

文章编号: 1008-2786-(2018)5-740-10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000370

不同颗粒级配滑坡碎屑流等效冲击力 及作用位置分布研究

李天话¹, 樊晓一^{1,2*}, 姜元俊³

(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 621000;

3. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘 要: 滑坡碎屑流的冲击是一个持续的, 由大量粗细不均匀的碎屑岩粒及粗大块石共同作用的复杂力学冲击过程, 冲击压力的大小和分布范围呈现一定的规律变化。以室内物理模型试验的数据为依据, 运用三维离散元素法, 提出滑体等效冲击力和等效冲击作用位置, 探讨不同级配条件下, 滑坡碎屑流冲击力的分布特征。结果表明, 滑体冲击挡墙的过程可划分为动态冲击阶段和准静态堆积阶段。动态冲击过程中, 滑体细颗粒组分摩擦耗能显著, 导致滑体冲击力及其作用高度减小; 粒径为 20mm 及以上粗颗粒间的碰撞作用促进了滑体内部的能量传递, 导致滑体冲击力及作用高度增加, 峰值冲击力呈分散性分布, 峰值冲击力沿竖直高度方向的集中趋势不显著。准静态堆积阶段, 挡墙所受接触力主要为后续滑体颗粒冲击能量的碰撞传递及重力分量的累积。滑坡碎屑流滑动带两侧场地条件基本相同的情况下, 滑体等效冲击力的水平分布位置主要集中于迎流面中轴线附近, 受颗粒级配条件影响较小。

关键词: 滑坡碎屑流; 离散元素法; 颗粒级配; 冲击力分布

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

受场地条件及滑体岩性等因素的影响, 不同滑坡碎屑流运动过程中, 岩体破碎程度不同, 导致其堆积体的粒度组成差异较大。华蓥山溪口滑坡碎屑流由粉质粘土和粒径数厘米到数十厘米的碎块石组成^[1]; 头寨沟滑坡碎屑流堆积体主要为 8 ~ 64 mm 强 - 中风化玄武岩碎屑^[2,3]; 汶川地震诱发的牛圈沟滑坡主沟中堆积碎块石粒径一般为数厘米至十余厘米, 数十厘米及以上者较少, 而谢家店子滑坡碎屑流堆积体含大量数十厘米至数米的大块石, 十余米长的巨石零星展布^[4]。滑坡碎屑流运动过程中, 粗大颗粒的碰撞作用有利于块体之间的能量传递, 对

滑体冲击作用影响显著; 而高速流动的细粒组分, 在上部滑体物质的压力下有利于滑动面颗粒液化效应的形成^[5], 影响着滑体的致灾范围。由此可见, 确定颗粒级配对滑坡碎屑流冲击作用的影响, 对山区建筑结构设计及滑坡碎屑流冲击灾害的规划防治工作具有重要的科学意义。

现有研究多关注滑坡碎屑流运动机制及冲击作用的影响因素, 认为滑坡碎屑流的速度和运动距离等运动特征决定着滑体的致灾程度^[6-8], 而这些运动特征又同时受控于斜坡高度、坡度等坡体因素^[6,9], 坡脚约束角、场地类型等场地条件^[10]以及碎

收稿日期(Received date): 2017-12-20; 改回日期(Accepted date): 2018-09-01

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41877524); 中国科学院“率先行动”百人计划资助; 西南科技大学研究生创新基金资助(18ycx088)。[National Natural Science Foundation of China (41877524); The Program of “One Hundred Talented People” of Chinese Academy of Sciences; Postgraduate Innovation Fund Project by Southwest University of Science and Technology (18ycx088)]

作者简介(Biography): 李天话(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程及地质灾害方面的研究。[LI Tianhua (1992-), male, M. Sc. candidate, research on geotechnical engineering and geological hazard] E-mail: 345527238@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 樊晓一(1974-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程及地质灾害方面的教学与研究工作。[FAN Xiaoyi (1974-), male, professor, Ph. D., research on geological engineering and geological hazard.] E-mail: xyfan1003@126.com

屑参数^[11-13]。滑坡碎屑流的冲击力与其规模、冲击角度、滑体厚度和运动速度有关^[14,15]；滑体形状、坡面形态、拦挡物形式等对碎屑流的冲击作用也会造成影响^[16]。然而碎屑流对结构物的冲击有一定的持续时间,在碎屑流的冲击过程中,冲击压力的大小和分布范围存在一定的规律性变化,滑坡碎屑流冲击作用位置分布特征,作为建筑物易损性评估和工程防护措施的重要影响指标,尚未引起足够的关注。

本文以模型试验的资料和数据为依据,运用三维颗粒离散元素法(Discrete Element Method, DEM)分析软件 EDEM,建立滑坡碎屑流冲击挡墙的颗粒数值模型,提出滑坡碎屑流等效冲击力及其作用位置,研究不同级配条件下,滑坡碎屑流冲击力的分布特征,为山区建筑设计及滑坡碎屑流的规划防治工作提供理论依据。

1 研究方法

1.1 离散元素法

离散元素法是基于粒子间接触的位置关系以及相互作用的力学关系,来求得粒子的运动状态的一种数值计算方法^[17],该方法由 Peter Cundall 于 1971 年首次提出并应用于岩土力学的研究,经过 40 多年的不断深入与发展,DEM 已被广泛运用于滑坡碎屑流运移冲击作用机制及承灾体动力响应等问题的相关研究^[11-13]。

离散元素法利用牛顿第二定律和力-位移法则确定颗粒的运动及受力情况,其核心是颗粒接触特性,即接触本构模型^[18]。接触模型的分析计算直接决定了颗粒所受力和力矩的大小,对不同的仿真对象,需建立不同接触模型,以提高仿真结果的准确性^[19]。由于室内滑槽模型试验材料为无粘连的类球状碎石,具有散粒物料特性,颗粒表面粘附力很

