

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.05.21

滑坡-碎屑流冲击导引结构的离散元模拟

张睿骁¹, 樊晓一^{1,2}, 姜元俊³, 杨海龙⁴

(1. 西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010; 2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621010; 3. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 4. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 滑坡碎屑流对阻挡结构的直接冲击常产生较高的峰值冲击力和冲击能量, 导致结构发生破坏而失效; 而导引结构通过改变碎屑流的运动路径, 可减缓其冲击效应, 提高结构抗冲击能力。文章运用三维离散元模拟软件, 结合室内休止角试验的结果, 校准数值模拟参数, 以三种不同导引结构(凹型圆弧、直线型、凸型圆弧)为变量进行数值模拟分析。研究表明: 凹型圆弧结构 B1 可以有效地将碎屑流颗粒的冲击力进行转化, 结构所受的法向力最小, 切向力最大, 对颗粒的导引作用最大。经过三种不同导引结构后, 颗粒与滑槽之间的碰撞和摩擦是导致颗粒动能减小的主要原因; 而三种不同导引结构对颗粒动能的耗散效果无显著差异。导引结构的作用对于颗粒堆积体积分布有显著的影响, 主要影响区是靠近坡脚处, 对导引结构之后的堆积区域的颗粒体积分布影响不显著。通过对冲击效应和堆积特性的研究, 得到凹型圆弧结构形式最优, 可以为碎屑流的防护工程抗冲击设计提供参考。

关键词: 滑坡; 碎屑流; 导引结构; 冲击效应; 堆积特性; 离散元

中图分类号: P642.22; TU458⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)05-0161-08

Discrete element simulation of the landslide-debris flow impact guiding structure

ZHANG Ruixiao¹, FAN Xiaoyi^{1,2}, JIANG Yuanjun³, YANG Hailong⁴

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 2. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang, Sichuan 621010, China; 3. Institute of Mountain Hazard and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 4. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The direct impact of the landslide debris flow on the resistive structure often produces higher peak impact and impact energy is often generated, which may result in easy failure and losing effectiveness. However, the guiding structure can slow down the impact effect and improve the structural impact resistance by changing the path of motion of the debris flows. Therefore, we used 3-D discrete element simulation software, whose parameters are calibrated by comparing the results of the rest angle of repose test and the numerical simulations. Numerical simulation analysis was studied with three different guiding structures (concave arc, straight line, convex arc) as variables. The results indicate that the impact force of debris flow is effectively transformed by concave circular arc structure B1, in which the structure receives the least normal force and the

收稿日期: 2019-01-03; 修订日期: 2019-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877524); 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室开放基金项目(18kfjk10); 西南科技大学研究生创新基金资助(19ycx0080)

第一作者: 张睿骁(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程、地质灾害防治。E-mail: zhangruix1212@163.com

通讯作者: 樊晓一(1974-), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土工程及地质灾害方面的教学与研究工作。E-mail: xyfan1003@126.com

largest tangential force. The guiding effect of the concave circular arc structure B1 is the most obvious. After three different guiding structures, the collision and friction between the particles and the chute are the main reasons for the decrease in the kinetic energy of the particles, and the effect of the three different guiding structures on the dynamic energy dissipation of the particles is not significant. The guiding structure has a significant effect on the particle volume distribution. The main affected area is near the foot of the slope, and the accumulation area after the guiding structure and the particle volume distribution are not significant. The study of the impact effect and the accumulation characteristics shows that the concave arc structure is optimal, and can provide the reference for the design of shock resistance engineering protection of debris flow.

Keywords: landslide; debris flow; guiding structure; impact effect; accumulation characteristics; discrete element

由于地质构造复杂,气候多变,我国多发滑坡、泥石流之类的地质灾害。在山区,大部分可利用的土地是坡体边缘相对平缓的部分,如果坡体分布有不稳定的斜坡,发生滑坡后坡体前缘的构筑物区域正是堆积区,易造成严重的损失和伤亡事件。如:2015年12月20日,广东省深圳市发生一起渣土堆填物特大滑坡事故,造成33栋建筑物被掩埋或不同程度受损,73人遇难,4人失联,覆盖面积约 $38.5 \times 10^4 \text{ m}^2$,填筑体积约 $627.24 \times 10^4 \text{ m}^3$;^[1]2016年7月1日,贵州省毕节市偏坡村金星组发生山体滑坡,掩埋金星组居民11户30人,共造成23人死亡,7人受伤^[2]。

