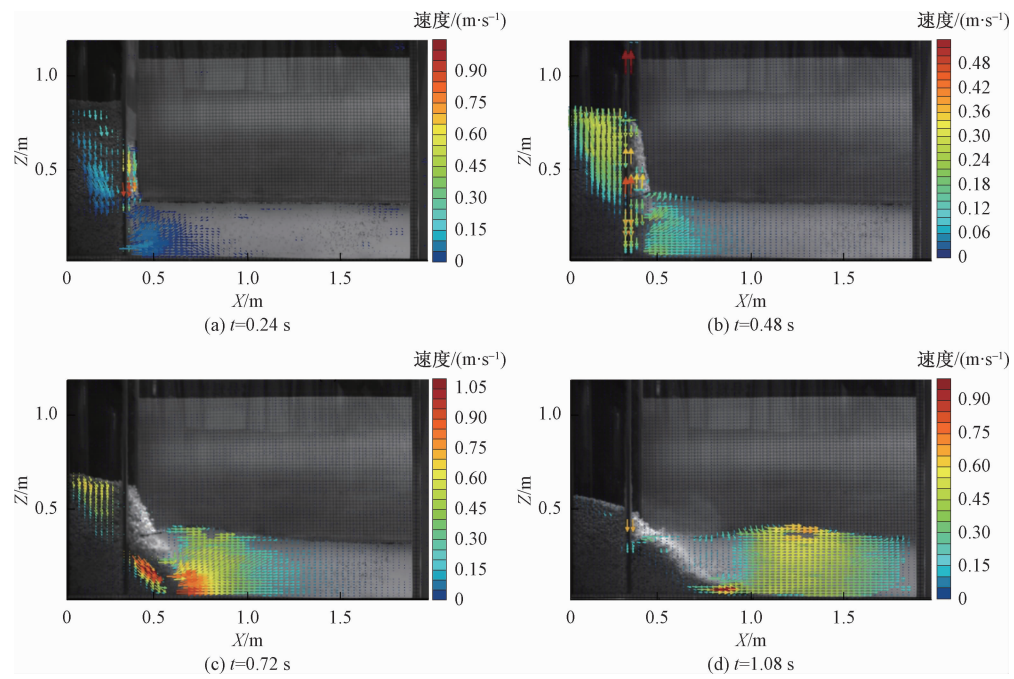


图 2 编号 NO.20 组试验各阶段速度矢量图

Fig. 2 Velocity vector diagrams of each stage of group NO.20

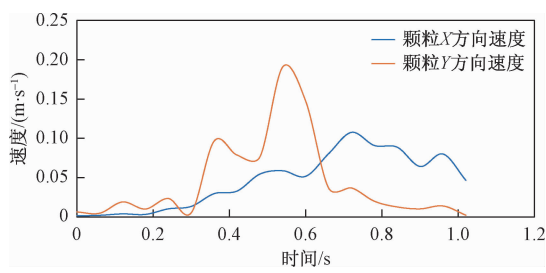


图 3 颗粒体速度分量图

Fig. 3 Particle velocity component diagram

3 实验结果分析

3.1 颗粒特征

本次试验采用灰岩干颗粒间基本没有黏结力,而且最初涌出的颗粒除受自身重力外还有来自侧向相邻颗粒间的作用力,因此最初接触水面的颗粒大多是独立个体。单个颗粒的体积及所携带的能量有限对水体体积不会造成太大影响,但是分散的颗粒体在撞击水面后破坏了水体表面张力,为上方的颗粒群进入水体提供了便利,这在一定程度上减少了坠落颗粒体与水体上部分之间的能量耗散。结果是水体除了由于颗粒侵占体积而造成水位升高外并无较大浪花出现,颗粒体的覆盖堆积也使本次实验观测到的涌浪在形成阶段基本保持完整形态。这与其他以刚体作为扰动源的涌浪试验有着较大差别。为更好地描述颗粒柱体的崩

塌进入水体造成的体积侵占,将试验窗口以水面线所在水平位置和滑槽所在垂直位置为界分为 S1—S4 四个区域(图 1)。

图 4 展示了编号 NO. 20 组实验各区域的颗粒面积变化图,从图中可知在颗粒崩塌过程中存在明显的颗粒崩塌区 S1(面积不断减小),过渡区 S2(面积先增后减),填充区 S4(面积不断增大)和静止区 S3(面积基本不变)。颗粒总面积变化不大,产生波动的原因是空中崩解及刚接触水体时孔隙率增加以及覆盖堆积阶段孔隙率减少。