小,因此本研究采用 Hertz-Mindlin (no slip) 接触模型。

尽管利用模型试验手段在挡墙受冲击部位外侧安装压力传感器能够测量滑坡碎屑流冲击压力,然而受传感器尺寸、布置密度、灵敏度、抗冲击能力等因素的影响,导致滑体与传感器的接触不能完全表征滑体对挡墙的冲击作用,从而难以获得挡墙所受冲击力的实际分布情况。离散元数值模拟手段能够改善模型实验中仪器设备以及技术手段的局限性,对滑坡碎屑流冲击作用及分布特征进行进一步研究。

1.2 模型尺寸

模型示意图如图 1 所示。滑槽底板长 2.19 m,宽 0.30 m,侧板高 0.35 m,用于重现碎屑流的流动环境。滑槽倾角为 35°。滑槽底板和边墙上为透明有机玻璃板制作,便于从侧向观察滑体的流动和撞击过程。模型料槽长 0.44 m,高 0.20 m,宽 0.30 m,用于装填滑体物料,碎屑流的启动通过一个触发门来控制;高 0.40 m,宽 0.30 m 的刚性挡墙垂直于底板安置在斜滑槽底端,以便直接监测滑坡碎屑流法向冲击力及冲击作用范围。

1.3 岩土样级配组成

为了分析不同级配条件下滑体冲击作用分布特征,建立了如表 1 所示的 4 种相同质量,不同级配的滑体模型,级配曲线见图 2。其中, M1 滑体控制粒径为 5 mm, 10 mm 以下细颗粒含量较多,代表运动过程中破碎较为完全的初始滑体; M4 滑体控制粒径为 30 mm, 20 mm 及以上粗颗粒含量较多,代表完整性较好的大块石滑体; M2 滑体控制粒径为 14 mm, 滑体中 10 mm 以下碎屑及 20 mm 以上块石含量均较少,为 M1 与 M4 之间的过渡模型; M3 滑体不均匀系数为 10, 各粒径组分含量较平均,代表粒径分配较宽、级配良好的初始滑体。

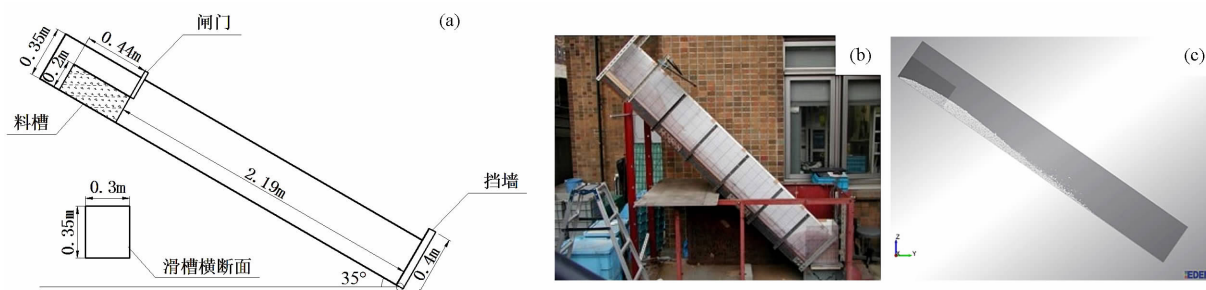


图 1 滑槽模型示意图: (a) 模型尺寸示意图; (b) 滑槽模型实物图; (c) 滑槽数值模型图

Fig. 1 Schematic diagram of the flume model: (a) dimensions; (b) model object; (c) numerical model

表 1 试验岩土样级配组成表
Tab. 1 Particle size distributions of the samples

滑体 模型	颗粒粒径/mm				d_{60}/mm	d_{10}/mm	C_u
	1~2	2~10	10~20	20~40			
M1	2%	90%	5%	3%	5.0	2.4	2.1
M2	2%	5%	90%	3%	14.0	10.3	1.4
M3	25%	30%	20%	25%	14.0	1.4	10.0
M4	2%	3%	5%	90%	30.0	20.0	1.5

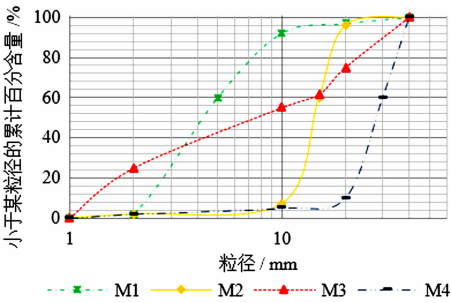


图 2 滑体模型材料级配曲线
Fig. 2 Grading curve of the samples

1.4 数值模型参数

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 2。

在离散元方法中,材料宏观的运动行为取决于颗粒间接触的微观力学参数。然而对于材料参数的选择尚未形成一个完善成熟的理论方法,较多的方式是通过物理模型和数值模型结果的对比验证,来确定相关力学参数。鉴于此,在前人对碎屑流研究时参数选取的基础之上,通过多次调试数值模拟中材料间的接触属性,以使模拟结果与模型试验结果相吻合。最终确定颗粒与颗粒、颗粒与几何体之间的接触属性如表 3 所示。

表 2 材料属性
Tab. 2 Material properties

材料	泊松比	剪切模量/Pa	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
滑体材料	0.25	8.00×10^8	1969.00
滑槽钢材	0.30	1.23×10^9	7900.00
挡墙钢材	0.30	3.85×10^9	7900.00

表 3 接触属性表
Tab. 3 Interaction properties of the model

相互作用	颗粒-颗粒	颗粒-滑槽底板	颗粒-挡墙
恢复系数	0.600	0.600	0.600
静摩擦系数	1.330	0.453	0.453
滚动摩擦系数	0.150	0.050	0.050
接触模型	Hertz-Mindlin (no slip)	Hertz-Mindlin (no slip)	Hertz-Mindlin (no slip)

2 模拟运动与模型试验验证

图 3 给出了滑体模型 M2 模型试验与数值模拟所得不同时刻滑体运动状态的对比结果,数值模拟能够较好地与物理模型试验相吻合,表明离散元素法能够用于模拟滑体沿滑槽运动并冲击挡墙的运动全过程。

模型试验和数值模拟所得试验结果的比较表明,DEM 可以在某种程度上代替物理模型试验,表 2 及表 3 所示参数可用于进行下一步数值模拟研究,以弥补物理模型试验在仪器设备以及技术手段等方面的局限性。通过数值模拟手段研究滑坡碎屑流冲击力及其分布特征是合理的。