为了应对碎屑流的冲击灾害,可以通过建设拦挡结构来减小滑坡致灾范围、减弱致灾强度,为此国内外学者开展了滑坡碎屑流运动能量和冲击机理的研究。运动能量方面,有学者根据相似原理设计制作滑体下滑及冲击模型,研究滑坡与受灾体之间的作用^[3],根据冲量定律和能量守恒定律换算得到滑体冲击能^[4],并对受灾体易损性定量评估^[5-6]。同时考虑滑坡体运动过程中耗散规律^[3,7],依据离散元能量转化和能量守恒计算法则^[8],建立用于评估滑速、滑距及冲击能滑体运动模型^[7]。冲击机理方面,有学者采用模型试验与数值模拟相结合的方法,考虑颗粒粒径大小的影响^[9],研究不同位置^[10]和高度^[11]的挡墙对滑坡冲击的影响以及易损性和动力响应^[12-13]。以冲击力为研究对象,分解为碎屑流拖曳力、重力和摩擦力以及被动土压力^[14-16],基于深度平均冲击理论,构建了力学模型^[17-18]。然而冲击力分布的复杂性和非线性特征,与碎屑流冲击挡墙的土拱效应关系密切^[19],通过分析微观结构的异质性在流动的冲击和沉积阶段,得出土拱效应对颗粒的影响^[20],可以进一步探讨土拱效应的形成机理、冲击力拱的形成特征以及对冲击力分布变化^[19]。

结合分析已有的研究成果,发现以往的碎屑流冲击灾害研究主要以运动特征和冲击机理为切入点,侧

重碎屑流正面与刚性或柔性防护结构^[9,21]和桥墩^[22]等承灾体之间的作用效应,对碎屑流的冲击考虑偏转效应的研究较少。从海岸防护堤的导流结构使得海水返回到大海得到启示,导流结构的研究应用到了碎屑流当中^[23],但并未考虑碎屑流侧面与结构之间的作用改变其运动路径^[24],使得这些研究不够全面。

为了丰富碎屑流侧向冲击作用的研究,更加清晰、全面地说明碎屑流与不同导引结构之间的冲击效应和堆积特性,本文利用三维离散元软件,结合室内模型试验数据,分析了不同导引结构对碎屑流颗粒运动的导向作用,并为滑坡灾害防治提供建议。

1 三维离散元模型

1.1 模型建立

本模型由斜坡、侧板、底板、拦挡结构和碎屑物源组成(图1)。其中,碎屑物源距离底面垂直高度固定为1.25 m,滑槽宽度为0.5 m,滑槽高度为0.5 m,滑坡体纵向宽度2.5 m,斜坡坡度为45°。导引结构设置在坡脚处。堆积区纵向宽2.5 m,横向宽1.5 m。

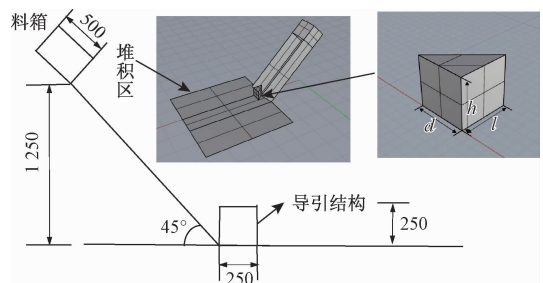


图1 滑槽模型示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram showing the chute model diagram (mm)

本文所用的导引结构,长(l)、宽(d)、高(h)都相同,为250 mm,考虑了三种典型结构,凹型圆弧结构(B1)、直线型结构(B1)、凸型圆弧结构(B3)(图2)。

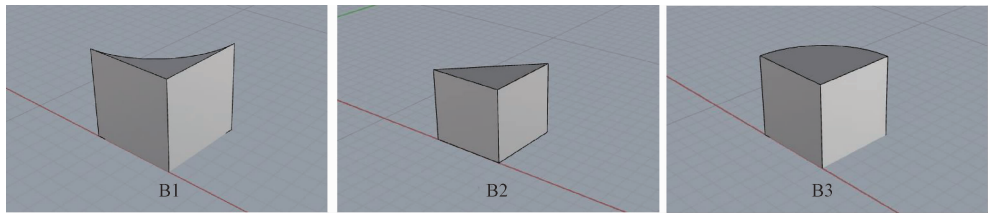


图 2 导引结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram showing the guidance structure diagram

已有学者对颗粒单元进行校准之后发现,使用多个球体黏结作为基础颗粒与单个球形颗粒相比,前者能够反映实际颗粒含有棱角的特点,数值模拟结果与试验结果更相符^[20,25]。本文通过将四个球形颗粒黏结作为基础颗粒(图 3),模型中最小颗粒单元为刚性体,颗粒密度 $2\,100\text{ kg/m}^3$,总质量 52.5 kg 。

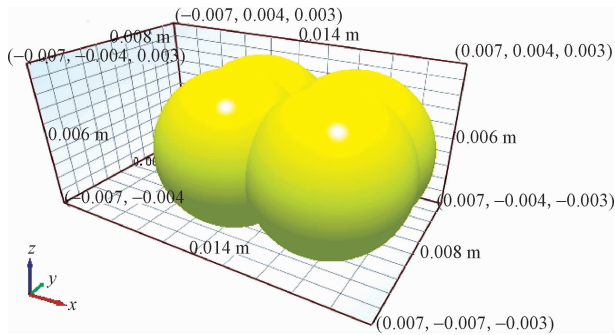


图 3 单个颗粒大样^[11]

