

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240102003

# 落石形状和冲击姿态对落石冲击垫层过程的影响\*

段绍臻, 扇国瑞

(兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 基于离散元法对圆形、椭圆形、方形和三角形的落石,以不同的冲击姿态对其冲击垫层的过程进行数值仿真。结果表明:落石形状和冲击姿态对落石冲击垫层过程的影响不容忽视;当倾斜系数为0时,在相同初始冲击动能下,圆形落石的侵入深度最大,冲击力和底部力最小,因此忽略落石形状会高估侵入深度,而低估冲击力和底部力;基于无量纲分析,给出了落石侵入深度、最大冲击力和底部力关于倾斜系数 $\alpha$ 的拟合公式,随着 $\alpha$ 的增大,落石的侵入深度增大,而冲击力和底部力则减小;最后基于傅里叶描述法生成不规则形状落石,在相同初始冲击动能下,其侵入深度、最大冲击力以及最大底部力的极差随着傅里叶描述符 $D_2$ 和 $D_8$ 的增大而增大。

**关键词:** 落石; 垫层; 形状; 冲击姿态; 傅里叶描述符

**中图分类号:** P694    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0918-10

## Influence of Rockfall Shape and Impact Position on Rockfall Impact Process on Cushion Layers

DUAN Shaozhen, SHAN Guorui

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Using the discrete element method, this study conducted numerical simulations to analyze the impact process of circular, elliptical, square, and triangular rockfalls on cushion layers under different impact positions. The results showed that rockfall shape and impact position had a significant influence on the rockfall impact process on cushion layers. When the inclination coefficient was 0, under the same initial impact kinetic energy, circular rockfalls had the greatest penetration depth and the smallest impact force and bottom force. Therefore, ignoring rockfall shape may lead to an overestimation of penetration depth and an underestimation of impact force and bottom force. Based on dimensionless analysis, the fitting formulas for the rockfall penetration depth, maximum impact force, and bottom force with respect to the inclination coefficient  $\alpha$  were derived. As  $\alpha$  increased, the rockfall penetration depth gradually increased, while the impact force and bottom force decreased. Finally, based on the Fourier descriptor method, irregularly shaped rockfalls were generated. Under the same initial impact kinetic energy, the range of penetration depth, maximum impact force, and maximum bottom force increased with increasing Fourier descriptors  $D_2$  and  $D_8$ .

**Keywords:** rockfall; cushion layer; shape; impact position; Fourier descriptors

\* 收稿日期:2024-01-02;修回日期:2024-03-28

基金项目:国家自然科学基金项目(12262021)资助

作者简介:段绍臻(1982—),女,副教授,博士。主要从事工程力学研究。E-mail: dszbest@126.com

# 0 引言

崩塌是指在陡峭斜坡上的岩土体在重力等作用的影响,突然脱离母体崩落、滚动、堆积在坡脚的地质现象<sup>[1]</sup>,当岩石以不确定轨迹和冲击能量对附近山区道路、桥梁、隧道等交通设施以及居民带来极大的安全隐患时,便称为落石灾害。因此,落石灾害防治研究对保障山区交通安全、减少人员伤亡和财产损失具有重要意义。土壤/砾石垫层被广泛应用于实际工程结构中,人们将碎石和土壤铺设到斜坡、棚洞、明洞或者拱形隧道的表面用来吸收落石冲击带来的入射能量。土壤/砾石垫层由大量的离散固体颗粒组成<sup>[2]</sup>,当滚石颗粒冲击到土壤/砾石垫层上时,该系统可以有效地吸收和耗散落石的冲击能量,从而降低建筑结构上的最大冲击力和破坏力。本文主要针对滚石-垫层随机碰撞过程的研究为垫层设计提供一定理论依据。

滚石-垫层碰撞过程是典型的随机碰撞过程,落石的冲击过程由三类因素决定<sup>[3]</sup>:(a)垫层特性(材料的强度、孔隙率、厚度和粒径等);(b)滚石特性(即强度、质量、形状和尺寸等);(c)碰撞时的运动学(即入射速度、角度和旋转速度等)。其中,垫层的粒径、厚度、落石的质量和入射速度等影响因素对冲击过程的影响已经得到了大量的研究<sup>[4-6]</sup>。落石的侵入深度以及冲击过程产生的动态力(包括落石对垫层的冲击力以及垫层与底部结构之间的作用力)是垫层设计的主要参数。C. Zhu等<sup>[6]</sup>通过数值模拟,分析了垫层厚度和粒径对落石冲击响应特性的影响,发现垫层厚度主要影响垫层底部的冲击力,而垫层粒径会同时影响垫层表面和底部的冲击力。汤明高等<sup>[7]</sup>考虑松散介质的孔隙压密特征,讨论了散粒体斜坡上滚石法向碰撞恢复系数,并提出该进了法向恢复系数的计算公式。

数值模拟和理论计算中通常是将落石简化为球体/圆盘或者将其进行了集中质量化的处理<sup>[5-10]</sup>。考虑到实际落石形状的不确定性和多样性,使得滚石-垫层碰撞过程中两者的接触方式以及力链传递方式与球体/圆盘-垫层碰撞过程不同。S. Perera等<sup>[11]</sup>采用随机形状的石块设计了滚石冲击试验,发现滚石冲击力出现了较强的随机性。此外,一些研究人员尝试引入一些描述形状的指标,以此来量化

形状对落石冲击的影响,例如H. Wadell<sup>[12]</sup>提出的球度( $\psi$ ),W. C. Krumbein<sup>[13]</sup>提出的球形度指标( $S_p$ )在落石冲击过程的研究中得到了更多应用。W. G. Shen等<sup>[14]</sup>引入球形度指标( $S_p$ ),利用数值模拟研究了不同 $S_p$ 值的椭球体落石对土壤缓冲层的影响机理,发现最大冲击力随球形度增大而线性增大,而侵入深度随之线性减小。姬中民等<sup>[15]</sup>将落石分为棱角状和非棱角状进行试验研究,并引入一个形状因子,发现其与落石的法向恢复系数呈强线性正相关关系。在落石与垫层的冲击过程中,往往会因为落石形状的不同导致落石与垫层接触表面积的不同,致使能量传递和力链传递方式不同<sup>[14]</sup>。

