

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201812090

地震对散粒体滑坡堆积体形态影响的模型试验研究*

陈志雄^{1,2}, 杨鹏³, 仇文岗^{1,2}, 刘汉龙^{1,2}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;
3. 国网抚州供电公司, 江西 抚州 344000)

摘要: 考虑地震波输入的情况下, 运用美国 ANCO 公司地震模拟振动台系统开展室内小尺寸的模型实验, 研究在不同的振动方向和振动频率下, 滑坡—碎屑流的堆积规律。实验发现, 振动方向对堆积体的形状影响显著, 振动方向为水平时, 冲程的值比振动方向为竖直时的值要大, 而堆积宽度和厚度的值却比振动方向为竖直时要小。振动频率对于散粒体的堆积分布影响显著; 在不同的振动方向上, 水平和竖直两种振动方向对于堆积体的各个特征影响互有差异。

关键词: 散粒体滑坡; 振动台模型实验; 振动频率; 振动方向; 堆积体特征

中图分类号: TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)02-0211-10

Model Experimental Study of Granular Landslide under Vibration Conditions

CHEN Zhixiong^{1,2}, YANG Peng³, ZHANG Wengang^{1,2}, LIU Hanlong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. National Joint Engineering Research Centre for Prevention and Control of Environmental Geological Hazards in the TGR Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. Fuzhou electric supply company of state grid, Fuzhou 344000, China)

Abstract: A small-scale shaking table model test was carried out to investigate the characteristics and regularities of the granular landslide deposits under influences of different vibration frequencies and orientations. The sliding granule was subjected to the horizontal and vertical seismic waves. The maximum displacement of the debris, as well as the width, thickness and distribution area of the deposit was measured. Results indicate that the deposit shape is significantly influenced by the excitation frequency. The maximum displacement of granule and the width, thickness and area of the deposit increase with enhanced frequency when a horizontal vibration is exerted. The maximum displacement of granule is relatively small and the deposit width and thickness are larger when the vibration orientation is vertical. This study summarizes the characteristics and regularities of landslide deposits under different vibration frequencies and orientations through the model test and provides preliminary guidelines

* 收稿日期: 2018-12-31; 修回日期: 2019-02-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778092; 51608071; 51778090)、重庆市基础科学与前沿技术研究专项项目(cstc2017jcyjAX0073)资助

作者简介: 陈志雄(1980—), 男, 副教授, 博士。主要从事地震工程、砂土液化方面的研究。E-mail: chenzhixiong@cqu.edu.cn

for design of engineering protective structures.

Keywords: granular landslide; shaking table test; vibration frequencies; vibration direction; deposit characteristics

引言

地震滑坡是一种严重的自然地质灾害,我国幅员辽阔,地理环境复杂,山地,丘陵分布广泛,这些地质条件在一定程度上为地震滑坡的发生提供了必要条件。特别是我国的西南地区,地震频发,由此导致的滑坡造成了非常大的人员伤亡和经济损失,给社会的发展带来了很不利的影响。2014年云南鲁甸地震诱发了大量的山体滑坡,据之后研究结果,鲁甸地震至少触发了10 559处同震滑坡^[1]。2015年尼泊尔中部廓尔喀地震同样触发大量滑坡,事后统计此次地震至少触发47 200处滑坡,造成数万人人员伤亡^[2]。在2008年汶川地震中,王家岩滑坡位于北川县老县城城区西侧,主震结束后几分钟,山体突然松动溃散,约140万 m³的岩体迅速自980 m高程冲向北川老县城城区,瞬间将大半个老县城城区掩埋于滑坡体下。滑坡堆积体纵向长273 m,横向宽343 m,堆积平均厚度约20 m,面积约52 422 m²;北川中学新区滑坡位于王家岩滑坡的北东侧,强烈的地震使得该部位松散破碎的灰岩块体崩塌而下,瞬间将其下部北川中学新区及水电局等大量建筑掩埋,造成约700伤亡。滑坡堆积体纵向长度约440 m,厚度约5~20 m,根据滑坡形成和堆积特征,北川中学滑坡分为滑源区和堆积区。

在对这些地震滑坡的进一步研究中,一种与普通滑坡不同形式地质灾害滑坡—碎屑流引起了大家的注意,例如上文提到的北川中学新区滑坡这种由细小松散土石块组成的堆积体由于地震的促发作用形成高速,破坏力极强的集崩塌,滑动为一体的复合性地质灾害^[3],具有运动距离远,堆积范围大的特点。因此探究此类滑坡的失稳条件,滑动规律和堆积规律。建立边坡稳定性评价体系和灾害预估体系,具有一定的社会现实意义和工程应用价值。

滑坡堆积体的现场实测方法因实施难度大安全风险高而少用,室内模拟散粒体滑坡所形成的堆积规律还是比较容易获得^[4-7]。室内模型试验方面,O.Hunger^[8]等运用室内模型实验观测干沙在滑坡滑