Fig. 3 Single particle sample^[11]

1.2 数值模型参数

根据滑槽模型试验具体数据设置相应仿真模型参数。离散元数值模拟中,泊松比、剪切模量和密度为材料的本征参数,表示各种材料的自身属性,与外界条件无关。改变滑体粒径或级配,不会影响材料属性。基于模型试验实测及计算结果,确定颗粒与几何体的材料属性见表 1。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

物理参数	颗粒	钢材(底板、导引结构)	有机玻璃(侧板)
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 100	7 500	2 500
泊松比	0. 21	0. 30	0. 25
剪切模量/Pa	1×10^8	7×10^{10}	1.96×10^9

碎屑流材料参数参考岩质碎屑流材料参数选取^[26],数值模拟采用对现场取样颗粒级配进行模拟。由于受模型运算效率、计算机硬件的限制,对于小颗粒的模拟很难实现,本文对真实岩土体颗粒级配进行简化处理,以控制限制粒径和平均粒径为指标,得到如下

颗粒级配曲线图(图 4)。从图中可以得到:实际级配特征粒径 $d_{60} = 15.8\text{ mm}$, $d_{50} = 9.72\text{ mm}$,模拟级配特征粒径 $d_{60}^* = 16.01\text{ mm}$, $d_{50}^* = 9.74\text{ mm}$,两者相近,认为模拟级配可以较好模拟实际级配。最终碎屑流离散元颗粒模型如图 5 所示。

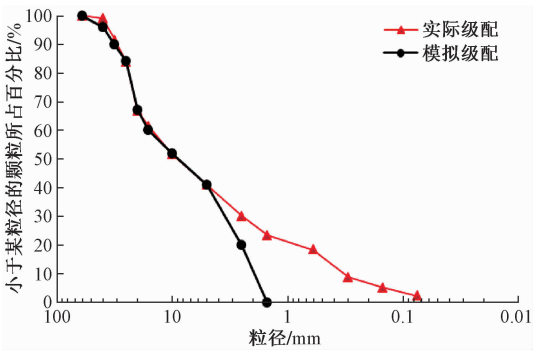


图 4 颗粒级配曲线^[11]

Fig. 4 Particle gradation curve^[11]

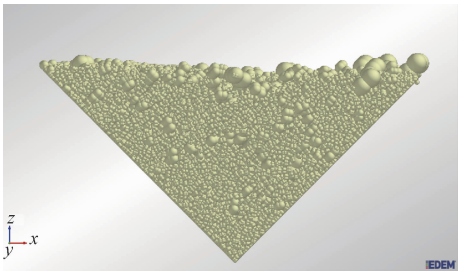


图 5 碎屑流离散元颗粒模型^[11]

Fig. 5 Discrete element model for debris flow^[11]

休止角是颗粒间流动特性和摩擦特性的宏观描述,是颗粒间静摩擦系数和滚动摩擦系数标定常用的指标^[27]。因此,以颗粒间的静摩擦系数、滚动摩擦系数作为试验因素,采用堆积法进行休止角试验。根据休止角试验结果分别拟合得到适用于堆积法的颗粒间静摩擦系数、滚动摩擦系数与颗粒休止角正切值的回归方程。

利用有机玻璃建立边长为 0.3 m 的立方体模型,模型填充 0.008 m^3 碎屑流颗粒,在刚性底板上开展室内堆积法试验(图 6),重复进行 3 次,并采集堆积形态

的图像,获取现场室内试验休止角的正切值(表2)。



图6 现场休止角试验

Fig. 6 Rest angle field test

表2 现场休止角正切值

Table 2 Field angle of retraction

试验次数	1	2	3	平均值
休止角正切值	0.566	0.563	0.571	0.567

根据实测得到的岩土体的休止角正切值来求解颗粒间静摩擦系数和滚动摩擦系数。最后通过引入标定的参数进行休止角仿真试验(图7),以休止角基本吻合为条件,完成参数标定,最终接触参数见表3。

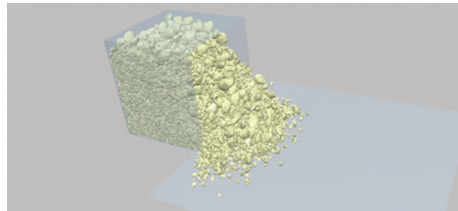


图7 模拟休止角试验

Fig. 7 Simulated angle field test

表3 接触参数

Table 3 Contact parameters

物理参数	颗粒-颗粒	钢材-颗粒	有机玻璃-颗粒
静摩擦系数	0.57	0.50	0.01
滚动摩擦系数	0.10	0.10	0.01
碰撞恢复系数	0.20	0.28	0.25