因此,本文以滚石-垫层随机碰撞过程作为研究对象,利用离散单元法对四种不同形状的落石与垫层的冲击过程进行了模拟及验证,并讨论了不同形状落石及不同冲击姿态下的冲击响应过程。

## 1 落石冲击垫层模型建立

### 1.1 落石-垫层的离散元模型

垫层的主要功能是作为阻尼结构分散冲击力,降低落石冲击的加速度,增加冲击持续时间。考虑到落石形状的影响,落石与垫层之间的动态相互作用是复杂的。图1分别为圆形落石颗粒与非圆形落石颗粒在冲击过程中的相互作用力。从图中可以得到动态条件下的动量平衡如下:

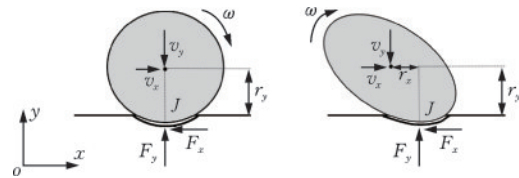


图1 落石颗粒冲击垫层过程中接触点(J点)处的相互作用力示意

Fig.1 Schematic diagram of interaction force at contact point (point J) during rockfall particle impact on cushion layer

$$\begin{cases} m\dot{v}_x = F'_x - F_x \\ m\dot{v}_y = F'_y - F_y \\ I\dot{\omega} = F_x r_y - F_y r_x \end{cases} \quad (1)$$

其中, $v_x$ 和 $v_y$ 分别为滚石冲击垫层过程中速度的切向和法向分量; $\omega$ 为旋转角速度(假设以顺时针为

正);  $\dot{v}_x$  和  $\dot{v}_y$  为加速度的分量;  $\dot{\omega}$  为角加速度;  $F_x'$  和  $F_y'$  分别为外力(例如重力)的切向和法向分量;  $m$  为冲击颗粒的质量;  $I$  是冲击颗粒垂直于运动平面且穿过质心的轴惯性矩;  $F_x$  和  $F_y$  为垫层表面对冲击颗粒的接触力的切向和法向分量;  $r_x$  和  $r_y$  是与  $F_y$  和  $F_x$  相关的力臂。由于非圆形颗粒冲击垫层时  $r_x$  的存在, 导致其在碰撞过程中冲击力以及速度的变化更加复杂。

一般认为, 当落石以正法向速度分量接触垫层时, 冲击过程开始; 当(1)落石反弹, 或(2)落石开始滚动, 或(3)落石完全耗散其动能和弹性能而停止在垫层上时, 冲击过程被认为停止<sup>[14]</sup>。利用离散单元法对落石冲击垫层过程进行数值仿真, 模型如图2所示。其中垫层为多分散无粘性刚性球形颗粒的组合, 垫层的每一侧都受到刚性墙的约束。本研究未考虑冲击过程中颗粒的破坏或破碎, 颗粒之间接触采用赫兹接触模型<sup>[16]</sup>。离散元模拟参数根据 F. Bourrier 等<sup>[17]</sup>的文献选取, 见表1。

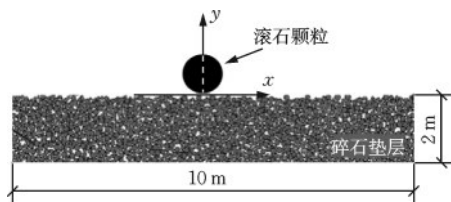


图2 落石与垫层的离散元模型

Fig.2 Discrete element model of rockfall and cushion layer

表1 模拟参数

Table 1 Simulation parameters

参数	取值
碎石垫层颗粒粒径, $R_B$	0.05~0.1 m
碎石垫层颗粒密度, $\rho$	2 650 kg/m <sup>3</sup>
落石颗粒等效半径, $R_A$	0.5 m
落石颗粒质量, $m_A$	2 000 kg
剪切模量, $G$	40 GPa
泊松比, $\nu$	0.25
摩擦系数, $\mu$	0.577
重力加速度, $g$	9.81 m/s <sup>2</sup>
时间步长, $\Delta t$	1 × 10 <sup>-5</sup> s

## 1.2 模型验证

为了评估落石-垫层随机碰撞模型的可靠性, 将碎石垫层退化为单一粒径 PVC 球的紧床堆积, 与 D. Beladjine 等<sup>[18]</sup>的试验结果进行了比较。将本文

中的入射颗粒冲击床面后的法向恢复系数  $e_n$  和恢复系数  $e$  随着入射角度的变化趋势与文献<sup>[18]</sup>试验值的对比曲线绘制于图3中。

在图3中, 空心点代表本文数值模拟的值, 实心点代表 D. Beladjine 等<sup>[18]</sup>的实验结果。由图3可知本文的数值模拟结果中的法向恢复系数  $e_n$  和恢复系数  $e$  随着入射角度的增大而指数减小, 并且数值结果与实验结果吻合较好, 说明了本文中的模型是可靠的。

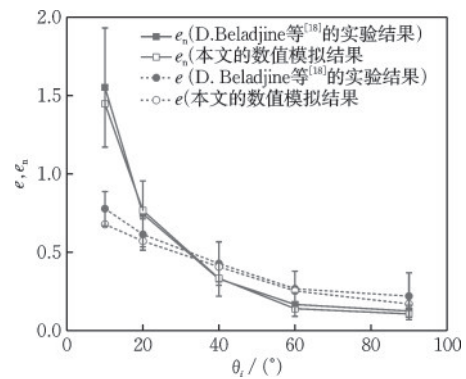


图3 本文的模拟结果与 D. Beladjine 等<sup>[18]</sup>实验结果的比较

Fig.3 Comparison between simulation results in this study and experimental results of D. Beladjine et al.<sup>[18]</sup>