动过程中的规律。郝明辉^[9]等采用室内模型试验研究了散粒体碎屑流在高速滑坡过程中的颗粒分离问题,得出了小颗粒含量,粒径差,滑床糙率等因素对于颗粒分离的影响。L Gert^[10]等通过室内模拟实验研究了砂子在不同坡度的条件下,滑坡堆积体的堆积特征。雷先顺^[11]等利用模型试验研究了不同滑道坡度和宽度的条件下,堆积体的特征规律。理论研究方面,吴越^[12]等根据滑体下滑过程的机理,提出了一种考虑内部耗能的运动模型,建立了运动学的控制方程,同时推导出黏阻力的计算公式。樊晓一^[13]等通过模型实验建立了考虑落差,体积,地形参数的坡脚型和偏转位移型滑坡运动距离的拟合方程。数值模拟方面,李祥龙^[14]等通过数值模型试验,模拟了岩石碎屑流的滑坡堆积过程和堆积体的最大冲程。大部分学者通过室内模型试验研究了静止状态下散粒体滑坡过程中散粒体的滑动过程,碰撞机理,建立散粒体的运动方程和堆积体的拟合方程,以及不同的滑道夹角和滑道宽度下堆积体的特征规律,少部分学者还通过数值模拟探究了滑坡堆积体的最大冲程。少有试验研究由于地震波触发的滑坡过程中滑坡体的运动规律和堆积体形态特征。与普通的滑坡不同的是,有地震波输入时的滑坡,滑坡堆积体的前部边缘有着不同的形状,据统计,汶川地震导致的大量滑坡,“边缘突出”和“尖点凸起”的特征明显。这是由于滑坡体在地震波导致的振动甚至是抛掷作用下与下部堆积区域发生强烈撞击形成长程滑坡,堆积体呈现明显的凸起状^[15]。S.Martino^[16]等认为,滑坡的特点是具有复合旋转平移机制的多个阶的活动,地震引发的滑坡位移受到地震波一维和二维的作用影响。宋健,高玉峰^[18]等认为地震地面运动可以在不同的方向上变化,这些方向需要纳入地震滑坡灾害评估。因此本文通过室内物理模拟实验,利用振动台系统模拟地震条件下的松散堆积的岩石碎屑发生失稳导致的滑坡,主要研究不同频率和振动方向对于堆积体形态的影响。为进一步研究在地震条件下滑坡体的堆积影响范围提供一定的依据和参考,对于在地震多发的山区附近的居民房屋,耕作选址提供一

定的参考。

1 室内滑坡模型

1.1 实验设备和装置

试验在重庆大学 ANCO 小型土工振动台完成,该设备台面尺寸为 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$,具有水平和竖直两个振动方向,振动台的最大荷载为 $1\ 000\text{ kg}$,最大加速度为 $2g$,最大振动频率为 50 Hz (图 1)。

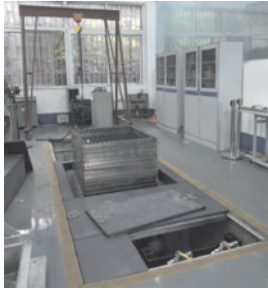


图 1 美国 ANCO 公司地震模拟振动台

Fig.1 Earthquake simulation shaking table of American ANCO company

滑坡可分为三个阶段:启动阶段、加速阶段和堆积阶段。本文实验装置依据这三个阶段分别设置了滑坡启动区、加速区和堆积区。启动区为亚克力板材料制成的模型槽,大小为 $19\text{ cm} \times 12\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 高)。模型槽前面设置一挡板,挡板由胶带简易搭接,当输入地震荷载时,挡板自动打开,模型槽内砂石自动下滑。加速区是用角钢焊接而成的上部倾斜的试验架,斜坡上铺亚克力板,并在亚克力板的两边架起两块挡板,挡板可以防止砂石颗粒落下,调节挡板的位置,也可以控制不同的入口宽度 a ,出口宽度 b 和侧壁挡板的夹角 β 。加速区的宽度为 60 cm ,根据实验的不同要求,可以调节实验架后面的两根支架,设置不同的坡度和坡高,这样就形成了加速区的坡面。如图 2 所示,在实验架底部伸出两根横梁,在横梁上铺设方形的亚克力板。由加速区落下的砂石堆积在水平的压克力板上,在水平压克力板上画 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的方格,便于观察堆积体的分布范围和面积,这样就形成了滑坡的堆积区。这三个区域通过试验钢架形成一个整体固定在振动台面上。装置示意如图 3 所示。

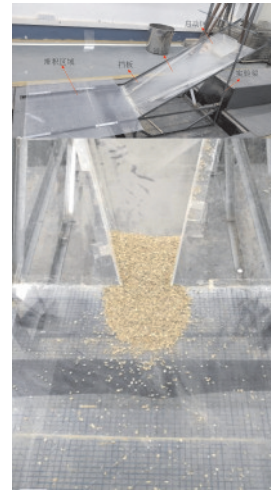


图 2 装置实物

Fig.2 Physical diagram of the device

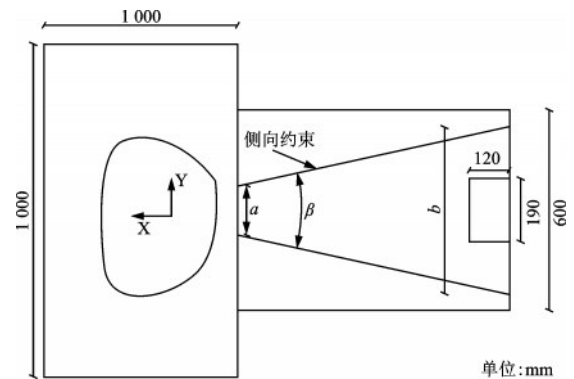


图 3 装置示意(俯视)

Fig.3 Schematic diagram of the device(vertical view)