2 冲击力分析

通过碎屑流与结构之间的冲击力分析,可以对结构优化提出有益的建议。法向力是颗粒与接触面垂直的作用力,法向力越小,对结构的损毁越小;切向力是指颗粒作用在与接触面平行的力,切向力越大,对颗粒的导引作用越大。

如图8(a)所示,导引结构B1所受法向力随时间的变化可以分为四个阶段:线性增加、恒力阶段、线性减小和恒力阶段。从碎屑流与结构作用开始($t=0.65$ s),法向力随时间增加而增加,持续至0.9 s;在0.9~1.1 s之

间法向力大小基本保持不变,1.1~1.3 s法向力逐渐减小,最后对结构作用恒定的静压力。导引结构B2和B3所受法向力的趋势相同:随着时间的增加先增加后减小,最后保持不变。两种结构法向力的峰值出现时间有所不同,导引结构B3峰值法向力的时间(1.02 s)早于导引结构B2(1.09 s)。其中,导引结构B1所受的法向力最小,其峰值约为(50 N),而导引结构B2、B3法向力峰值分别为180 N、250 N。最后由于碎屑流颗粒堆积在导引结构后方,对结构作用的静压力使得法向力曲线最后没有归零。按照静压力的大小排序,分别为导引结构B3>导引结构B2>导引结构B1。对比三种结构法向力的曲线,导引结构B2和B3的法向力曲线波动比较大,而导引结构B1的法向力曲线波动比较小。

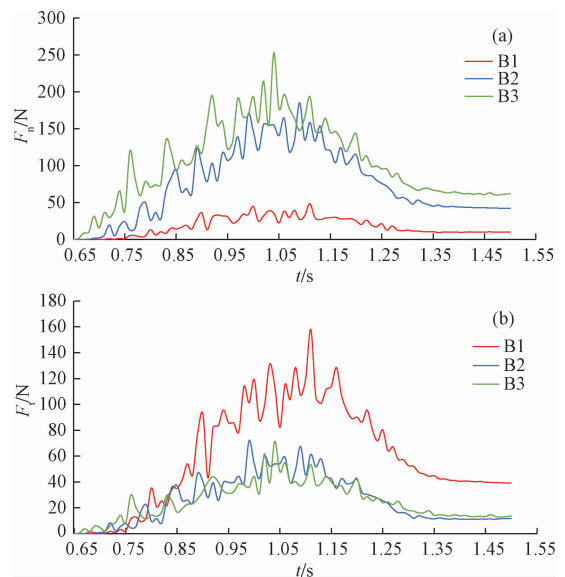


图8 冲击力时程曲线变化

Fig. 8 History curve of impact force vs. time

(a)法向力;(b)切向力

而从切向力时程曲线(图8b)发现,切向力时程曲线可以分为三个阶段:线性增加、线性减小和恒力阶段。碎屑流颗粒开始与导引结构接触,切向力逐渐增大,三种结构分别达到切向力峰值。按照切向力峰值出现的时间先后进行排序,分别是结构B2、结构B3、结构B1。其中,导引结构B2和B3切向力峰值大小相同,约为70 N,而导引结构B1的切向力峰值约为160 N,是三种结构切向力峰值最大的。当碎屑流颗粒静止时,颗粒对导引结构的作用力使得切向力维持恒定的数值,结构B1、B2、B3的切向力分别为40 N、11 N、13 N。

出现以上现象的原因在于:拦挡结构在受到碎屑流冲击后,拦挡结构上的受力随着时间增加逐渐增加,导引结构后方堆积颗粒的体积也随之增加,对后缘下

滑的颗粒的作用力越大。当法向力和切向力达到峰值后,拦挡结构前堆积着一定体积的颗粒,而后缘的颗粒不断下滑,与堆积的颗粒碰撞、摩擦,间接作用在拦挡结构上,法向力和切向力不断减小,最终碎屑流颗粒堆积完成。堆积在拦挡结构前方的颗粒的静压力最终使得法向力和切向力维持在一定数值。对比三种导引结构,结构 B1 可以有效地将碎屑流颗粒的作用力转换,结构所受的切向力最小,结构的损毁最小;切向力最大,对颗粒的导引作用最大。