3 不同级配滑坡碎屑流冲击作用及分布特征

3.1 颗粒级配对滑体冲击过程的影响

离散元素法的分析对象为充分多的颗粒或块体离散单元。根据模拟过程中不同时刻各离散单元间的相互作用计算接触力,再根据牛顿运动定律计算各离散单元的运动参数,这样交替反复运算,以模拟分析对象的运动全过程及相互接触作用。通过提取离散元数值分析软件中挡墙(块体单元)所受接触力合力,图 4 给出了各组滑体模型冲击力合力时程曲线。滑坡碎屑流的冲击是一个有一定持续时间的,由大量粗细不均匀的碎屑岩粒及大块石共同作用的复杂力学冲击过程。图 4 表明,滑体冲击挡墙的过程可划分为动态冲击阶段和准静态堆积阶段。动态冲击过程中,前缘滑体与挡墙直接碰撞接触并堆积于挡墙底部,后续滑体越过前缘堆积物继续冲击挡墙,堆积体高度不断增加(图 5)。准静态堆积阶段,堆积体高度基本保持稳定,挡墙所受接触力主

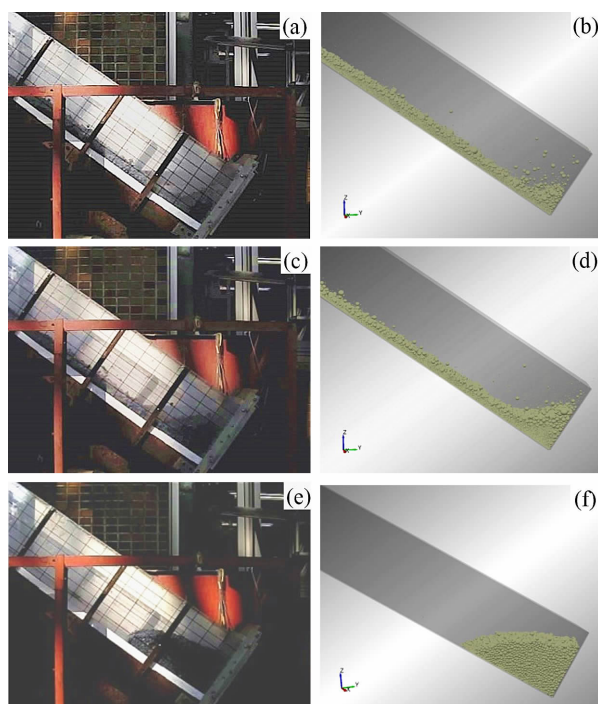


图3 不同时刻模型试验与数值模拟滑体形态对比
(a) $t = 1.15\text{s}$ 模型试验滑体形态; (b) $t = 1.15\text{s}$ 数值模拟滑体形态; (c) $t = 1.45\text{s}$ 模型试验滑体形态; (d) $t = 1.45\text{s}$ 数值模拟滑体形态; (e) $t = 2.20\text{s}$ 模型试验滑体形态; (f) $t = 2.20\text{s}$ 数值模拟滑体形态

Fig. 3 Comparison of deposition forms between experiment and numerical simulation;

(a) experimental deposition when $t = 1.15\text{s}$; (b) numerical deposition when $t = 1.15\text{s}$; (c) experimental deposition when $t = 1.45\text{s}$; (d) numerical deposition when $t = 1.45\text{s}$; (e) experimental deposition when $t = 2.20\text{s}$; (f) numerical deposition when $t = 2.20\text{s}$

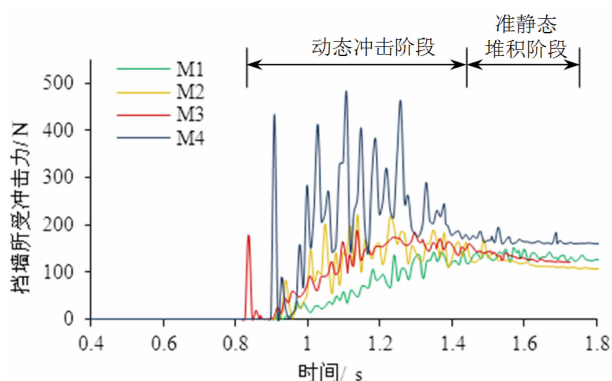


图4 M1 ~ M4 冲击力时程曲线

Fig. 4 Impact force time history curves of samples M1 ~ M4

要为后续滑体颗粒重力分量的累积以及后续颗粒冲击能量的碰撞传递(图6)。

滑体 M1 粗大颗粒含量少, 10 mm 及以下细颗粒含量多, 运动过程中细颗粒组分摩擦耗能显著,

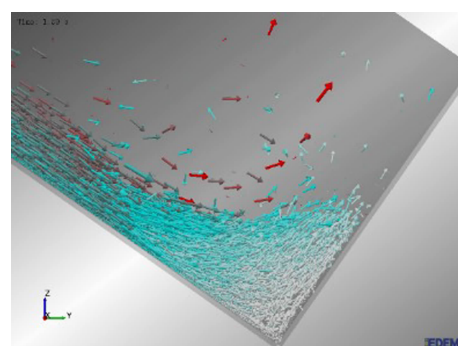


图5 滑体动态冲击阶段矢量图

Fig. 5 Vector diagram of dynamic impact stage

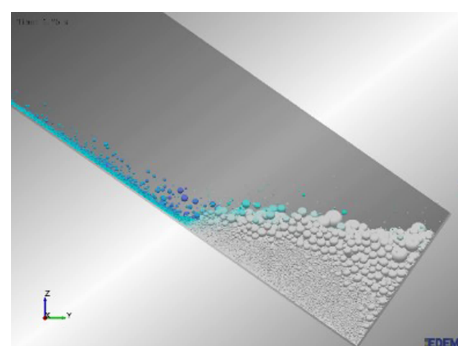


图6 滑体准静态堆积阶段示意图

Fig. 6 Schematic diagram of quasi-static stacking stage

滑体内部能量传递受到抑制, 粗大块石飞跃撞击挡墙的现象较少。如图4 M1 滑体冲击力合力时程曲线所示, 曲线先持续上升, 在准静态堆积阶段达到相对平稳状态。滑体动态冲击力峰值与准静态堆积阶段冲击力接近, 挡墙所受冲击作用主要为滑体重力分量的持续累积。