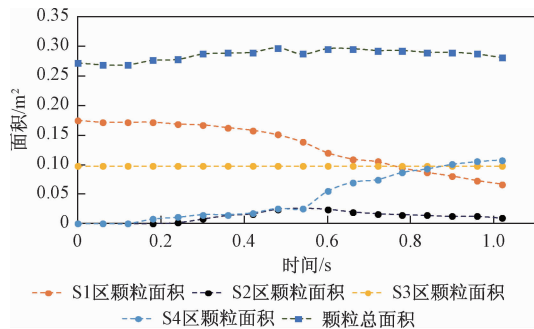


图 4 各区域颗粒面积变化

Fig. 4 Changes in the particle area in each region

一般的危岩体崩塌产生涌浪后危岩体并非全部进入水体,残留下来的危岩体作为最初间接的动力源和最后形成新的边界条件对水体造成影响。对残余体积

的研究有助于判断入水方量及二次灾害的可能性。图 5 表现了各试验组次颗粒柱体残积比(S_1, S_2 区域残余面积与初始面积的比值)的变化特征。从图中可以看出颗粒柱体的高度和宽度是残积比的主要影响因素,其中残积比值与柱体宽度成正比,与柱体高度成反比。水深对颗粒残积比的影响有限,并且随着宽度增加其影响有不断减小的趋势。这可能是由于拥有较大势能的颗粒柱体能够转化为较大动能的碎屑流动,大的动能及其带来的动力效应使得颗粒体的流动性增强。

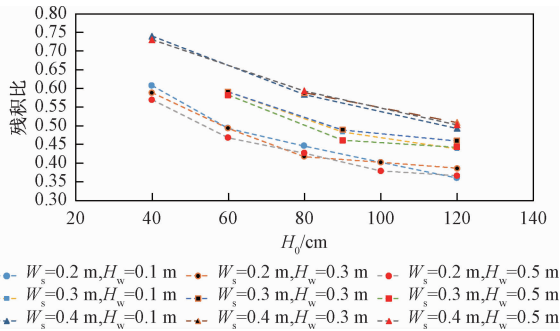


图 5 各组颗粒柱体残积比散点图

Fig. 5 Scatter diagram showing the particle column residue ratio of each group

3.2 流固耦合特征

从编号 NO. 20 组颗粒崩塌过程中可观察到颗粒运动速率在崩落阶段以垂直运动为主,当颗粒群触底后以水平运动为主,而颗粒的体积侵占在崩落阶段基本完成。根据实验颗粒 X 及 Y 方向速度的实时变化图像(图 3)结合实验过程图可知 t 约在 0.6 s 时实验颗粒的主要运动方向发生改变。结合颗粒堆积距离及首浪位置对比图可知在实验颗粒涌出距离与首浪在 X 方向的位置有着良好的对应关系,这是由于在颗粒体水体相互作用早期,颗粒体推动水体形成涌浪,两者的运动速度相近。当 $t > 0.6$ 后颗粒势能几乎不变且动能逐渐减少, $t = 0.84$ s 时首浪达到最大高度且拥有一定势能及动能的情况下,能够继续传播从而使两者间距加大(图 6)。从图 7 可知, H_w 越大两者差值越小, H_0 越大两者差值越大。表明颗粒柱体高度与水深的比值越大,最大首浪出现时距颗粒体越远。由于在颗粒体水体相互作用后期,水体速度的衰减慢于颗粒体。早期波速越大(柱体高度越高),首浪在一定时间内传播越远,与颗粒体前缘的间距越大。

3.3 涌浪特征分析

由于箱体边界条件的限制,颗粒体积对水体体积

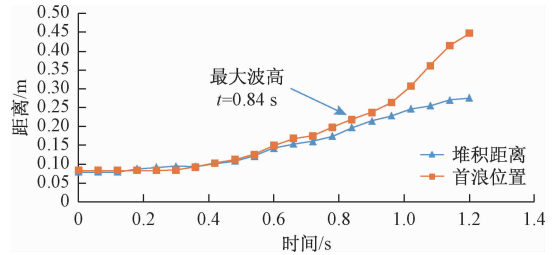


图 6 颗粒堆积距离与首浪位置比较

Fig. 6 Comparison between the particle accumulation distance and the position of the first wave

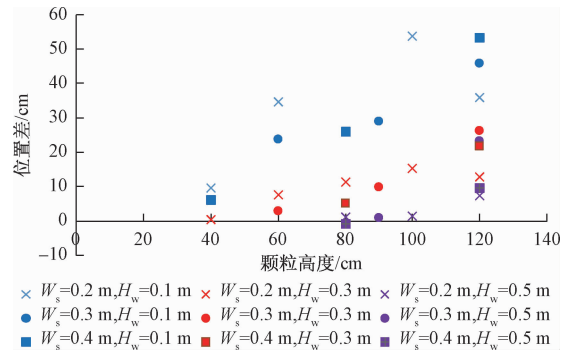


图 7 各组次最大首浪与颗粒堆积位置差

Fig. 7 Position difference between the second largest initial wave and the particle accumulation of each group