3 能量分析

导引结构的设置可以一定程度上改变碎屑流颗粒的运动方向。为进一步研究导引结构的设置对碎屑流颗粒运动能量的影响,根据颗粒的速度、质量和高度,通过式(1)、(2)可以计算出每个颗粒的动能和势能:

$$E_k = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_i^2 \quad (1)$$

$$E_p = \sum_{i=1}^n m_i g h_i \quad (2)$$

式中: m_i ——颗粒 i 的质量;

v_i ——颗粒 i 的速度;

g ——重力加速度;

h_i ——颗粒 i 与水槽基部的垂直距离。

如图 9(a) 所示,碎屑流颗粒的动能随时间的增加先逐渐增加,在 0.8 s 左右达到峰值,随后逐渐减小;无导引结构时,碎屑流颗粒的动能随时间变化趋势与有导引结构的相同,先增加后减小。从图 9(b) 可以发现,导引结构的存在与否,对结构的势能变化影响不显著,势能随时间增加不断减小,而最终有导引结构设置时,颗粒堆积在坡脚处的颗粒越多,堆积高度会增加,导致势能的终值大于无导引结构时。

当 $t = 0.65$ s 时,碎屑流颗粒经过加速区加速后,势能与动能之间进行了部分转换,此时前缘颗粒与导引结构发生碰撞,而大部分颗粒仍在加速区滑槽上,具有较大的势能,由图 9 中可得颗粒的动能 $E_k = 117$ J,势能 $E_p = 297$ J。对比有无导引结构时颗粒的动能大小,可以发现,导引结构的设置对颗粒动能有一定程度的耗散,减小了约 20 J。经过三种不同导引结构后,颗粒的动能时程曲线基本重合,说明三个导引结构对颗粒动能耗散无显著差异。

碎屑流颗粒动能的变化,归因于颗粒与颗粒(图 10a)、颗粒与滑槽(图 10b)、颗粒与导引结构之间(图 10c)的碰撞和摩擦。如图 10(a) 所示,颗粒之间的接触数量随时间增加而不断增加。在 $t = 1.25$ s 之前,导

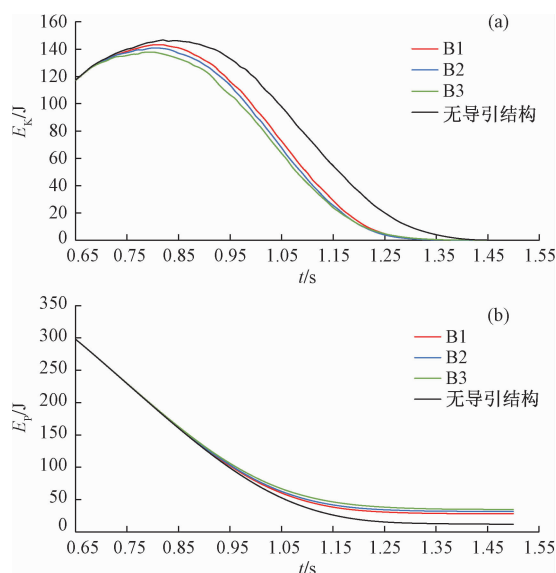


图9 碎屑流颗粒能量时程曲线变化

Fig. 9 Variation in energy time history curve of debris flow particles

(a) 碎屑流颗粒的动能; (b) 碎屑流颗粒的势能

引结构的设置,对颗粒之间的碰撞影响并不显著,碎屑流颗粒之间接触数量的所有时程曲线基本重合,颗粒之间碰撞和摩擦所消耗的能量基本相同;1.25 s 之后,颗粒继续运动,此时仍有部分颗粒在加速区滑槽上,后缘颗粒推挤前缘颗粒向前运动。从图 9(a) 中可以看到:有导引结构时,颗粒的动能明显小于无导引结构时,说明无导引结构时后缘颗粒对前缘颗粒推挤作用更显著,颗粒运动得越分散;而有导引结构时,后缘颗粒的运动堆积得更紧密,颗粒之间的碰撞数量大于无导引结构时,颗粒之间碰撞和摩擦消耗的能量更大,动能减小得更快,运动时间更短。从图 9(a) 中可以看出,导引结构使碎屑流颗粒的运动时间减小了 0.1 s。从图 10(b) 中可以看出碎屑流颗粒与滑槽之间的接触数量存在先增加后减小再增加的趋势;导引结构的设置大大增加了碎屑流颗粒与滑槽之间的接触数量。由于导引结构的设置,碎屑流颗粒的运动路径被阻挡,前缘的颗粒大部分堆积在坡脚处,而后缘颗粒受到前缘堆积颗粒的作用,在滑槽上与滑槽之间的碰撞时间增加。而从图 10(c) 可以发现,导引结构的设置,颗粒与结构之间的接触数量随着时间的增加不断增加,说明堆积在导引结构后方的颗粒越多。虽然颗粒与结构之间的接触逐渐增加,但颗粒与结构之间的接触数量明显小于颗粒之间和颗粒与滑槽的数量,说明颗粒与结构之间的碰撞和摩擦对能量的影响很小。因此,对碎屑流颗粒动能变化的影响,主要是由于颗粒与滑槽之