## 2 分析与讨论

### 2.1 模拟方法

本研究选取了四种具有相同外接圆半径 0.5 m 的不同横截面的落石颗粒, 如图4所示。为了研究落石形状对碎石垫层冲击过程的影响, 通过改变各形状落石的密度将所有落石颗粒的质量固定为 2 000 kg, 另外落石入射角度为 90°(即落石垂直下落), 下落高度  $h_i$  分别取 2、3、4、5 m(对应的入射速度  $v_0$  分别为 6.2、7.67、8.86、9.9 m/s)。



图4 模拟中使用的不同落石(S1, S2, S3和S4)

Fig.4 Different rockfall types (S1, S2, S3, and S4) used in simulation

P. Yan 等<sup>[19]</sup>研究了不同球形度的椭球体落石对钢筋混凝土板的冲击响应, 考虑了落石的随机冲

击姿态,发现冲击姿态对落石冲击力有显著的影响。因此,为了更好地体现不同落石形状对垫层冲击效果的影响,对于上文所选各落石分别设置了五种不同的冲击姿态来进行模拟。为了更好地描述不同形状落石的冲击姿态,这里定义一个倾斜系数 $\alpha$ 。假设当落石以其最大表面与垫层发生碰撞时, $\alpha=0$ ,反之, $\alpha=1$ 。各形状落石的不同冲击姿态见表2。

表2 冲击姿态

Table 2 Impact positions

$\alpha$	0	0.25	0.5	0.75	1.0
S1					
S2					
S3					
S4					

## 2.2 不同形状落石对垫层的冲击响应过程

这里设置了四种落石以初始姿态 $\alpha=0$ 时垂直下落冲击垫层,图5(a)~(d)分别给出了四种形状落石在等效下落高度为2、3、4、5 m时冲击过程中侵入深度的时程曲线。由图5可知,落石形状对碰撞过程中落石侵入深度随模拟时间的变化趋势没有定性影响,其侵入深度均随时间的增加而逐渐增加,增加速率而逐渐减慢。随着下落高度的增加,落石侵入深度稳定的时间逐渐增加。如图5(a)中圆形颗粒在2 m等效下落高度时,模拟时间在0.3 s时系统稳定,图5(d)中圆形颗粒在5 m等效下落高度时,模拟时间在0.38 s时系统稳定。但是落石颗粒形状对冲击过程中落石侵入深度的时程曲线的定量影响不容忽视,如图5(a)中可知,圆形落石颗粒侵入深度最大为0.317 m,三角形落石颗粒侵入深度最浅为0.231 m,即将落石颗粒简化为圆形会大大高估侵入深度,在2 m等效下落高度时,最大高估率达到36.8%。

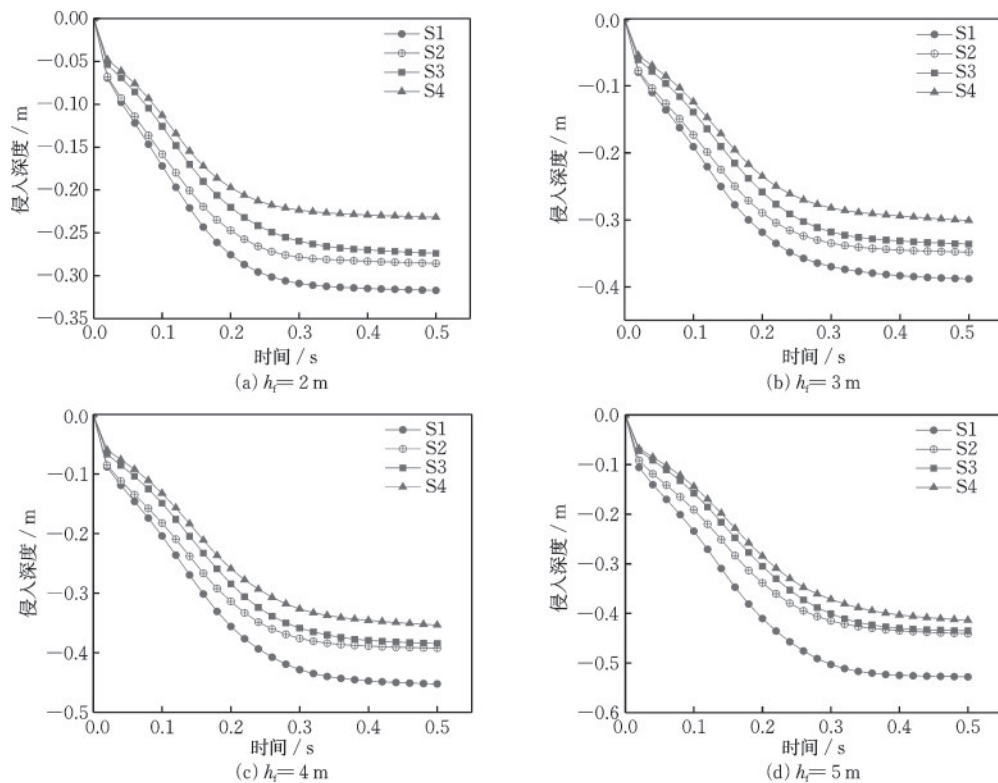


图5 不同形状落石侵入深度对比

Fig.5 Comparison of penetration depths of rockfalls with different shapes

为了分析落石颗粒形状对侵入深度的定量影响,图6中给出了不考虑落石形状时,其最大侵入深度的高估率随等效下落高度的变化。其中对于侵入深度而言,圆形落石相比于其他落石的高估率的计算公式如下:

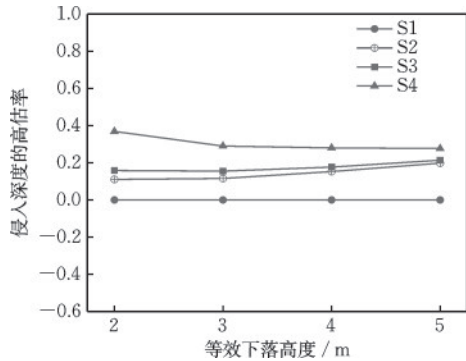


图6 不考虑落石形状时最大侵入深度的高估率  
Fig.6 Overestimation rate of maximum penetration depth without considering rockfall shape

$$\omega_1 = (d_{p,si} - d_{p,s1}) / d_{p,si} \quad (2)$$

式中,  $d_{p,si}$  为各形状落石的最大侵入深度;  $d_{p,s1}$  为圆形落石的最大侵入深度。从图6可知,圆形落石的最终侵入深度总是高于另外三种落石。此外,在不