1.2 实验材料制备

实验材料为重庆大学附近采石场周边选取的粗砂和碎石,碎石为灰白、青灰色至块状中细粒长石英砂岩。粗砂的粒径范围为 $2\sim 5\text{ mm}$,其中 $2\sim 3\text{ mm}$ 含量为 41% , $3\sim 5\text{ mm}$ 的含量约为 59% 。碎石的粒径范围为 $5\sim 15\text{ mm}$, $5\sim 10\text{ mm}$ 的含量为 35% , $10\sim 15\text{ mm}$ 的含量为 65% 。材料实物如图 4 所示,材料物理力学性质见表 1。碎石的磨圆度不高,分选性差。实验用砂石均洗净后放置烤箱后烘干。材料的级配曲线如图 5 所示。

1.3 实验方案设计

实际地震波为横波和纵波相叠加的一种复合型波,波的频率和振幅复杂,本次试验为了探究地震波的方向和频率对于最终堆积体的影响,在考虑

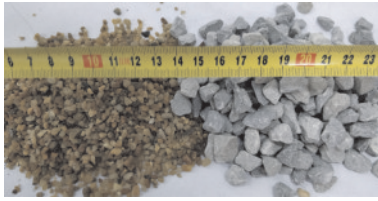


图4 试验材料
Fig.4 Test material

表1 试验材料的物理力学性质指标

Table 1 Physio-mechanical parameters of testing material

颗粒种类	粒径/ mm	重度/(kN· mm ⁻³)	含水 率/%	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ kPa
粗砂	2~5	14.5	1.0	39.58	0.03
碎石	5~10	13.7	1.2	33.15	0.01

了滑道侧壁夹角的情况下,综合对比了不同的振动方向和振动频率对滑坡堆积体形态的影响。本次试验所用的输入波为加速度峰值为0.4g的正弦波,实验具体方案见表2。A组实验对比了有地震波(频率为5 Hz)输入条件下(振动)和无地震波条件下(静止)堆积体形态的不同;B组实验探究了水平振动的频率对于滑坡堆积体形态的影响;C组实验

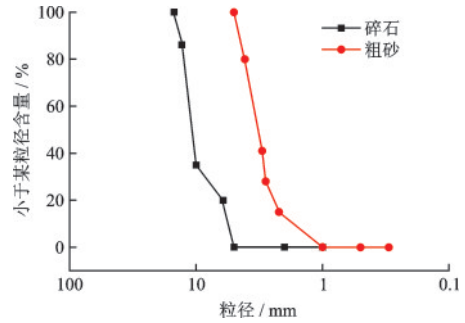


图5 实验材料级配曲线

Fig.5 Gradation curve of experimental materials

探究振动方向对于滑坡堆积体的影响。

实验所用的粗砂和碎石体积均为1.2 L。振动台开始工作时,启动区挡板由于振动瞬间打开,启动区中的砂子或碎石由于重力作用开始滑动,经过加速区的滑动,最终堆积在底部平板上。滑坡过程结束后用卷尺测量滑坡颗粒的最大冲程和堆积宽度,用直尺量出堆积体最大厚度。并用冲程和堆积宽度的乘积表示堆积体的分布面积。通过以上的现场测量,再把数据整合,处理,得出了一些振动方向和频率对滑坡堆积体形态影响的规律。

表2 实验方案

Table 2 Experimental plan table

组别	组号	振动方向	振动频率/Hz	侧壁角度 β /(°)	备注
A	A1	水平	10	5	加速度0.4g,振动时间15 S,滑道坡度30°
	A2			10	
	A3			15	
	A4			20	
	A5			25	
	A6	静止	0	5	
	A7			10	
	A8			15	
	A9			20	
	A10			25	
B	B1	水平	0	20	加速度0.4g,振动时间15 S,滑道宽度40 cm,坡度30°
	B2		5		
	B3		10		
	B4		15		
C	C1	竖直	5	20	加速度0.4g,振动时间15 S,滑道坡度30°
	C2		10		
	C3		15		

2 实验结果分析

2.1 滑道夹角及地震波的影响分析

A组实验中,滑道上部宽度 a 不变,改变下部出口宽度,使侧壁角度分别为 5° 、 10° 、 15° 、 20° 和 25° 。从实验结果可以看出,滑道夹角对于堆积体形态影响明显,如图6所示。地震波对于滑坡体的运动过程和最终的堆积形态具有一定影响。没有地震波输入条件下,堆积体的边缘有很多散落的颗粒,边缘的界限不明显;有地震波输入的对照组中堆积体边缘界限十分明显,周边散落的颗粒较少。对比粗砂和碎石的实验结果可知,地震波对于颗粒较大的滑坡体堆积形态的影响更加明显。

堆积厚度方面,当夹角 β 较小时(5° , 10° , 15°)堆积厚度变化不明显,甚至基本不变,但随着 β 角变大(20° , 25°),堆积厚度呈线性增大;堆积宽度方面,随着 β 角的逐渐增大,堆积体组建向中间靠拢,堆积宽度逐渐变小,两侧滑道对堆积形态影响显著。具体如图7,8所示。

堆积形态方面,没有地震波输入时堆积体的形态表现为向前延伸,向两边扩展,前边缘平缓齐平,甚至出现分叉现象;当有地震波输入时,滑坡体的前边缘不再平缓而是变成锥状,向前延伸的特点更明显,由于滑道角度 β 起到主要限制作用,堆积体宽度几乎不变,整体更加狭长。地震对波堆积形态影响显著。