滑体 M4 中 20 mm 以上粗颗粒含量最多, 细颗粒含量少, 运动过程中粗颗粒组分相互碰撞, 促进了滑体内部能量的传递, 且粗颗粒比表面积小, 摩擦耗能相对较低。如图4 M4 滑体冲击力合力时程曲线所示, 动态冲击阶段, 前缘碰撞飞跃的粗大块体频繁冲击挡墙, 导致其冲击力时程曲线波动大, 量值高, 曲线呈上升趋势; 随着前缘动能较大的滑体堆积静止, 后续颗粒撞击至前缘堆积体, 冲击能量被阻挡耗散, 冲击作用开始向准静态冲击阶段过渡, 曲线逐渐下降, 最后堆积体基本形成, 曲线趋于稳定。

图4 表明, 动态冲击阶段, 控制粒径 d_{60} 为 30 mm 的 M4 滑体模型峰值冲击力最大 (479.209 N), 曲线波动大; 控制粒径 d_{60} 为 5 mm 的 M1 滑体模型峰值冲击力最小 (151.591 N), 曲线波动小; 控制粒径 d_{60} 为 14 mm 的 M2 与 M3 曲线重合度高, 冲

击力相近,但 M2 细颗粒含量较低,级配不良,曲线波动性比 M3 更大。故粗大块石能促进滑体内部的能量传递,提升滑体冲击力,细粒碎屑比表面积大,摩擦耗能显著,抑制颗粒碰撞飞跃,限制了滑体的冲击作用。

图 7 表明,对于滑体模型 M1、M2 和 M4,含量最多的粒组对滑体冲击力的贡献最大。而对于各粒径组分含量较平均的 M3 滑体,同质量下细粒径组分颗粒数量多,在滑体运动过程中大量细颗粒将粗颗粒包围,抑制了粗粒组分与挡墙的直接接触。因此, M3 滑体撞击挡墙的过程主要表现为细颗粒与挡墙的接触碰撞以及后续粗、细颗粒冲击能的间接传递。

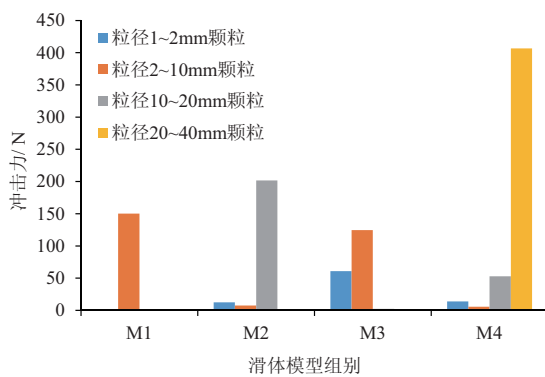


图 7 冲击力最大时刻不同粒组对挡墙的冲击力

Fig. 7 Impact force of different components on the retaining wall at the moment of maximum impact force of samples M1 ~ M4

3.2 颗粒级配对滑体冲击位置的影响

根据力的平移定理,将当前时步,各滑体颗粒对挡墙的冲击力等效合成为一个主矢和一个主矩,即 $(\vec{F} + \vec{M})$,其中

$$|\vec{F}| = |\sum_{i=1}^n \vec{F}_i| \quad (1)$$

力 \vec{F} 便为该时步挡墙所受等效冲击力。挡墙内存在一点 O ,使 $\vec{M} = \vec{M}_O$,该点 O 便为滑体等效冲

击作用点(图 8)。如图 8,以挡墙受力面为坐标平面建立直角坐标系,平行于底板方向为 x 轴,垂直于底板方向为 y 轴,挡墙一底角为 $(0,0)$ 点,得到挡墙受冲击过程中,各时刻等效冲击作用点沿 x 轴及 y 轴的坐标分布情况,即等效冲击高度,等效冲击水平位置频数分布直方图(图 9,图 10)和滑体等效冲击作用分布图(图 11)。

图 9 显示,对于控制粒径 d_{60} 为 5 mm 的 M1 滑体,等效冲击作用高度主要集中于 80 ~ 92 mm 处(频率约 52.7%),此外,等效冲击力在竖直高度方向 0 ~ 80 mm 处均有分布,且分布较均匀;对于 M2,等效冲击作用高度主要集中于 90 ~ 106 mm 处(频率约 70.2%),等效冲击力于竖直高度方向 0 ~ 90 mm 处分布较少且均匀,在 110 mm 以上部位分布极少;对于 M3,等效冲击作用高度主要集中于 100 ~ 120 mm 处(频率约 58.8%),此外,等效冲击力于竖直高度方向 0 ~ 100 mm 处均有分布,且分布较均匀;对于 M4,等效冲击作用高度主要集中于 100 ~ 120 mm 处(频率约 70.1%),等效冲击力在竖直高度 0 ~ 80 mm 处分布较少。图 10 显示, M1 ~ M4 等效冲击力集中分布于水平坐标 140 ~ 155 mm 范围之内。

综上所述,结合图 11 所示滑体等效冲击作用位置分布图,表明四组滑体等效冲击高度主要分布于 80 ~ 120 mm 范围内。随着细颗粒含量的减少,滑体等效冲击作用高度的集中趋势越显著,如 M2 及 M4 滑体模型中,粒径 10 mm 以下颗粒含量不足 10%,而两组试验所得等效冲击高度的集中频率均超过 70%;随着粗颗粒含量的增加,等效冲击作用高度逐渐增大(M1: 80 ~ 92 mm; M2: 90 ~ 106 mm; M3, M4: 100 ~ 120 mm);此外,颗粒级配不影响滑体等效冲击力的水平分布位置,四组滑体等效冲击力均