的影响只存在于 X 方向和 Z 方向,因此二维条件下波浪高度应比三维条件下稍高。图 8 展示了编号 NO. 20 试验颗粒及水体形态变化。从图中可知颗粒体在崩塌过程中对水体的体积侵占大部分集中在最大首浪出现前($t = 0.84$ s)。庞昌俊^[19]在刚体激发涌浪的实验研究中提到滑体与水面的相对位置会影响涌浪形态。本次实验材料的散体性对水体影响非常大,颗粒体的覆盖堆积使得颗粒与水体的作用面自下而上逐渐减少。因此,在水深较浅时,颗粒体充足且能量传递效率较高,从而形成后端波幅远大于前端波幅的波型。随着水深增加,颗粒体对水体的推动集中在水平底面上一定范围内。当水深大于颗粒高度时,水体还会填补颗粒崩塌后形成的空腔从而表现出海底滑坡的性质,即波谷大于波高^[20]。

对于涌浪传播阶段的水体特征,在 $X = 94$ cm, $Z = 3.9, 10.3, 15.1, 19.5, 25.4$ cm 处分别选取一颗悬浮示踪粒子,追踪其运动轨迹(图 8)。

从图 9 可知,水体受颗粒柱体崩塌影响水位抬高,越接近底部的水体在 Z 方向的位移越小。水体在涌浪波的传递过程中不仅是上下移动,在 X 方向上也有一定的位移量。在 NO. 20 试验中,水体在 $X = 94$ cm

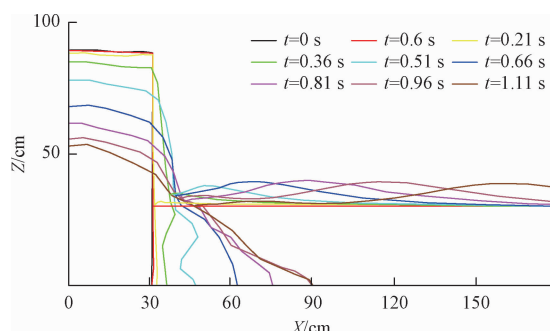


图8 NO.20 试验颗粒轮廓及水位线变化

Fig.8 Changes in grain profile and water level of group No.20

处水平位移约为 24 cm,水体平均传播速度为 0.04 m/s。若忽略水面波动的影响,水体水平位移面积为 720 cm²,是颗粒柱体侵占水体体积的 66.8%。

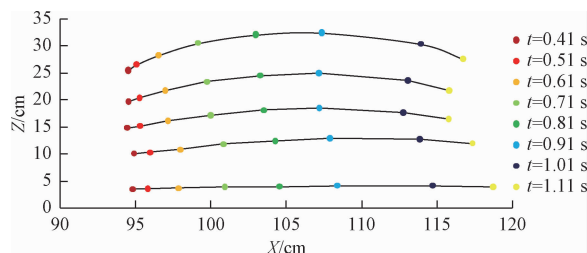


图9 悬浮颗粒运动轨迹

Fig.9 Trajectory of the suspended particles

4 结论与建议

(1) 涉水条件下颗粒柱体崩塌后的残余体积与水关系较小,与颗粒柱体的长宽比成反比。

(2) 在涌浪产生初期,首浪位置与颗粒运动距离差值较小,随着涌浪传播两者差值加大。最大波高出现时的首浪位置与此时的颗粒运动位置差值与柱体高度成正比,与水体深度呈反比。

(3) 柱状颗粒体崩塌的覆盖堆积特征使得其对水体的作用呈现不均匀性,涌浪传播过程中水体的抬升在深度方向上存在渐变性,越接近底部水体在 Z 方向的位移越小。

建议开展三维条件下的模型试验,进一步研究边界条件对颗粒体及水体运动的影响。

参考文献 (References):

[1] 贺凯,殷跃平,冯振,等.重庆南川甄子岩-二垭岩危岩带特征及其稳定性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2015,26(1):16-22. [HE K, YIN Y P, FENG Z, et al. Analysis of characteristics and

stability for Zengziyan-Eryayan unstable rocks belt in Nanchuan County Chongqing[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Prevention and Control, 2015, 26(1): 16-22. (in Chinese)]

[2] 张枝华,杜春兰,余妹,等.三峡库区巫峡箭穿洞危岩体稳定性分析及防治工程设计[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(2):48-54. [ZHANG Z H, DU C L, YU S, et al. Stability analysis and design of control works on Jianchuandong dangerous rockmass in Wuxia Gorge, the Three Gorges Reservoir [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Prevention and Control, 2008, 29(2): 48-54. (in Chinese)]

[3] 刘广宁,黄波林,王世昌,等.三峡库区箭穿洞危岩体涌浪数值模拟分析[J].长江科学院院报,2013,30(10):37-41. [LIU G N, HUANG B L, WANG S C, et al. Numerical simulation on waves generated by the instability of Jianchuandong perilous rock in Three Gorges reservoir area [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(10): 37-41. (in Chinese)]

[4] 贺凯,殷跃平,李滨,等.塔柱状岩体崩塌运动特征分析[J].工程地质学报,2015,23(1):86-92. [HE K, YIN Y P, LI B, et al. Analysis of the characteristics of the collapse movement of the pylon rock mass [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(1): 86-92. (in Chinese)]

[5] POISEL R, EPPENSTEINER W. A contribution to the systematics of rock mass movements [C]//5th Int. Symposium on Landslides, 1988: 1353-1357.