在有地震波的状态下,粗砂和碎石堆积体的冲程和面积都明显较大,可以推测滑坡的冲程和影响区域都会变大。从能量的角度来看,滑坡体在下滑的过程中发生能量损耗的阶段主要有在下滑的过程中颗粒与颗粒之间的碰撞、颗粒和滑道的摩擦以及由滑道接触水平地面时和地面之间的撞击。无地震波条件下,滑坡体下滑的能量主要是由重力势能提供,重力势能转化为动能,使得滑坡体产生向下滑动的速度;有地震波情况下,颗粒下滑的能量来源不仅有重力势能,地震加速度也能够为颗粒提供能量,从而导致砂子和碎石获得更多的动能,冲程变远。从颗粒的堆积结构来看,没有地震波输入条件下,当颗粒开始堆积时,堆积在出口中部的颗粒阻碍着后面颗粒的运动路径,使得大部分颗粒堆积在出口处,堆积体的前面部分呈扁平状,并且由

于前面部分颗粒的阻挠,大部分颗粒堆积在滑道上,颗粒的堆积结构形成之后不会改变;在有地震波输入条件下,首先到达平面堆积区域的颗粒由于振动的作用向前滑动不会堆积在出口处阻碍后面颗粒运动,基本上所有的颗粒都堆积在平面堆积区域上,很少量的颗粒堆积在滑道上。这是堆积体面积变大的一个原因,同时当颗粒全部进入堆积区域时,颗粒的堆积结构并不是很稳定,由于振动的作用,整体的堆积结构会发生变化,堆积体逐渐向四周扩散,这是堆积面积变大的另一个原因。

2.2 水平振动频率的影响分析

B组实验设置了5种水平振动频率,其它的振动参数为加速度 $0.4g$,振动时间为 15 s 。在实际情况中,坡度较低时边坡相对稳定,在地震波诱发状态下才会产生失稳。故实验坡度设置为 30° 。

如图9所示,当频率为 0 时,堆积体的前部边缘呈扁平状,堆积体的界限不明显;频率为 15 Hz 时,堆积体前部边缘呈凸出状,边缘界限清晰,在实验频率范围内,随着频率越大对比越明显。如图10所示,有地震波输入条件下,粗砂和碎石的冲程、宽度、堆积厚度以及堆积覆盖面积在实验的频率范围内都是呈增长的趋势,且碎石的四项测量指标均高于粗砂。这说明地震波能量输入对于颗粒的堆积形态的影响显著。并且对于大颗粒材料影响更大。

低频率对粗砂颗粒冲程和堆积面积的影响不大,随着频率增大到 15 Hz 时,冲程和面积都开始显著增大,在一定的范围内,颗粒冲程和堆积面积随着频率的增大而增大,高频率对于冲程和堆积体覆盖面积的影响较大。滑坡体在加速滑动阶段,有地震波输入条件下砂子的碰撞过程与没有地震波输入时变的不同,砂子的磨圆度较高,当频率很小时,这种变化不是很明显,砂子额外获得的能量较小,冲程的变化比较微弱,与砂子相比,碎石的磨圆度差,有地震波输入时获得能量差异要比砂子大,实验结果显示在有地震波输入条件下的冲程明显比静止状态时的大。

对于碎石,堆积宽度开始随着频率的增大而增大,当频率增大到一定程度时,堆积宽度便不再发生变化。有地震波输入条件下,堆积体的最大堆积厚度明显大于静止状态下时的最大堆积厚度,同时低频率的振动对最大堆积厚度的影响不明显,频率升至 15 Hz 时,振动对于最大堆积厚度的影响变得

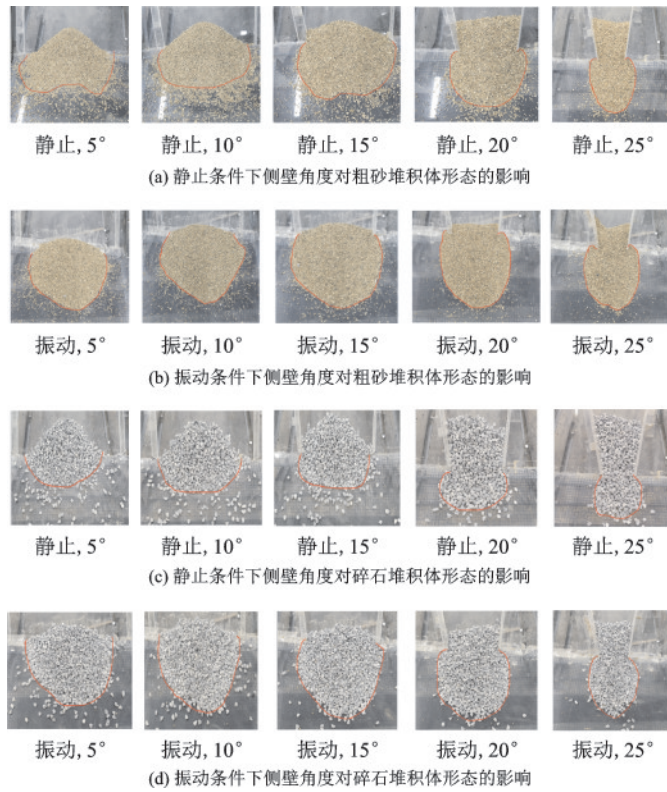


图6 振动和静止两种方式下粗砂和碎石的堆积体

Fig.6 Deposit of coarse sand and gravel with and without vibration at a side angle ranging from 5° to 25°