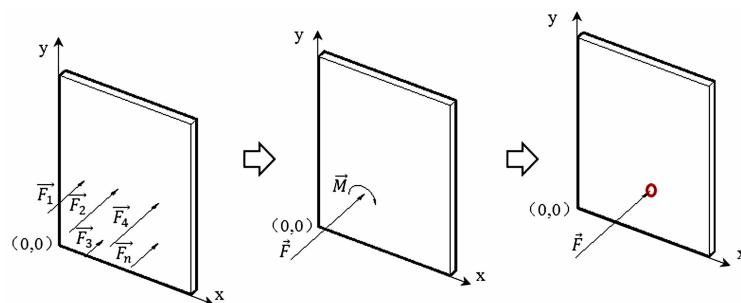


图 8 力的平移定理示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the translational theorem of force

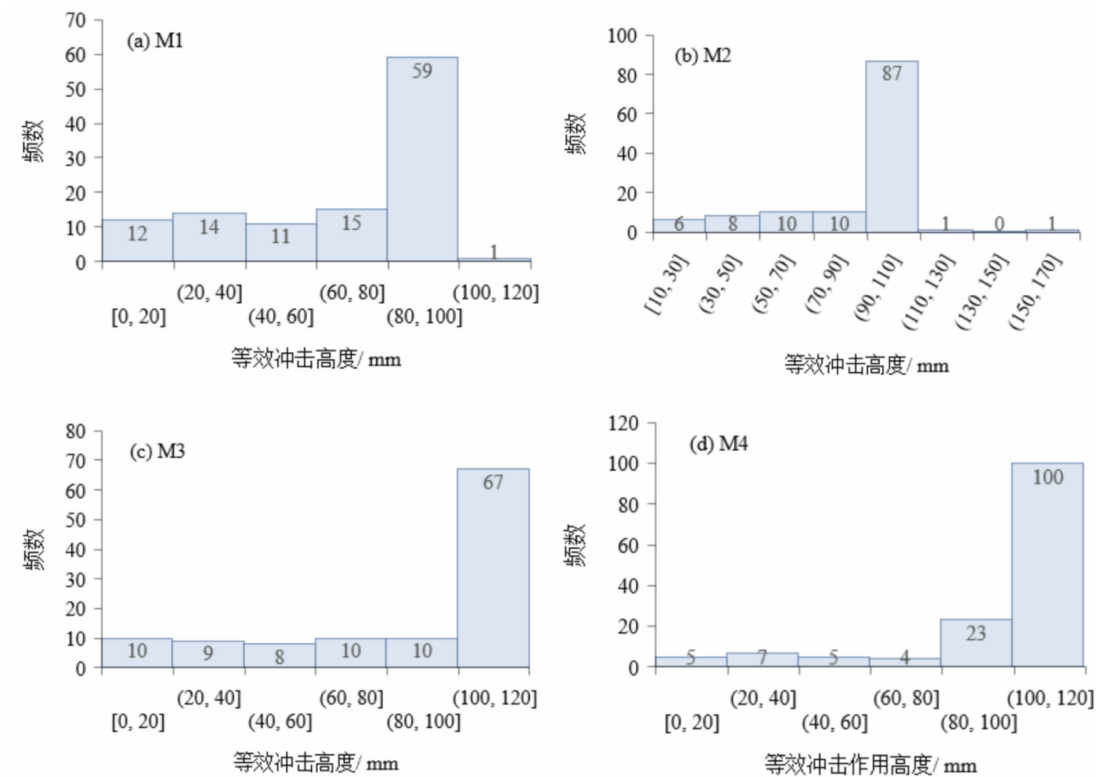


图9 M1 ~ M4 滑体模型等效冲击高度频数分布直方图: (a) M1; (b) M2; (c) M3; (d) M4

Fig. 9 Histogram of frequency distribution of equivalent impact heights of M1 ~ M4 slider models;

(a) M1; (b) M2; (c) M3; (d) M4

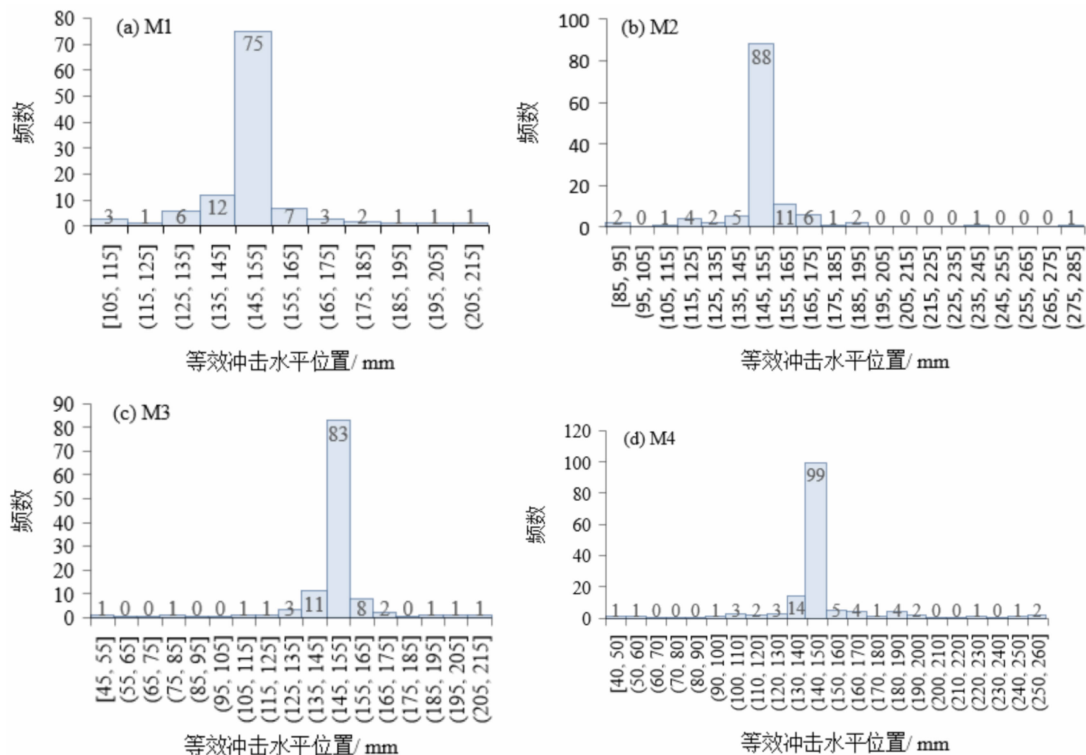


图10 M1 ~ M4 滑体模型等效冲击水平位置频数分布直方图: (a) M1; (b) M2; (c) M3; (d) M4

Fig. 10 Histogram of frequency distribution of equivalent impact horizontal position of