[6] 贺凯.塔柱状岩体崩塌机理研究[D].西安:长安大学,2015. [HE K. Study on the collapse mechanism of tower columnar rock mass [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese)]

[7] LUBE G, HUPPERT H E, SPARKS R S J, et al. Collapses of two dimensional granular columns [J]. Physical Review E, 2005, 72(4): 041301.

[8] NGUYEN C T, BUI H H, FUKAGAWA R. Failure mechanism of true 2D granular flows [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2015, 48(6): 395-402.

[9] 黄波林,张全,王健,等.层状颗粒柱体崩塌-堆积过程研究[J].水利水电技术,2019,50(11):110-117. [HUANG B L, ZHANG Q, WANG J, et al. Study on collapse-deposit process of layered granular column [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(11): 110-117. (in

- Chinese)]
- [10] SLINGERLAND R, VOIGHT B. Evaluating hazard of landslide-induced water waves [J]. Journal of the Waterway Port Coastal and Ocean Division, 1982, 108(4): 504 – 512.
- [11] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定与滑坡分析 [M]. 北京:水利出版社, 1980: 133 – 151. [PAN J Z. Analysis of anti-sliding stability and landslide of buildings [M]. Beijing: water conservancy press, 1980:133 – 151. (in Chinese)]
- [12] 石传奇,安翼,杨家修. 滑坡涌浪的三维 SPH 方法模拟及其工程应用 [J]. 中国科学:物理学力学天文学, 2015, 45 (10): 57 – 65. [SHI C Q, AN Y, YANG J X. A SPH based numerical method of landslide induced impulse wave and its application on Huangtian landslide event [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2015, 45 (10): 57 – 65. (in Chinese)]
- [13] 宋新远,邢爱国,陈龙珠. 基于 FLUENT 的二维滑坡涌浪数值模拟 [J]. 水文地质工程地质, 2009, 36 (3): 90 – 94. [SONG X Y, XING A G, CHEN L Z. Numerical simulation of two-dimensional water waves due to landslide based on FLUENT [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36 (3): 90 – 94. (in Chinese)]
- [14] 黄波林,陈小婷,殷跃平,等. 滑坡崩塌涌浪计算方法研究 [J]. 工程地质学报, 2012, 20(6): 909 – 915. [HUANG B L, CHEN X T, YIN Y P, et al. Computing system for impulse wave in reservoir generated by landslide & rockfall [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20 (6): 909 – 915. (in Chinese)]
- [15] 代云霞,汪洋,殷坤龙,等. 三峡库区巫山县某崩塌体涌浪调查及计算分析 [J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(19): 71 – 74. [DAI Y X, WANG Y, YIN K L, et al. Surge survey and calculation analysis of a landslide in Wushan County in the Three Gorges reservoir [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(19): 71 – 74. (in Chinese)]
- [16] 冯旺聪,郑士琴. 粒子图像测速 (PIV) 技术的发展 [J]. 仪器仪表用户, 2003, 10(6): 1 – 3. [FENG W C, ZHENG S Q. Development of particle image velocimetry (PIV) technology [J]. Electronics Instrumentation Customer, 2003, 10(6): 1 – 3. (in Chinese)]
- [17] 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 K L, LIU Y L, WANG Y, et al. Physical model experiments of landslide-induced surge in Three Gorges Reservoir [J]. Earth Science, 2012, 37 (5): 1067 – 1074. (in Chinese)]
- [18] ROBBE SAULE M, MORIZE C, BERTHO Y, et al. Experimental study of wave generation by a granular collapse [J]. EPJ Web of Conferences, 2017, 140:14007.
- [19] 庞昌俊. 二维斜滑坡涌浪的试验研究 [J]. 水利学报, 1985, 16(11): 54 – 59. [PANG C J. Experimental study on the surge of two dimensional oblique landslide [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 16(11): 54 – 59. (in Chinese)]
- [20] 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 Y F, HUANG B L, ZHAO Y B. A study of the submarine landslide-induced impulse wave based on physical experiments [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 45 (1): 116 – 122. (in Chinese)]

编辑:张若琳