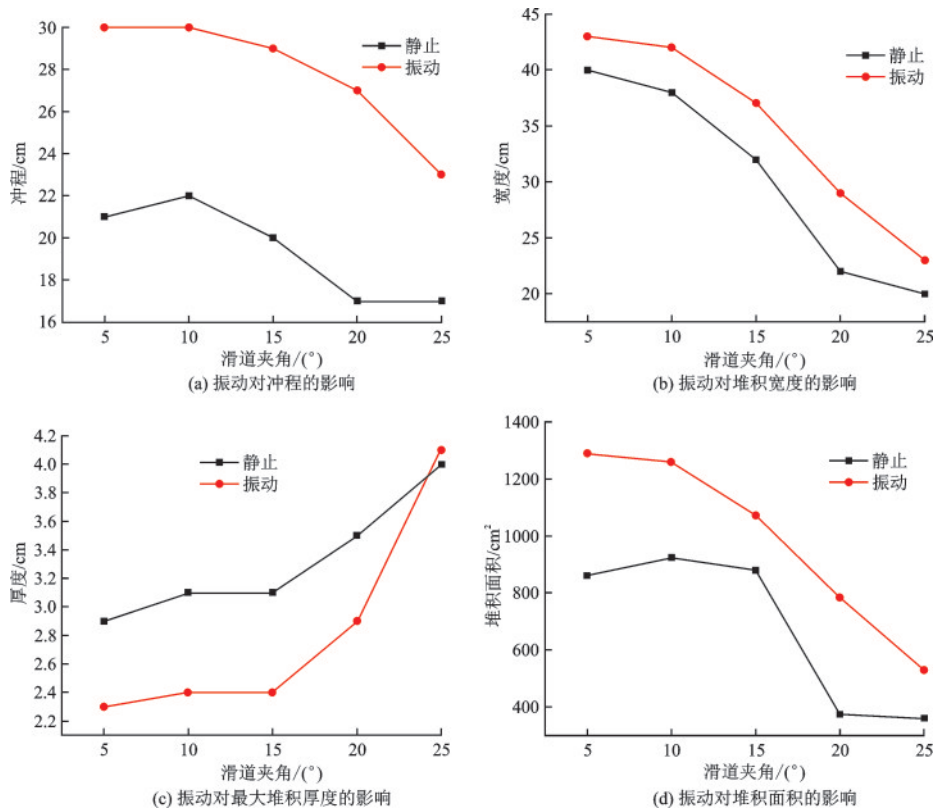


图7 振动对于砂粒滑坡堆积体形态的影响

Fig.7 Influence of vibration on distribute characteristics of coarse sand deposit

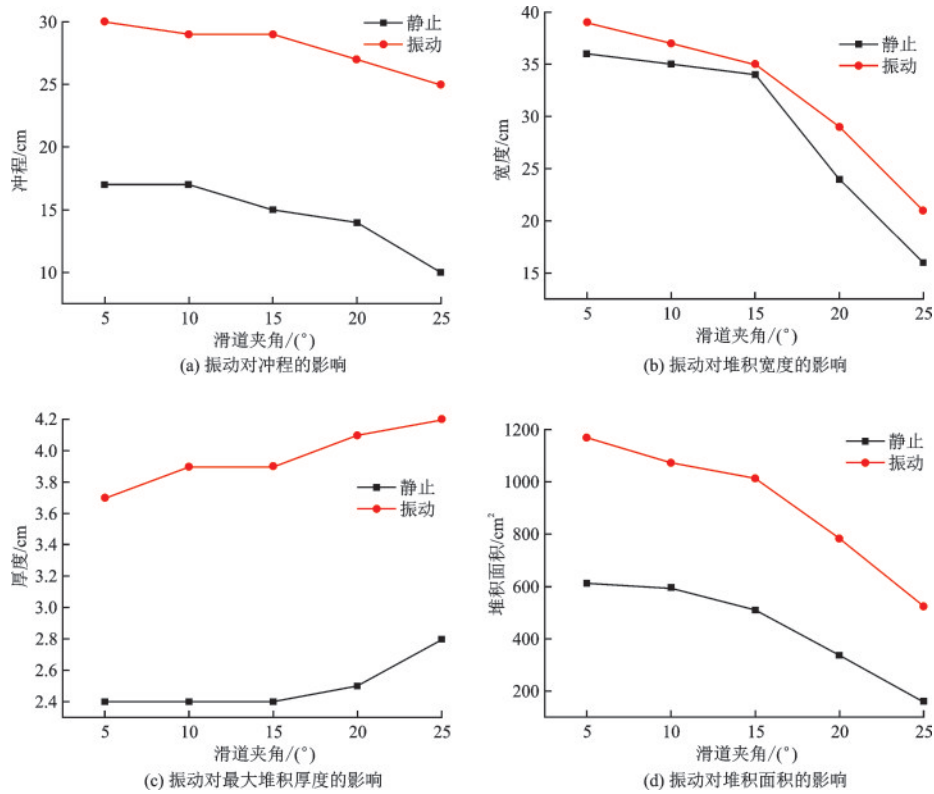


图8 振动对于碎石滑坡堆积体形状的影响

Fig.8 Influence of vibration on distribute characteristics of gravel deposit

明显,分析其原因为碎石的磨圆度差,低频率的振动对于堆积在滑道上的碎石影响较小,残留在滑道上的碎石下落不明显,一旦频率的值足以能够让碎石的堆积结构发生破坏,滑道上的碎石也就下落叠在坡脚的堆积体上,厚度增加。