M1 ~ M4 slider models: (a) M1; (b) M2; (c) M3; (d) M4

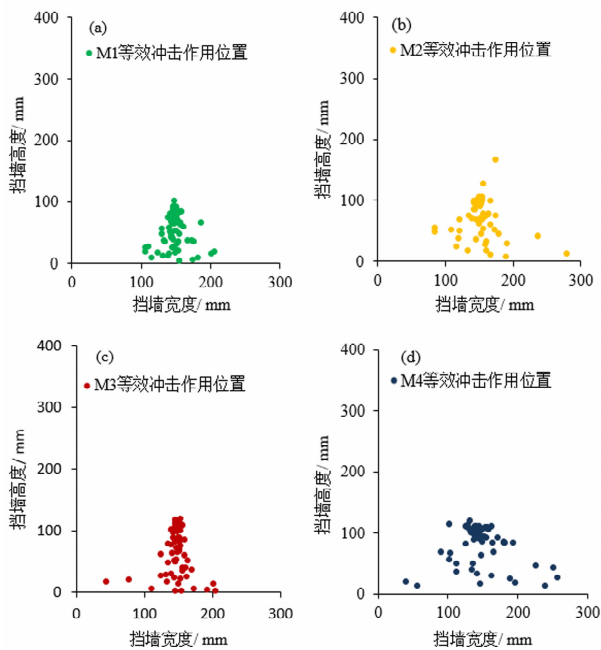


图 11 M1 ~ M4 滑体模型等效冲击作用分布图:

(a) M1; (b) M2; (c) M3; (d) M4

Fig. 11 Distribution of equivalent impact positions of samples

M1 ~ M4: (a) M1; (b) M2; (c) M3; (d) M4

集中分布于挡墙迎流面水平方向 1/2 处。

3.3 等效冲击力与作用位置之间的关系

滑坡碎屑流冲击挡墙的过程中,各滑体模型等效冲击力与作用高度的关系曲线如图 12 所示,对于

控制粒径 d_{60} 为 5 mm 的 M1 滑体,等效冲击力与作用高度呈线性关系,等效冲击力沿作用高度均匀增大,准静态冲击为动态冲击的延续,冲击力及其作用高度较动态冲击阶段大;对于控制粒径 d_{60} 为 14 mm 的 M2 和 M3 滑体,等效冲击力与作用高度呈二次关系,等效冲击力沿作用高度逐渐增大,且增大速率逐渐降低,同等高度下,准静态冲击作用小于动态冲击作用;对于控制粒径 d_{60} 为 30 mm 的 M4,等效冲击力与作用高度呈近似的二次关系,等效冲击力沿挡墙高度方向呈现先增大后减小的趋势,峰值冲击力分布较为分散,沿竖直高度方向的集中趋势不明显,且同等高度下,准静态冲击作用小于动态冲击作用。

滑坡碎屑流冲击挡墙的过程中,各滑体模型等效冲击力与水平作用位置的关系曲线如图 13 所示,滑体冲击力较低的情况下,冲击作用分布较为分散,随着冲击力的增加,冲击作用主要集中于挡墙的中间部位。M1 ~ M4 四组滑体模型的等效冲击水平坐标均值相近,分别为 149.28 mm, 153.74 mm, 148.06 mm 和 149.06 mm。

4 结论及展望

本文以模型试验的资料和数据为依据,运用三维颗粒离散元素法分析软件 EDEM,建立滑坡碎屑

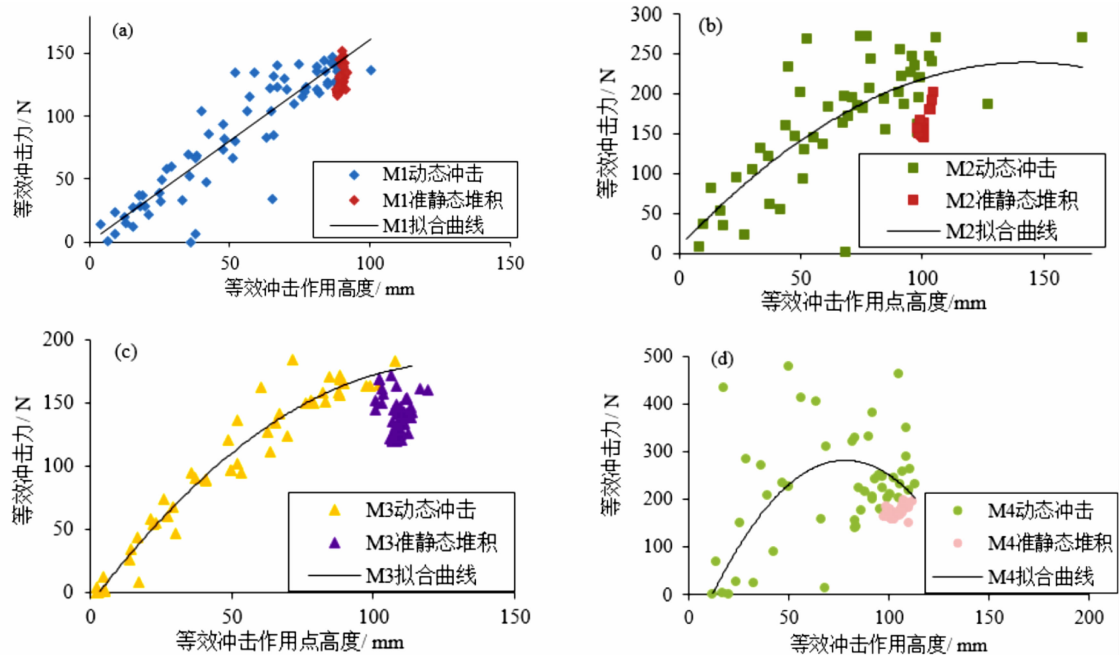


图 12 M1 ~ M4 滑体模型等效冲击力与作用高度关系:(a) M1; (b) M2; (c) M3; (d) M4

Fig. 12 Relationship between equivalent impact forces and acting heights of samples M1 ~ M4: (a) M1; (b) M2; (c) M3; (d) M4