同等效下落高度下落石侵入深度的高估率变化稳定,相对于椭圆形落石、方形落石和三角形落石,圆形落石最终侵入深度分别高出了14.4%、17.6%和30.4%。

冲击力是落石对垫层造成破坏最直观的因素,图7(a)~(d)显示了四种落石在不同下落高度时的落石冲击力时程曲线,落石与垫层冲击过程中,冲击力先在短时间内迅速增加到峰值,然后逐渐减小到零,下落高度越高,冲击速度越大,落石冲击力越大。另外,从图中可以发现各时程曲线中出现了第二次峰值,这种现象在 F. Calvetti 等<sup>[20]</sup>的实验结果中也出现过,这是由于正在侵入的落石与垫层底部反射的压缩波相互作用导致的。此外,可以发现将落石颗粒简化为圆盘或者球往往会低估其冲击力。

图8为不考虑落石形状时,其最大冲击力的低估率随等效下落高度的变化。其中对于最大冲击力而言,圆形落石相比于其他落石的低估率的计算公式如下:

$$\omega_2 = (F_{\max,s1} - F_{\max,si}) / F_{\max,si} \quad (3)$$

式中,  $F_{\max,si}$  为各形状落石的最大冲击力;  $F_{\max,s1}$  为圆

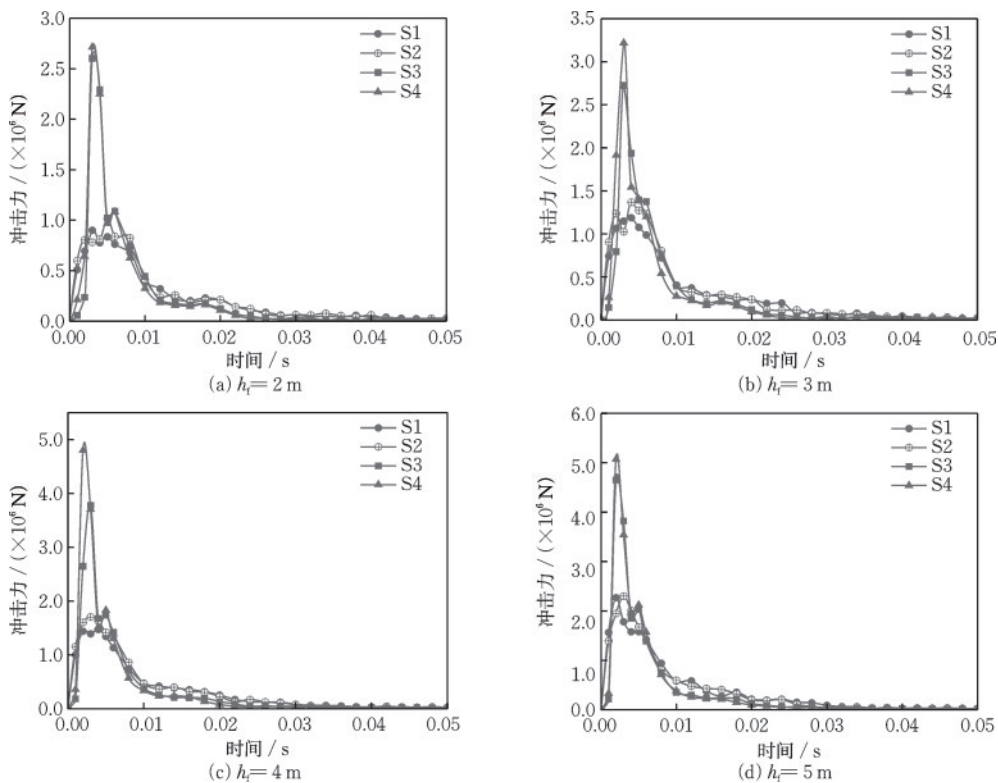


图7 冲击过程中各形状落石的冲击力对比  
Fig.7 Comparison of impact force of rockfalls with different shapes

形落石的最大冲击力。由图8可知,相对于椭圆形落石、方形落石和三角形落石,圆形落石最大冲击力分别低估了7.3%、35.3%和42.1%。因此,落石形状对其冲击力的影响不容忽视。

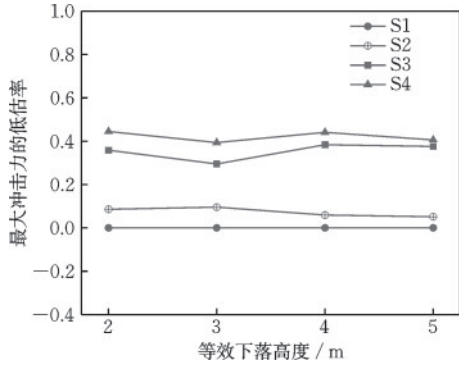


图8 不考虑落石形状时最大冲击力的低估率

Fig.8 Underestimation rate of maximum impact force without considering rockfall shape

当落石撞击垫层时,冲击力通过垫层迅速传播,然后作为外部荷载作用在结构上。在冲击过程中,作用在结构上的合力定义为底部力<sup>[21]</sup>。底部力由垫层的恒载和冲击引起活载两部分组成。图9(a)~(d)显示了四种落石在不同等效下落高度下冲击垫层时底部力的演化过程,图中虚线表示垫层对结构的恒载。在图9(a)~(d)中,底部力的增加均是从时间 $t=0.007$  s开始,这是由于冲击引起的力从垫层的表面传递到底部需要时间。这种时间延迟是垫层的固有特性,与落石形状和下落高度无关。在冲击过程中,底部力先快速增大到峰值,然后减小到恒载以下。事实上底部力曲线在随后的一段时间里会在虚线上下浮动,最后逐渐稳定在虚线左右,根据F. Calvetti等<sup>[22]</sup>的解释,这是由于冲击过程中垫层底部与结构表面之间的一部分垫层颗粒发生反弹导致的。