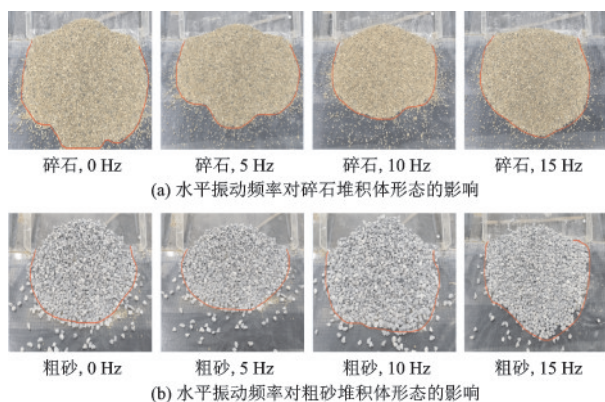


图9 水平振动频率与滑坡堆积体形态的关系

Fig.9 The relationship between horizontal vibration frequency and deposit shape of landslide

2.3 振动方向的影响分析

在实际的地震滑坡中,滑坡体既受到水平方向

地震波作用,也受到竖直方向地震波作用,C组实验设置了水平和竖直两种方向的振动,探究滑坡堆积体在这两种情况下堆积形态的差异。

图 11 是竖直振动方向下粗砂和碎石的堆积状态。具体的各项指标如图 12~13 所示。由于竖直方向和水平方向的振动对于散粒体水平方向能量的影响不同,并且两种振动方向对于滑坡堆积体结构的影响也不同,导致散粒体的一些形状指标在两种条件表现出不同的变化趋势,水平方向的地震波使得散粒体在滑动初期就获得水平方向上的加速度,水平方向能量增加,而竖直方向地震波导致的散粒体竖直方向的振动造成散粒体在水平方向能量的损失,如图 12(a), 13(a) 所示,水平振动下的散粒体冲程比竖直振动下的大;同样从堆积体结构的角出发,竖直方向的地震波对于堆积体结构的破坏程度比水平方向地震波的大,振动方向竖直时,位于堆积区的堆积体结构垮塌,向四周扩散,堵塞在滑道上的颗粒继续下滑并堆积在堆积区颗粒的表面,散粒体的最大堆积宽度,最大堆积厚度均比水平振动条件下的大。

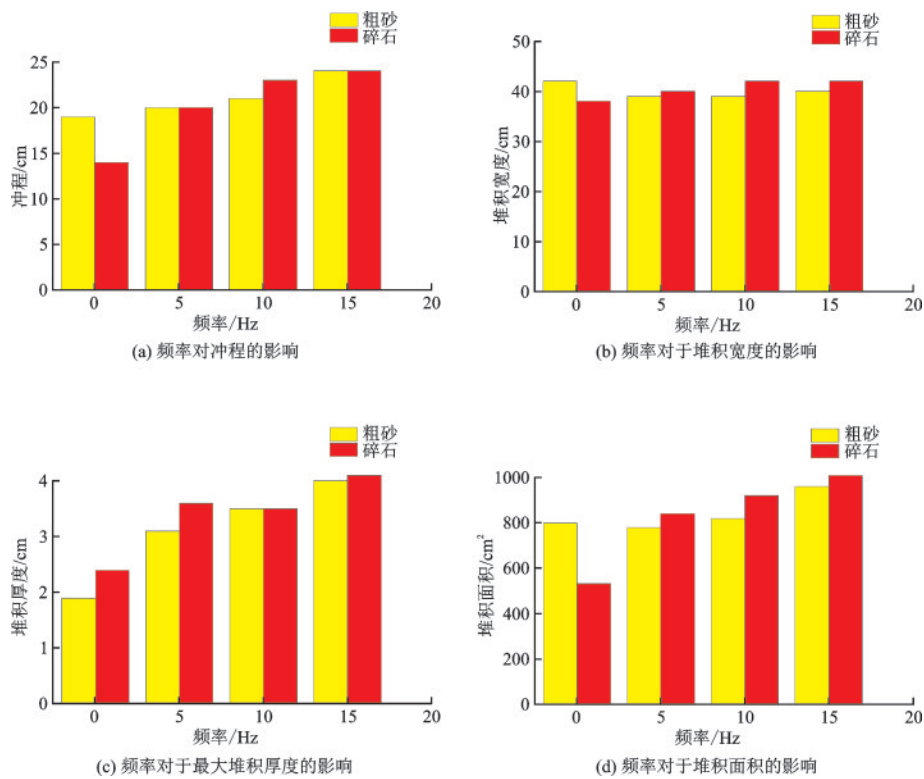


图 10 水平振动方向不同频率的影响

Fig.10 Influence of horizontal vibration frequencies on deposit characteristics

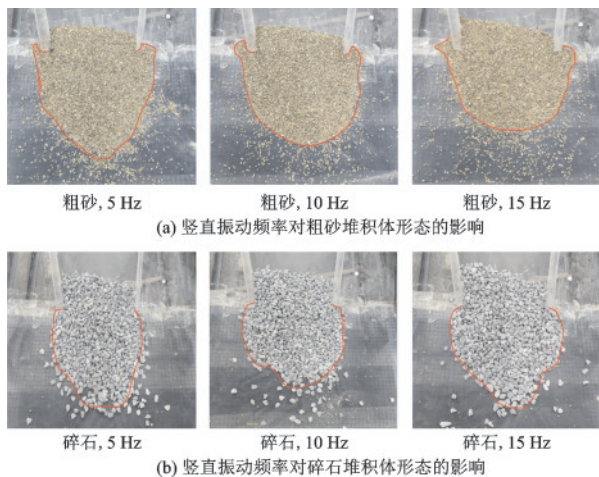


图 11 竖直振动频率与滑坡堆积体形态的关系

Fig.11 The relationship between vertical vibration frequency and deposit shape of landslide