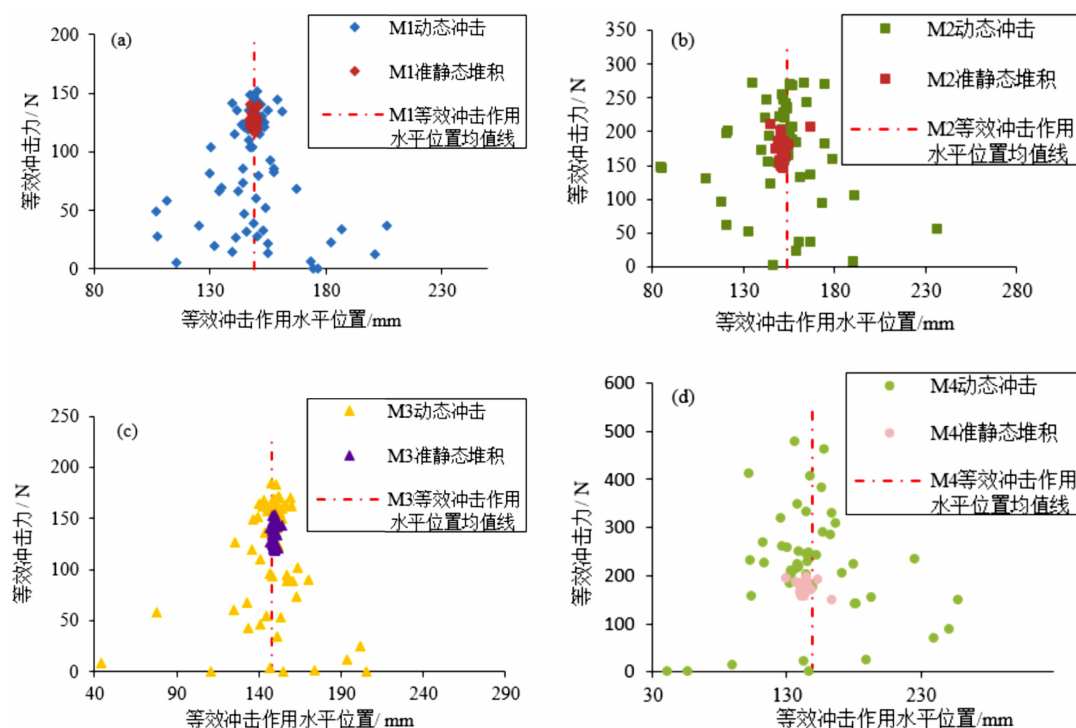


图 13 M1 ~ M4 滑体模型等效冲击力与水平作用位置关系: (a) M1; (b) M2; (c) M3; (d) M4

Fig. 13 Relationship between equivalent impact forces and horizontal action positions of samples M1 ~ M4;

(a) M1; (b) M2; (c) M3; (d) M4

流冲击挡墙的颗粒数值模型,提出滑坡碎屑流等效冲击力及等效冲击位置,研究不同级配条件下,滑坡碎屑流冲击力的分布特征,得出主要结论如下:

(1) 滑体冲击挡墙的过程可划分为动态冲击阶段和准静态堆积阶段。动态冲击过程中,前缘滑体与挡墙直接碰撞接触,后续滑体越过前缘堆积物继续冲击挡墙,堆积体高度不断增加。准静态堆积阶段,堆积体高度基本保持稳定,挡墙所受接触力主要为后续滑体颗粒重力分量的累积以及后续颗粒冲击能量的碰撞传递。

(2) 细粒碎屑比表面积大,摩擦耗能显著,导致滑体内部能量耗散严重,抑制颗粒碰撞飞跃,限制了滑体的冲击作用。粗大块石能促进滑体内部的能量传递,提升滑体冲击力。

(3) 四组滑体等效冲击高度主要分布于 80 ~ 120 mm 范围内,细颗粒含量越少,滑体等效冲击作用高度的集中趋势越显著;随着控制粒径的增加,等效冲击作用高度逐渐增大,滑体等效冲击力与等效冲击作用高度从线性关系向二次关系过渡,并在控制粒径 d_{60} 大于 30 mm 后趋于离散。

(4) 颗粒级配对滑体等效冲击力的水平分布位

置影响较小,四组滑体等效冲击力均集中分布于挡墙迎流面水平方向 1/2 处。

文章针对尚未引起足够关注的滑坡碎屑流冲击作用位置分布特征展开了初步探究,旨在对山区建筑结构抗灾性能的规划、设计及工程防护措施提供启发思想。然而滑坡碎屑流的运动机制包括滑面摩擦效应、颗粒碰撞效应和碎屑流动机制等,对滑坡碎屑流冲击作用分布位置的深入研究,还需结合动力破碎、颗粒分选等运动效应和理论模型,进一步利用模型试验、数值模拟及理论推导相结合的手段,定量分析不同粒组滑体颗粒在运动及冲击过程中所表现出的差异现象。

参考文献 (References)

- [1] 黄润秋,邓荣贵,王士天. 高边坡物质运动全过程模拟[M]. 成都:成都科技大学出版社,1993: 29 - 41 [HUANG Runqiu, DENG Ronggui, ZHANG Zhuoyuan, et al. Full course numerical simulation of high slope material movement[M]. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology, 1993: 29 - 41]
- [2] 王品,徐则民. 头寨大型高速远程滑坡碎屑流堆积体的粒度组成[J]. 山地学报,2013, 31(6): 745 - 752 [WANG Pin, XU Zemin. The grain size composition of touzhai rock-avalanche deposits [J]. Mountain Research, 2013, 31(6): 745 - 752]