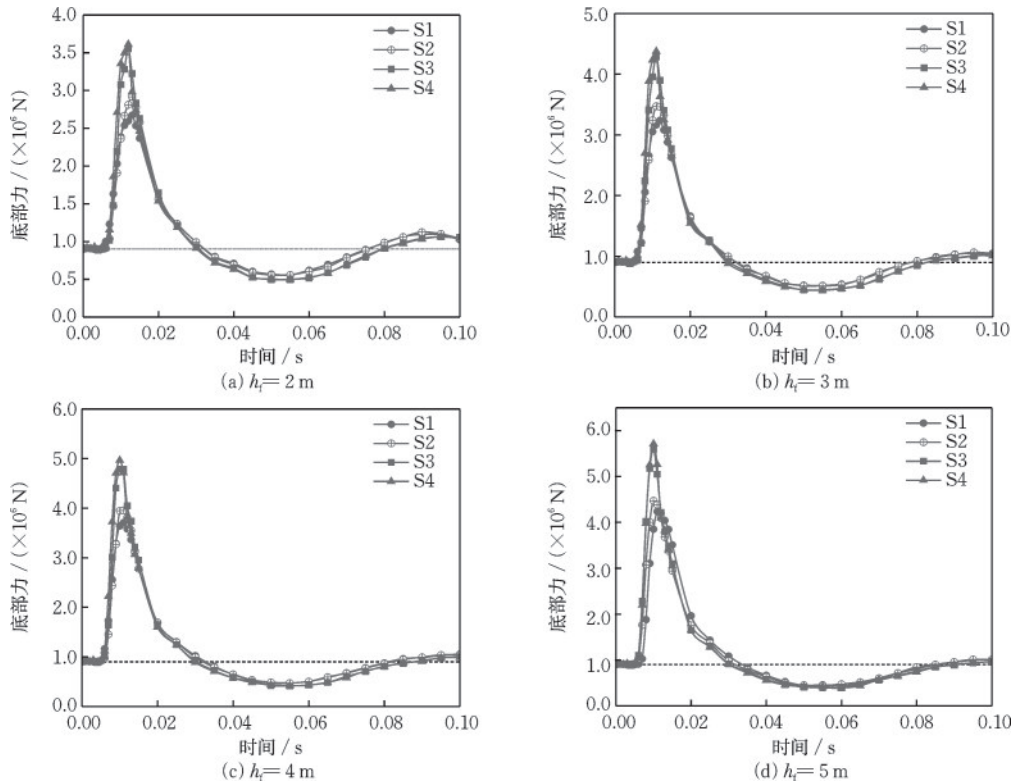


图9 不同形状落石在冲击过程中产生的底部力对比

Fig.9 Comparison of bottom force generated during impact process of rockfalls with different shapes

为了进一步研究落石形状对底部力在定量上的影响,图10给出了不考虑落石形状时,最大底部力的低估率随等效下落高度的变化。其中对于最大底部力而言,圆形落石相比于其他落石的低估率的计算公式如下:

$$\omega_3 = (F_{bot,s1} - F_{bot,si}) / F_{bot,si} \quad (4)$$

式中, $F_{bot,si}$ 为各形状落石对应的最大底部力; $F_{bot,s1}$ 为圆形落石对应的最大底部力。相对于椭圆形落石、方形落石和三角形落石,圆形落石底部力分别低估了4.5%、22.7%和24.2%。以上结果表明,落石形状对底部力的影响比较明显。

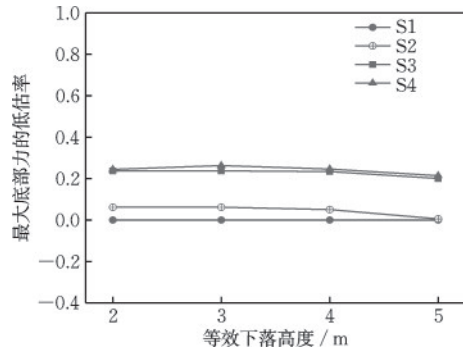


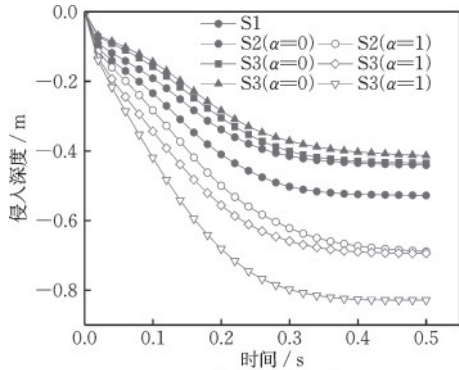
图10 不考虑落石形状时底部力的低估率

Fig.10 Underestimation rate of bottom force without considering rockfall shape

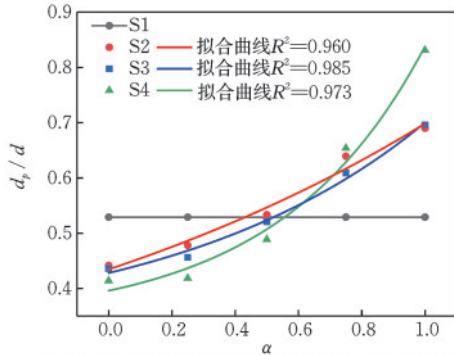
### 2.3 落石冲击姿态对冲击过程的影响

落石形状对冲击过程的影响是复杂的,为了分析冲击姿态对落石冲击过程的影响。以下对落石以表2中的不同冲击姿态在相同等效下落高度为5 m时,垂直冲击碎石垫层的过程进行了分析。