3 结 论

(1) 无论是否有地震波的输入,滑道侧壁角度 β 对于滑坡体的堆积形态影响明显,有地震波输入条件下,侧壁角度对于滑坡体堆积形态影响更明显。

(2) 低坡度条件下(滑道坡度为 30°),振动频率

对于滑坡体堆积形态的影响显著,在有地震波输入的条件下,地震波带来的能量和对于堆积体结构的重塑,滑坡体冲程、堆积宽度,堆积厚度,平面覆盖面积都有明显的增加,且随着频率的增大而增大。对于粒径较大的碎石,作用更加明显。

(3) 低坡度条件下(滑道坡度为 30°)。不同的振动方向对于滑坡体堆积形态的影响不尽相同。振动方向水平时,地震波使得散粒体水平方向上的能量变大,冲程变远,且随着频率的增加而增加,平面覆盖面积也随着频率的增加而增加;振动方向竖直时,竖直方向的碰撞导致散粒体水平方向能量的减少,对堆积体的结构破坏更严重,冲程的值随着频率的增加而越来越小,堆积宽度和堆积厚度大于水平振动时的值。

(4) 滑坡的堆积面积和冲程不仅决定了致灾的范围和受灾体的磨损和冲击等致灾效应,本文的结论可为地震频发区制定避让搬迁方案和工程防护措施等提供一定的参考。对于滑坡危险区的风险管理和居民房屋,耕作选址选取同样有一定的参考意义。

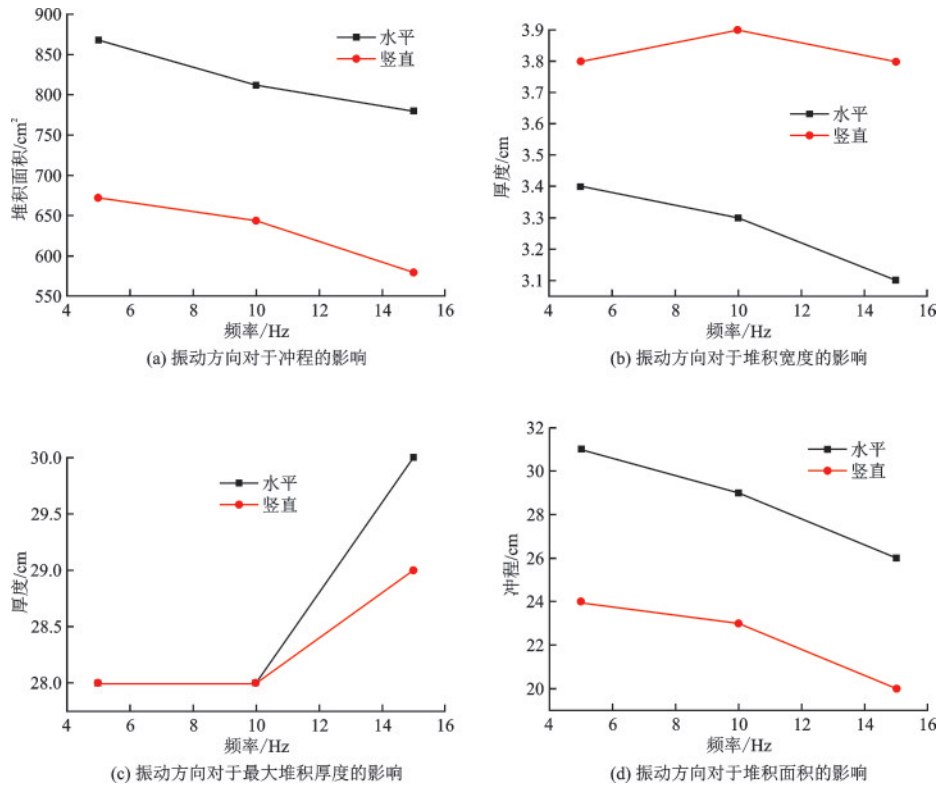


图 12 振动方向对于粗砂滑坡堆积体形态的影响

Fig.12 Influence of vibration direction on distribution characteristics of sand deposits