间的碰撞和摩擦,这一发现与 Ashwood 等^[30]的试验观测一致。

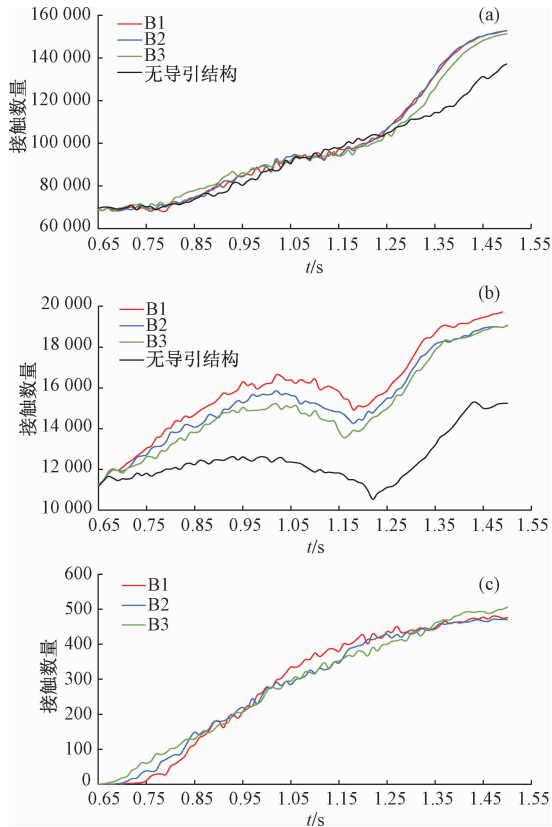


图 10 颗粒接触数量变化图

Fig. 10 Changes in number of contact particles

(a) 颗粒之间; (b) 颗粒与滑槽; (c) 颗粒与结构

4 堆积体分析

通过对碎屑流颗粒的堆积形态进行提取,绘制颗粒堆积形态图(图 11),图中(1.25,0)为坡脚位置,(1.5,0)为导引结构放置的位置。可以看到:三种导引结构作用下,碎屑流颗粒的堆积形态相似;从最大水平运动距离上看,约为 0.75 m。由此可以看出,三种不同导引结构作用对颗粒的最终运动形态影响不大。

沿着滑坡碎屑流运动方向,从坡脚处开始划分,每隔 10 mm 划分一个 140 mm 宽的区域(图 12),绘制直方图(图 13)对堆积体体积分布进行研究。

如图 13 所示,碎屑流颗粒主要分布在坡脚处,堆积在 A1 区的颗粒所占百分比最大,导引结构 B1 作用下 A1 区堆积了 25%,导引结构 B2 作用下 A1 区堆积了 24%,导引结构 B3 作用下 A1 区堆积了 19%。A2 区中颗粒的百分比在导引结构 B1、B2、B3 的作用下,分别为 20%、16%、13%。B1 与 B2 在 A1 区时颗粒堆积所占的百分比相差不大;在 A2 区时,由于 B1 结构