图11(a)显示了落石在相同初始条件下以不同冲击姿态冲击垫层时,侵入深度随模拟时间的变



(a) 不同形状和冲击姿态落石侵入深度的对比



(b) 不同形状和冲击姿态落石无量纲最大侵入深度对比

图11 不同形状和冲击姿态下落石在冲击过程中侵入深度以及无量纲最大侵入深度的对比

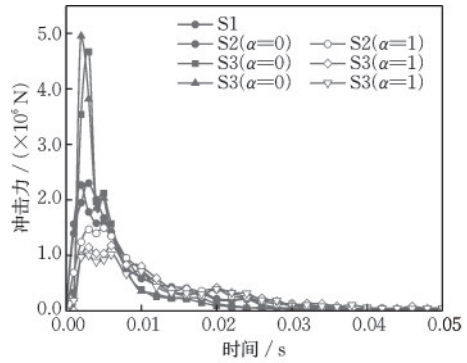
Fig.11 Comparison of penetration depth and dimensionless maximum penetration depth of rockfalls with different shapes and impact positions during impact process

化。从图中可以看出落石侵入深度随模拟时间的变化趋势不受冲击姿态的影响。其中当 $\alpha=0$ 时,S4落石在垫层缓冲作用下的侵入深度最小,这是因为在该工况下S4落石与垫层表面接触面积最大;反之 $\alpha=1$ 时,S4石块的侵入深度最大。因为不同大小的落石侵入深度都不相同,所以结果中利用落石外接圆直径 $d$ 来无量纲化最大侵入深度如图11(b),并得到了其与倾斜系数的拟合曲线,拟合曲线满足以下公式:

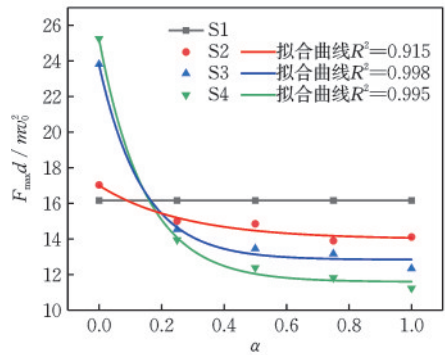
$$y = y_0 + Ae^{-\frac{x}{t}} \quad (5)$$

由图可知11(b),随着 $\alpha$ 的增大,落石与垫层表面的接触面积逐渐减小,因此最大侵入深度逐渐增大,其中S4落石曲线的增长速率最快。

图12(a)为冲击过程中落石冲击力随模拟时间的演化过程,可以发现当 $\alpha=0$ 时,冲击力表现出相对平滑的曲线,而 $\alpha=1$ 时冲击力曲线会有不同程度的震荡。这种现象与垫层冲击区附近力链的形成与消失有关,由于 $\alpha=1$ 时落石与垫层的接触面积相对较小,落石与垫层颗粒的接触次数较少。因



(a) 不同形状和冲击姿态落石冲击力的对比



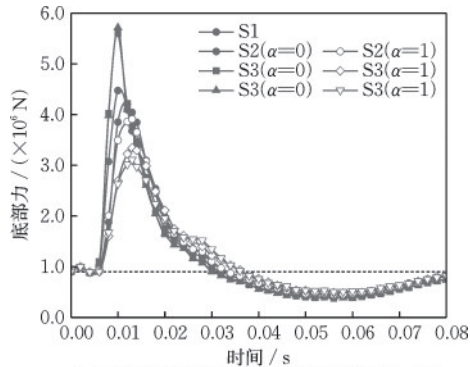
(b) 不同形状和冲击姿态落石无量纲最大冲击力对比

图12 不同形状和冲击姿态下落石在冲击过程中冲击力以及无量纲最大冲击力的对比

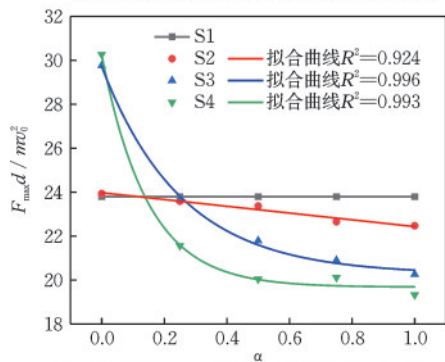
Fig.12 Comparison of impact force and dimensionless maximum impact force of rockfalls with different shapes and impact positions during impact process

此,单个力链的形成或消失会显著影响作用在落石颗粒上的总力,从而发生冲击力振荡现象。因为不同大小的落石最大冲击力都不相同,所以结果中利用参数  $mv_0^2/d$  来无量纲化最大冲击力如图 12(b)所示,并得到了其与倾斜系数的拟合曲线,拟合曲线满足公式(5),其中 S3 和 S4 的曲线先是快速减小,随后逐渐平缓。总的来说,对于相同形状的落石,落石与垫层的接触表面积随着  $\alpha$  的增大而减小,从而落石最大冲击力逐渐减小。

图 13(a)显示的是不同工况落石冲击垫层时底部力随模拟时间的演化曲线,图中虚线表示垫层对结构的恒载。从底部力曲线整体的变化来看,冲击姿态对其变化趋势的影响并不大。不同的是当  $\alpha=1$  时,底部力达到峰值的速度稍慢一些,其底部力峰值更小。因为不同大小的落石最大底部力都不相同,所以结果中利用参数  $mv_0^2/d$  来无量纲化最大底部力如图 13(b)所示,并得到了其与倾斜系数的拟合曲线,拟合曲线满足公式(5),最大底部力随倾斜系数  $\alpha$  的变化趋势与最大冲击力相似。倾斜系数对



(a) 不同形状和冲击姿态落石的底部力的对比



(b) 不同形状和冲击姿态落石无量纲最大底部力对比

图 13 不同形状和冲击姿态下落石在冲击过程中底部力以及无量纲最大底部力的对比

Fig.13 Comparison of bottom force and dimensionless maximum bottom force of rockfalls with different shapes and impact positions during impact process

S3 和 S4 落石所引起最大底部力的影响更明显,从  $\alpha=0$  到  $\alpha=1$ , S3 和 S4 落石冲击下的最大底部力分别减小了 31.9% 和 36.2%。因此,落石形状和冲击姿态会对其冲击力和底部力的影响不容忽视。