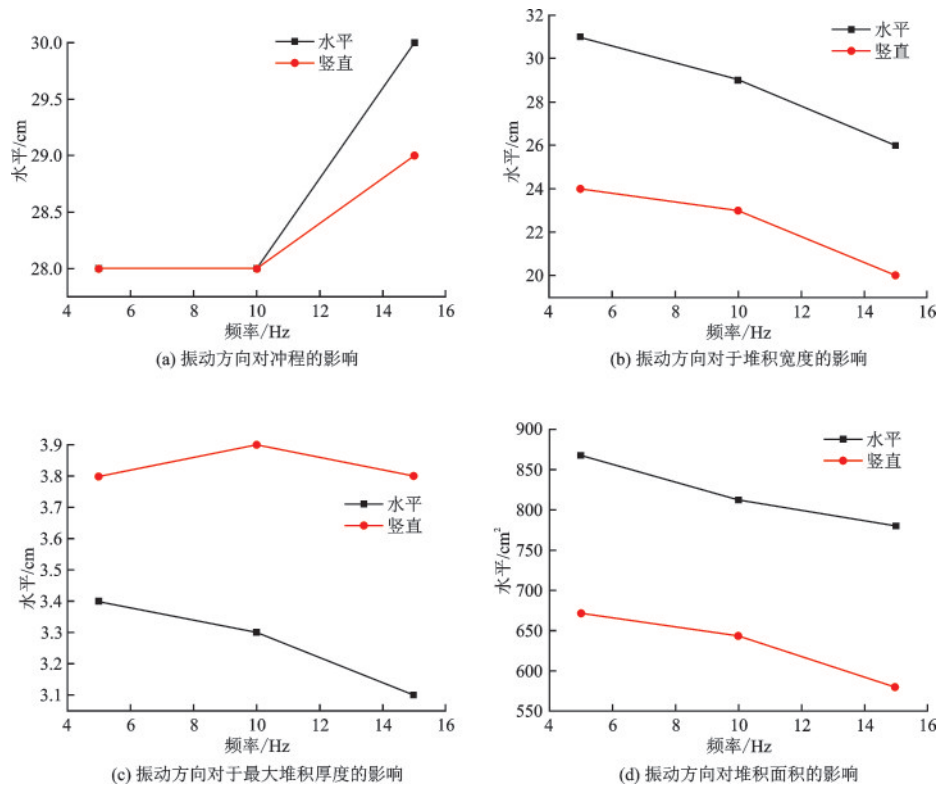


图 13 振动方向对于碎石滑坡堆积体形态的影响

Fig.13 Influence of vibration direction on distribution characteristics of deposit

参考文献:

- [1] 吴玮莹,许冲.2014年鲁甸M_W6.2地震触发滑坡新编目[J].地震地质,2018,40(5):1140-1148.
Wu W Y, Xu Ch. New catalogue of landslides triggered by Ludian M_W6.2 earthquakes in 2014 [J]. Seismology and Geology, 2018, 40(5): 1140-1148. (in Chinese)
- [2] 许冲,田颖颖,沈玲玲,等.2015年尼泊尔廓尔喀M_W7.8地震滑坡数据库[J].地震地质,2018,40(5):1115-1128.
Xu Ch, Tian Y Y, Shen L L, et al. Landslide database of the Gurkha M_W7.8 earthquakes in Nepal in 2015 [J]. Seismology and Geology, 2018, 40(5): 1115-1128. (in Chinese)
- [3] 雷先顺.滑坡-碎屑流模型试验与理论研究[D].合肥工业大学,2016.
Lei X Sh. Model test and theoretical study of the landslide-debris flow [D]. Hefei Polytechnic University, 2016. (in Chinese)
- [4] Hutchinson N J. A sliding-consolidation model for flow slides [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1986, 23(2): 115-126.
- [5] Pouliquen O, Forterre Y. Friction law for dense granular flows: application to the motion of a mass down a rough inclined plane [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 453(453):133-151.
- [6] Cundall P A, Stravk O D L. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. Géotechnique, 1979, 30(30):331-336.
- [7] 周英,鲍德松,张训生,等.边界条件对二维斜面颗粒流颗粒分布的影响[J].物理学报,2004, 53(10):3389-3393.
Zhou Y, Bao D S, Zhang X Sh, et al. Effect of boundary on the two-dimensional inclined channel for a dilute granular flow distribution [J]. Chinese Journal of Physics, 2004, 53(10): 3389-3393. (in Chinese)
- [8] Hunger O, Morgenstern N R. Experiments on the flow behavior of granular materials at high velocity in an open channel [J]. Géotechnique, 1984, 34(3):405-413.
- [9] 郝明辉,许强,杨磊,等.滑坡-碎屑流物理模型试验及运动机制探讨[J].岩土力学,2014,35(增1):127-132.
Hao M H, Xu Q, Yang L, et al. Physical modeling and movement mechanism of landslide-debris avalanches [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 35 (Sup1) : 127-132. (in Chinese)
- [10] Gert L, Huppert H E, Sparks R S J. Granular column collapses down rough, inclined channels [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2011, 675(5):347-368.
- [11] 雷先顺,朱大勇,刘诚,等.考虑滑道坡度和宽度的滑坡模型试验研究[J].岩土力学,2017, 38(5):1281-1288.
Lei X Sh, Zhu D Y, Liu Ch, et al. Model test study of the effect of slope angle and chute width on landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(5): 1281-1288. (in Chinese)
- [12] 吴越,刘东升,周忠浩.考虑滑动过程内部崩解耗散的滑坡体运动模型[J].岩土工程学报,2015, 37(1):35-46.
Wu Y, Liu D Sh, Zhou Zh H. Mobility assessment model for landslide mass considering disintegration energy consumption in slipping process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 35-46. (in Chinese)
- [13] 樊晓一,冷晓玉,段晓冬.坡脚型与偏转型地震滑坡运动距离及地形因素作用[J].岩土力学,2015, 36(5):1380-1388
Fan X Y, Leng X Y, Duan X D. Influence of topographical factors on movement distances of toe-type and turning-type landslides triggered by earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5):1380-1388. (in Chinese)
- [14] 李祥龙,唐辉明,熊承仁,等.岩石碎屑流运移堆积过程数值模拟[J].工程地质学报,2011, 19(2):168-175.
Li X L, Tang H M, Xiong Ch R, et al. Numerical simulation of flow and deposition process of rock avalanche [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(2): 168-175. (in Chinese)
- [15] Song J, Gao Y, Feng T. Probabilistic assessment of earthquake-induced landslide hazard including the effects of ground motion directionality [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2018, 105:83-102.
- [16] S. Martino, L. Lenti, C. Bourdeau. Composite mechanism of the Büyükcökmece (Turkey) landslide as conditioning factor for earthquake-induced mobility [J]. Geomorphology, 2018, 308:64-77.

(本文责编:周小潭)