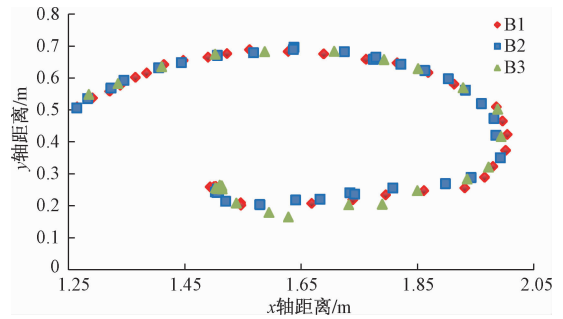


图 11 颗粒堆积形态图

Fig. 11 Particle packing pattern

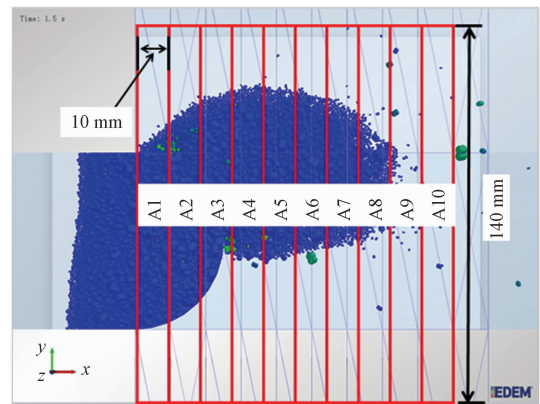


图 12 堆积体划分图

Fig. 12 Partition diagram of the accumulation body

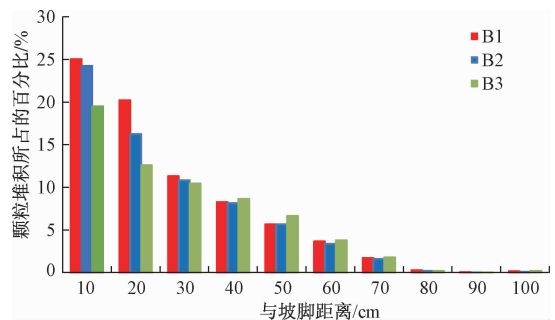


图 13 体积分布直方图

Fig. 13 Volume distribution histogram

是凹型,所能容纳颗粒堆积的空间大于直线型结构 B2,而结构 B3 是凸型,其空间最小,所以在 A2 区时,颗粒堆积所占的百分比出现了显著的差异。在 A3 区之后,三种导引结构作用下碎屑流颗粒堆积所占的百分比基本相同。碎屑流颗粒堆积在水平滑槽上的百分比随距离的增加而不断减小。通过对堆积在水平滑槽上的颗粒所占百分比进行汇总,导引结构 B1、B2、B3 颗粒所占百分比分别为 76%、70%、64%。由此得出,导引结构的作用对于颗粒堆积体积分布会有显著的影响,主要影响区是靠近坡脚处,对导引结构之后的堆积

区域的颗粒体积分布影响不显著。

5 结论

(1)对比三种导引结构,凹型圆弧结构 B1 可以有效地将碎屑流颗粒的作用力进行转化,结构所受的法向力最小,结构的损毁最小;切向力最大,对颗粒的导引作用最大。

(2)导引结构的存在与否,对颗粒的势能变化影响不显著,势能随时间增加不断减小,而最终有导引结构设置时,颗粒堆积在坡脚处的颗粒越多,堆积高度会增加,导致颗粒静止时的势能大于无导引结构时。经过三种不同导引结构后,颗粒与滑槽之间的碰撞和摩擦是导致颗粒动能减小的主要原因,但三种不同导引结构对颗粒动能耗散效果无显著差异。

(3)三种不同导引结构作用下,对颗粒的最终运动形态影响不大。导引结构的作用对于颗粒堆积体分布会有显著的影响,主要影响区是靠近坡脚处,对导引结构之后的堆积区域的颗粒体积分布影响不显著。

参考文献:

- [1] 张一希,许强,彭大雷,等.深圳“12·20”滑坡土体渗透性模拟试验研究[J].水文地质工程地质,2017,44(5):131-136. [ZHANG Y X, XU Q, PENG D L, *et al.* An experimental study of the permeability of the catastrophic landslide at the Shenzhen Landfill[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(5): 131-136. (in Chinese)]
- [2] 张楠,徐永强,闫慧.岩溶山区浅层基岩滑坡失稳机理研究——以大方县金星组滑坡为例[J].水文地质工程地质,2017,44(6):142-146. [ZHANG N, XU Y Q, YAN H. A study of the instability mechanism and investigation methods of shallow bedrock landslides in karst mountain areas: taking the Jinxing landslide in Dafang County as an example[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(6): 142-146. (in Chinese)]
- [3] 吴越,刘东升,李明军.滑体下滑及冲击受灾体过程中的能耗规律模型试验[J].岩石力学与工程学报,2011,30(4):693-701. [WU Y, LIU D S, LIU D S, LI S Y. Landslide model experiment for energy dissipation law in sliding and impact processes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 693-701. (in Chinese)]
- [4] 吴越,刘东升,李硕洋.基于滑体与受灾体共同作用的冲击能计算模型[J].岩石力学与工程学报,2012,31(增刊1):2636-2643. [WU Y, LIU D S, LI S Y. Calculation model of impact energy based on interaction of landslide mass and disaster-affected bodies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Sup1): 2636-2643. (in Chinese)]
- [5] 吴越,刘东升,李明军.岩体滑坡冲击能计算及受灾体易损性定量评估[J].岩石力学与工程学报,2011,30(5):901-909. [WU Y, LIU D S, LI M J. Impact energy calculation for rock slope and quantitative assessment of vulnerability for element at risk[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 901-909. (in Chinese)]
- [6] 吴越,刘东升,张小飞,等.滑坡灾害易损性定量评估模型应用与比较[J].地下空间与工程学报,2012,8(5):916-921. [WU Y, LIU D S, ZHANG X F, *et al.* Application and comparison of quantitative assessment models on landslide vulnerability[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(5): 916-921. (in Chinese)]
- [7] 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 S, ZHOU Z 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)]
- [8] 刘春,张晓宇,许强,等.三维离散元模型的滑坡能量守恒模拟研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(增刊2):698-704. [LIU C, ZHANG X Y, XU Q, *et al.* Research on energy conservation simulation of three dimensional discrete element model[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(Sup2): 698-704. (in Chinese)]
- [9] CUI Y, CHOI C E, LIU L H D, *et al.* Effects of particle size of mono-disperse granular flows impacting a rigid barrier[J]. Natural Hazards, 2018, 91(3): 1179-1201.
- [10] 张睿骁,樊晓一,杨海龙,等.不同拦挡距离对滑坡碎屑流冲击效应影响的离散元模拟[J].西南科技大学学报,2018,33(3):37-42. [ZHANG R X, FAN X Y, YANG H L, *et al.* Discrete element simulation of the effects of different baffle distances on the impact of landslide-debris flow[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2018, 33(3): 37-42. (in Chinese)]
- [11] 张睿骁,樊晓一,姜元俊.滑坡碎屑流冲击拦挡结构的离散元模拟[J].水文地质工程地质,2019,46