- [3] 赵晓彦,胡厚田,齐明柱. 云南头寨沟大型岩质高速滑坡碰撞模型试验[J]. 自然灾害学报,2003,12(3):99-103 [ZHAO Xiaoyan, HU Houtian, QI Mingzhu. Model experiment of high speed collision of landslide rock masses in Touzhai Gully, Yunnan [J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(3): 99-103]
- [4] 王玉峰,程谦恭,朱圻. 汶川地震触发高速远程滑坡-碎屑流堆积反粒序特征及机制分析[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(6):1089-1106 [WANG Yufeng, CHENG Qiangong, ZHU Qi. Inverse grading analysis of deposit from rock avalanches triggered by Wenchuan earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1089-1106]
- [5] 樊晓一,杨海龙,田述军,等. 滑坡碎屑流运动参数与影响因素敏感度研究[J]. 山地学报,2016,34(6):724-731 [FAN Xiaoyi, YANG Hailong, TIAN Shujun, et al. Susceptibility degree of factors influence on the movement parameters of landslide-debris avalanches[J]. Mountain Research, 2016, 34(6): 724-731]
- [6] SASSA K. Landslide volume-apparent friction relationship in the case of rapid loading on alluvial deposits[J]. Landslide News, 1992, (6): 16-18
- [7] 黄润秋. 汶川8.0级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(6):1239-1249 [HUANG Runqiu. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6):1239-1249]
- [8] 方华,裴来政,向灵芝. 汶川地震高速远程滑坡速度研究[J]. 防灾减灾工程学报,2011,31(2):212-217 [FANG Hua, PEI Laizheng, XIANG Lingzhi. Study on kinematic velocity of high-speed and long range landslides induced by Wenchuan earthquake [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(2):212-217]
- [9] FAN Xiaoyi, TIAN Shujun, ZHANG Youyi. Mass-front velocity of dry granular flows influenced by the angle of the slope to the runout plane and particle size gradation[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(2): 234-245.
- [10] 樊晓一,乔建平. “坡”、“场”因素对大型滑坡运动特征的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(11):2337-2347 [FAN Xiaoyi, QIAO Jianping. Influence of landslide ground factors on large-scale landslide movement [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11):2337-2347]
- [11] 张龙,唐辉明,熊承仁,等. 鸡尾山高速远程滑坡运动过程PFC3D模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(S1):2601-2611 [ZHANG Long, TANG Huiming, XIONG Chengren, et al. Movement process simulation of high-speed long-distance Jiweishan landslide with PFC3D [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 2601-2611]
- [12] BI Yuzhang, HE Siming, LI Xinpo, et al. Effects of segregation in binary granular mixture avalanches down inclined chutes impinging on defending structures[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(3):263
- [13] GORDON G. D. Zhou, CHARLES W. W. Ng. Numerical investigation of reverse segregation in debris flows by DEM [J]. Granular Matter, 2010, 12(5):507-516
- [14] JIANG Yuanjun, 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] MORIGUCHI S, BORJA R I, YASHIMA A, et al. Estimating the impact force generated by granular flow on a rigid obstruction[J]. Acta Geotechnica, 2009, 4(1):57-71
- [16] DIANA S, CLAUDIO T, PIETRO C. Discrete element modeling of debris-avalanche impact on earthfill barriers [J]. Physics & Chemistry of the Earth, 2010, 35(3/4/5): 172-181
- [17] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社,2010:1-10 [HU Guoming. Analysis and simulation of granular system by discrete element method using EDEM[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2010:1-10]
- [18] 徐小敏,凌道盛,陈云敏,等. 基于线性接触模型的颗粒材料细-宏观弹性常数相关关系研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(7):991-998 [XU Xiaomin, LING Daosheng, CHEN Yunmin, et al. Correlation of microscopic and macroscopic elastic constants of granular materials based on linear contact model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 32(7): 991-998]
- [19] 韩燕龙,贾富国,唐玉荣,等. 颗粒滚动摩擦系数对堆积特性的影响[J]. 物理学报,2014,63(17):165-171 [HAN Yanlong, JIA Fuguo, TANG Yurong, et al. Influence of granular coefficient of rolling friction on accumulation characteristics[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(17): 165-171]
- [20] 樊晓一,田述军,段晓冬,等. 地形因子对坡脚型地震滑坡运动参数的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(S2):4056-4066 [FAN Xiaoyi, TIAN Shujun, DUAN Xiaodong, et al. Study of topography factors influence on motion parameters for seismic slope-toe landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 4056-4066]

Study on Equivalent Impact Force and Impact Distribution Range of Landslide Debris Flow with Different Gradation

LI Tianhua¹, FAN Xiaoyi^{1,2*}, JIANG Yuanjun³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang 621000, China;

3. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: The impact of landslide debris flow is a continuous and complicated mechanical process caused by a large number of debris particles with uneven size gravels and coarse boulders. In the process of movement and impact, the sliding bodies with different particle sizes and compositions occur internal collision, friction, jumping and so on, resulting in a certain regular change in the magnitude and distribution of impact force of landslide debris flow. Therefore, this research has important scientific significance to make up for the deficiencies in the research of landslide debris flow impact structure and to improve the design of impact-resistant structures. Based on the data of indoor physical model tests, the equivalent impact forces and the equivalent impact positions of landslide debris flow were proposed in terms of a three-dimensional discrete element method, and then it discussed the distribution characteristics of impact forces of landslide debris flow under different grading conditions. The results showed that the processes of sliding impacts on retaining wall could be divided into dynamic impact stage and quasi-static accumulation stage. During the dynamic impact process, the friction energy consumption of the fine particle components of a sliding body was significant, resulting in the reduction of impact forces and their acting height. The collisions between coarse particles with a particle size of 20 mm or more promoted the energy transfer inside the sliding body, resulting in the increase of impact force and acting height of a sliding body. The peak impact force was distributed dispersedly, and the concentration trend of the peak impact force along the vertical height direction was not significant. In the quasi-static stacking stage, the contact forces on the retaining wall were mainly the collision transfer of the impact energy of the subsequent sliding particles and the accumulation of gravity components. Under the condition that the topographical conditions on both sides of sliding zones were basically the same, the horizontal distributions of equivalent impact force of sliding body were mainly concentrated near the central axis of the inflow surface and was less affected by particle gradation.

Key words: landslide debris flow; discrete element method; particle gradation; distribution of impact force