总而言之,落石形状和冲击姿态对落石—垫层的冲击过程的影响很大。落石与垫层的初始接触表面积越大,侵入深度越小,冲击力和底部力越大。

#### 2.4 傅里叶描述符生成的不规则形状落石冲击垫层的响应

对于岩石颗粒形状的特征一直以来都是人们所期望的,相比于矩形,圆形等简化的规则颗粒形状,采用实际颗粒形状进行细观描述与数值模拟,能够获得更加符合实际特征的计算结果。在文献<sup>[23]</sup>中提出了一种基于颗粒轮廓的傅里叶描述法,这种方法在地质研究中应用较多,主要用于分析颗粒土的粗糙度和结构特征。该方法是将平面轮廓分为  $N$  等份,  $\theta=2\pi/N$ ,按逆时针将圆心角编号为  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_N$ , 圆心角  $\theta_i$  处的半径为  $r_i(\theta_i)$ :

$$r_i(\theta_i) = r_0 + \sum_{n=1}^N [A_n \cos(n\theta) + B_n \sin(n\theta)] \quad (6)$$

其中  $r_0$  为颗粒平均半径:

$$r_0 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N r_i$$

$N$  为圆心角等分数,即颗粒轮廓采样点总数,亦称之为谐波总数,  $n$  称为谐波序号,  $A_n$  和  $B_n$  为傅里叶系数,  $D_n$  为傅里叶描述符<sup>[24]</sup>:

$$A_n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [r_i \cos(i\theta_i)]$$

$$B_n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [r_i \sin(i\theta_i)]$$

$$D_n = \frac{\sqrt{A_n^2 + B_n^2}}{r_0}$$

一般认为有 64 个有效描述符,其中  $D_1$  表示颗粒形心对中心点的偏移程度;  $D_2$  表示颗粒伸长程度;  $D_3$  至  $D_8$  主要定义颗粒轮廓的不规则特性;  $n>8$  时,各描述符表征颗粒表面粗糙程度。一般用描述符  $D_2$ 、 $D_3$  和  $D_8$  即可表征相对复杂的颗粒形状。如图 14 是利用 MATLAB 软件通过改变  $D_2$ 、 $D_3$  与  $D_8$  生成的  $r_0=0.5$  的不同形状颗粒。

将图 14 中的各形状轮廓利用 clump 命令创建落石颗粒,在等效下落高度 5 m 下与第 2 节所建立的垫层模型进行冲击模拟测试。为了使测试结果更加合理,每种落石颗粒以 5 种不同冲击姿态分别进行模拟测试,然后给出各组落石在不同冲击姿态下的侵入

深度、最大冲击力以及最大底部力的最大值和最小值如表3和表4所示。这里以极差 $R$ 表示最大值与最小值的差值,以侵入深度为例,极差计算如下:

$$R = d_p^{\max} - d_p^{\min} \quad (7)$$

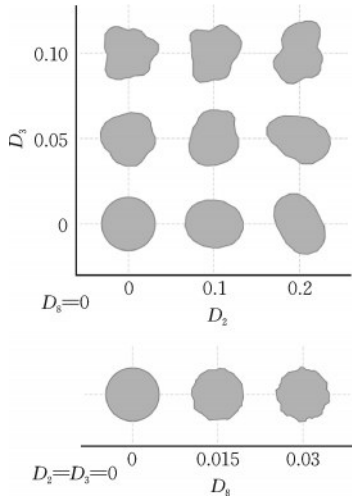


图14 利用傅里叶描述符 $D_2$ 、 $D_3$ 和 $D_8$ 生成不同形状的颗粒  
Fig.14 Generation of particles with different shapes using Fourier descriptors  $D_2$ ,  $D_3$ , and  $D_8$

表3 描述符 $D_2$ 和 $D_3$ 对落石冲击过程的影响

Table 3 Influence of descriptors  $D_2$  and  $D_3$  on impact process of rockfalls

$D_8=0$	侵入深度/m		冲击力/ ( $\times 10^6$ N)		底部力/ ( $\times 10^6$ N)			
	$D_3$	$D_2$	Max	Min	Max	Min	Max	Min
0	0	0	0.52	0.52	3.23	3.23	4.70	4.70
		0.1	0.57	0.43	3.68	3.16	4.84	4.63
		0.2	0.62	0.40	4.62	2.88	5.28	4.28
0.05	0	0	0.57	0.46	3.31	2.81	4.85	4.61
		0.1	0.59	0.43	3.41	2.89	4.91	4.52
		0.2	0.64	0.35	4.59	2.71	5.86	4.29
0.1	0	0	0.66	0.46	3.01	2.59	4.63	4.36
		0.1	0.62	0.44	3.54	2.75	4.68	4.32
		0.2	0.64	0.39	3.07	2.68	4.49	4.20

表4 描述符 $D_8$ 对冲击过程的影响

Table 4 Influence of descriptors  $D_8$  on impact process of rockfalls

$D_2=D_3=0$	侵入深度/m		冲击力/ ( $\times 10^6$ N)		底部力/ ( $\times 10^6$ N)		
	$D_8$	Max	Min	Max	Min	Max	Min
0	0	0.52	0.52	3.23	3.23	4.70	4.70
	0.015	0.52	0.49	3.47	2.98	4.82	4.53
	0.03	0.52	0.47	3.38	2.82	4.80	4.56

通过以上数据分析发现,描述符 $D_2$ 、 $D_3$ 和 $D_8$ 对与落石与垫层的冲击过程有着比较明显的影响。当 $D_3$ 和 $D_8$ 不变时,随着 $D_2$ 的增大,颗粒形状变得扁平,在不同冲击姿态下其侵入深度、最大冲击力以及最大底部力的极差将变得更大。当 $D_2$ 和 $D_3$ 不变时,随着 $D_8$ 的增大,颗粒表面粗糙度增大,在不同冲击姿态下其侵入深度、最大冲击力以及最大底部力的极差增大。而当 $D_2$ 和 $D_8$ 不变时,随着 $D_3$ 的改变,颗粒的凹陷情况使得落石与垫层之间的动态作用更加复杂,很难有一个定量的判断。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