- (1):148-155. [ZHANG R X, FAN X Y, JIANG Y J. Discrete element simulation of the impact of landslide debris flow on resistive structures [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019,46(1):148-155. (in Chinese)]
- [12] 毕钰璋,孙新坡,何思明,等. 滑坡受灾结构体易损性离散元分析[J]. 金属矿山,2018(7):167-174. [BI Y Z, SUN X P, HE S M, *et al.* Analysis on Vulnerability of the Structure Induced by Landslide Based on Discrete Element Method[J]. Metal Mine, 2018(7):167-174. (in Chinese)]
- [13] 毕钰璋,孙新坡,何思明,等. 不同采空区开挖滑坡灾害与结构体动力响应研究[J]. 金属矿山,2018(6):135-141. [BI Y Z, SUN X P, HE S M, *et al.* Kinetic response analysis of landslide disaster and structures under excavation of different goaf[J]. Metal Mine, 2018(6):135-141. (in Chinese)]
- [14] JIANG Y J, TOWHATA I. Experimental study of dry granular flow and impact behavior against a rigid retaining wall [J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2013, 46(4):713-729.
- [15] JIANG Y J, ZHAO Y. Experimental Investigation of Dry Granular Flow Impact via both Normal and Tangential Force Measurements [J]. Geotechnique Letters, 2015, 5:33-38.
- [16] JIANG Y J, ZHAO Y, TOWHATA I, *et al.* Influence of particle characteristics on impact event of dry granular flow[J]. Powder Technology, 2015, 270:53-67.
- [17] BRUNET M, MORETTI L, FRIANT A L, *et al.* Numerical simulation of the 30 ~ 45 ka debris avalanche flow of Montagne Pelée volcano, Martinique: from volcano flank collapse to submarine emplacement[J]. Natural Hazards, 2017, 87(2):1189-1222.
- [18] ALBABA A, STÉPHANE LAMBERT, FAUG T. Dry granular avalanche impact force on a rigid wall of semi-infinite height[C]// Powders and Grains 2017-18th International Conference on Micromechanics on Granular Media. Montpeuier: EPJ Web of Conferences, 2017.
- [19] 段晓冬,樊晓一,姜元俊,等. 碎屑流冲击挡墙的土拱效应研究[J]. 自然灾害学报,2015,24(5):92-102. [DUAN X D, FAN X Y, JIANG Y J, *et al.* Study on soil arch effect of dry debris flow for impact barricade wall [J]. Journal of Natural Disasters, 2015,24(5):92-102. (in Chinese)]
- [20] ALBABA A, LAMBERT S, NICOT F, *et al.* Relation between microstructure and loading applied by a granular flow to a rigid wall using DEM modeling[J]. Granular Matter, 2015, 17(5):603-616.
- [21] HU Xu, CRISTINA G, Zhixiang YU, *et al.* An energy allocation based design approach for flexible rockfall protection barriers [J]. Engineering Structures, 2018,173:831-852.
- [22] 毕钰璋,何思明,王东坡,等. 碎屑流冲击下的桥墩动力响应特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2017, 28(4):16-21. [BI Y Z, HE S M, WANG D P, *et al.* Discrete-element investigation of rock avalanches impact on the bridge pier[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(4):16-21. (in Chinese)]
- [23] NG C W W, CHOI C E, GOODWIN G R, *et al.* Interaction between dry granular flow and deflectors [J]. Landslides, 2017,14:1375-1387.
- [24] 樊赞赞,王思敬,王恩志. 障碍物的设置对颗粒流动过程的影响[J]. 土木建筑与环境工程,2010,32(5):35-40. [FAN Y Y, WANG S J, WANG E Z. Influence of obstacles on granular flows[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010,32(5):35-40. (in Chinese)]
- [25] BARRIOS G K P, CARVALHO R M D, KWADÉ A, *et al.* Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling [J]. Powder Technology, 2013,248(2):84-93.
- [26] 杨海龙. 沟谷偏转型滑坡-碎屑流运动机理研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2018. [YANG H L. Movement mechanism of turning-type landslide debris flow in valley topography [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)]
- [27] 王云霞,梁志杰,张东兴,等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报,2016, 32(22):36-42. [WANG Y X, LIANG Z J, ZHANG D X, *et al.* Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(22):36-42. (in Chinese)]
- [28] ASHWOOD M W, HUNGR O. Estimating total resisting force in flexible barrier impacted by a granular avalanche using physical and numerical modeling [J]. Canadian Geotechnical Journal,2016, 53(10):1700-1717.