主要分析了落石形状和冲击姿态对落石与垫层冲击过程的影响。考虑落石的不同冲击姿态,引入一个表征落石初始冲击姿态的指标-倾斜系数 $\alpha$ 。基于2D离散单元法对四种常见形状的落石在相同冲击动能下进行了冲击模拟,得出以下结论:

(1) 落石形状对落石冲击过程的影响不容忽视。当 $\alpha=0$ 时,形状对落石的侵入深度、冲击力和底部力随模拟时间变化的影响定性上可以忽略,定量上不容忽视;将落石颗粒简化为圆盘或者球会明显的高估其侵入深度而低估冲击力和底部力。其中最明显的是相比于三角形落石,圆形落石侵入深度的高估率达到了30.4%,而冲击力和底部力的低估率分别为42.1%和24.2%。

(2) 落石冲击姿态对落石冲击垫层的影响不容忽视。冲击姿态对落石的侵入深度、冲击力和底部力随模拟时间变化的影响定性上可以忽略,定量上不容忽视;根据无量纲分析给出了侵入深度、最大冲击力和底部力关于 $\alpha$ 的拟合公式( $y = y_0 + Ae^{-\frac{x}{\tau}}$ ),其中随着 $\alpha$ 的增大,落石与垫层表面的初始接触面积逐渐减小,其侵入深度逐渐增大,而冲击力和底部力逐渐减小。

(3) 考虑不规则形状落石与垫层的冲击响应过程,利用傅里叶描述法,通过改变傅里叶描述符 $D_2$ 、 $D_3$ 和 $D_8$ 的值生成具有相同质量的不规则形状落石。研究发现,控制形状伸长度的 $D_2$ 和控制形状粗糙度的 $D_8$ 对于落石碰撞过程有影响,其中落石在不同冲击姿态下的侵入深度、最大冲击力以及最大底部力的极差随着 $D_2$ 和 $D_8$ 的增大而增大。

### 3.2 讨论

为保证研究中分析对比的有效性,需要保证落石具有相同的初始冲击动能,其中有两种设置方法:一是考虑具有相同外接圆半径而密度不同的落石在相同下落高度下冲击;二是通过改变外接圆半径而保持密度相同的落石在同一下落高度下冲击。在本研究中只考虑了第一种设置方法下不同形状落石对垫层的冲击,而第二种设置方法的落石对垫层的冲击是否会有相同的结论仍需进一步探讨。

碎石垫层的颗粒尺寸、形状以及排列方式会对影响冲击过程中力链的传递和能量的消耗,因此在接下来的工作中,将继续讨论碎石垫层对冲击过程的影响。

此外,在本模拟中将落石视作一个整体而没有考虑落石的破碎情况,在后续的工作中将考虑采用多颗球单元黏结来创建落石,通过合理的黏结强度的破坏来模拟落石的破碎情况。

### 参考文献:

[1] 刘汉龙,马彦彬,仇文岗.大数据技术在地质灾害防治中的应用综述[J].防灾减灾工程学报,2021,41(4):710-722.  
Liu H L, Ma Y B, Zhang W G. Application of big data techniques in geological disaster analysis and prevention: A Systematic Review[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(4): 710-722. (in Chinese)

[2] 罗杰,肖建春,马克俭,等.落石冲击下多种类型土壤缓冲性能研究[J].防灾减灾工程学报,2019,39(1):164-170.  
Luo J, Xiao J C, Ma K J, et al. Buffering capacity of various types soil under rockfall impact load[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(1): 164-170. (in Chinese)

[3] Labiouse V, Descoedres F, Montani S. Experimental study of rock sheds impacted by rock blocks[J]. Structural Engineering International, 1996, 3(3): 171-176.

[4] 朱大鹏,彭泰鑫,黄玲.砂土垫层的缓冲效应试验研究[J].中国测试,2020,46(3):8.  
Zhu D P, Peng T X, Huang L. Experimental study on layering effect of sand layer[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(3): 8. (in Chinese)

[5] 王林峰,刘丽,唐芬,等.基于落石棚洞冲击试验的落石冲击力研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(6):

973-979.  
Wang L F, Liu L, Tang F, et al. Study on impact force of rockfall impact experiment on shed tunnel[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(6): 973-979. (in Chinese)

[6] Zhu C, Wang D S, Xia X, et al. The effects of gravel cushion particle size and thickness on the coefficient of restitution in rockfall impacts[J]. Natural Hazards & Earth System Science, 2018, 18(6): 1811-1823.

[7] 汤明高,赵欢乐,毛宇祥.散粒体斜坡上滚石法向碰撞恢复系数研究[J].防灾减灾工程学报,2023,43(3):604-613.  
Tang M G, Zhao H L, Mao Y X. Study on the normal restitution coefficient of rockfall impaction loosegranular slope[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(3): 604-613. (in Chinese)

[8] 黄福有,张路青,周剑,等.落石冲击作用下棚洞垫层动力响应的颗粒级配效应耦合数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(2):413-428.  
Huang F Y, Zhang L Q, Zhou J, et al. Coupled numerical simulation study on particle gradation effect of the dynamic response of shedcushion under rockfall impact [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(2): 413-428. (in Chinese)

[9] Naito N, Maeda K, Konno H, et al. Rockfall impacts on sand cushions with different soil mechanical characteristics using discrete element method [J]. Soils and Foundations, 2020, 60(2): 384-397.

[10] Chen T J, Zhang G C, Xiang X. Research on rockfall impact process based on viscoelastic contact theory[J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 173: 104431.

[11] Perera S, Lam N, Pathirana M, et al. Deterministic solutions for contact force generated by impact of wind-borne debris[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 91: 126-141.

[12] Wadell H. Volume, shape and roundness of rock particles[J]. Journal of Geology, 1932, 40(5): 443-451.

[13] Krumbein W C. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles [J]. Journal of Sedimentary Research, 1941, 11 (2): 64-72.

[14] Shen W G, Zhao T, Dai F, et al. DEM analyses of rock block shape effect on the response of rockfall impact against a soil buffering layer[J]. Engineering Geology, 2019, 249: 60-70.

(本文编辑:苏泽云)

(下转第960页)