

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210603003

## 散粒体斜坡上滚石法向碰撞恢复系数研究\*

汤明高<sup>1,2</sup>, 赵欢乐<sup>1,2</sup>, 毛宇祥<sup>1,2</sup>

(1. 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;

2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

**摘要:** 国内外在研究滚石碰撞问题时多将碰撞目标假设为弹塑性体, 从而推导出恢复系数计算公式。但是对于散粒体斜坡, 由于具有结构松散、高压压缩、低黏结力等物理力学特性, 如果将其完全考虑为弹塑性体, 那么低估了其自身的耗能潜力。为此, 我们考虑了松散介质的孔隙压密特征, 改进提出了散粒体斜坡上滚石法向碰撞恢复系数的计算式, 并探讨了滚石碰撞再回弹的临界条件。同时以西藏昌都察达隧道进口散粒体斜坡为算例进行数值模拟, 分析了5种影响因素下滚石法向碰撞恢复系数变化规律, 并与改进公式、已有相关公式计算结果进行了对比分析。结果表明改进公式与数值模拟结果较为吻合, 优于假设为弹塑性体的公式计算值。研究思路及成果可为类似区域性问题的提供参考文献。

**关键词:** 滚石; 散粒体斜坡; 法向碰撞恢复系数; 动能守恒定律; 计算公式

**中图分类号:** TU457   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2023)03-0604-10

## Study on the Normal Restitution Coefficient of Rockfall Impaction Loose Granular Slope

TANG Minggao<sup>1,2</sup>, ZHAO Huanle<sup>1,2</sup>, MAO Yuxiang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology,

Chengdu 610059, China)

**Abstract:** In the studies on rockfall impact problems in China and abroad, the impact target is commonly assumed to be an elastic-plastic body, from which the calculation formula for the restitution coefficient is deduced. However, for granular slopes, due to their physical and mechanical properties such as loose structure, high compression, and low cohesion, treating them strictly as elastic-plastic bodies may underestimate their energy dissipation potential. In this paper, we considered the pore compaction characteristics of the loose medium, improved the formula for calculating the normal restitution coefficient of rockfalls on granular slopes, and discussed the critical conditions of rockfall impact rebound. At the same time, we took the granular slope at the entrance to the Chada tunnel in the Changdu area of Tibet as an example, carried out the numerical simulation, analyzed the variation law of the normal restitution coefficient of rockfalls under five influencing factors. We also compared the

\* 收稿日期: 2021-06-03; 修回日期: 2021-10-13

基金项目: 国家自然科学基金重大专项项目(41941019)、第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0201)资助

作者简介: 汤明高(1978—), 男, 教授, 博士。主要从事地质灾害机理、评价预测及防治研究。E-mail: tomyr2008@163.com

通讯作者: 赵欢乐(1995—), 男, 博士研究生。主要从事斜坡、冰川稳定性研究。E-mail: 2020010067@stu.cduet.edu.cn

calculations of the refined formula with existing ones. The results show that the improved formula aligns well with the numerical simulation results, outperforming the calculation values derived from the elastic-plastic body assumption. The methodologies and results from this study may provide reference to similar problems of other regions.

**Keywords:** rockfall; loose granular slope; the normal restitution coefficient; law of conservation of momentum; formula

## 0 引言

恢复系数(COR)是体现碰撞过程中能量损耗的重要参数,在材料、机械等领域研究广泛<sup>[1-4]</sup>。现有3种定义:第一种,碰撞后、前速度之比的牛顿定义<sup>[5]</sup>;第二种,卸、加载阶段冲量之比的泊松定义<sup>[6]</sup>;第三种,卸载弹性应变能释放量与加载弹性应变能吸收量之比的斯特朗定义<sup>[7]</sup>。近年来该系数在地质灾害领域也备受青睐,是计算滚石运动距离的前提。

本文探讨的滚石法向碰撞恢复系数的计算公式是基于H.Hertz接触力学<sup>[8]</sup>,在考虑材料弹塑性特性的基础上推导而出。国外K.L.Johnson<sup>[9]</sup>,C.Thornton<sup>[10]</sup>在分别考虑理想弹塑性、弹塑性材料前提下,给出了小球的法向碰撞恢复系数理论公式。国内何思明研究员也做了一系列显著工作,2008年引入摩尔-库仑屈服准则,研究了滚石冲击荷载作用下土体的初始屈服压力和冲击速度;同年,研究了滚石在坡面上的运动特征,而后考虑材料的弹塑性强化特性,提出了一种新的颗粒弹塑性接触理论;2009年推导了滚石法向碰撞恢复系数计算公式,并验证了其合理性<sup>[11-14]</sup>。杨海清等<sup>[15]</sup>考虑碰撞过程中地面的弹塑性变形,推导出依赖于碰撞前速度、落石形状、地面材料的滚石碰撞恢复系数计算公式,而后应用于重庆万州首立山滚石灾害实例中,验证了公式的可靠性。章广成等<sup>[16]</sup>在前人提出的基于准静态接触力学理论的法向恢复系数计算公式基础上,修正了该公式。柳宇<sup>[17]</sup>测试了室内试验与从能量角度定义的恢复系数计算公式结果的吻合度,综合试验结果,回归分析得到恢复系数的理论经验公式。梅雪峰等<sup>[18]</sup>指出普遍采用的Thornton速度恢复系数偏大,会造成防护结构的失效或材料浪费,为此他们基于土体的弹塑性特征,利用经典接触理论,推导验证了以初始入射速度、入射角为变量的落石碰撞过程中的能量恢复系数计算公式。此外,叶四桥等<sup>[19]</sup>,吕庆等<sup>[20]</sup>,S.H.Cui等<sup>[21]</sup>,叶阳等<sup>[22-23]</sup>,胡杰等<sup>[24]</sup>从室内或现场试验角度

出发,采用测试手段获取了滚石法向碰撞恢复系数。

从上述关于滚石法向碰撞恢复系数研究文献中,我们得知,要想获得滚石的法向碰撞系数无外乎就两个方法,公式计算和现场(室内)试验。但是存在一个问题,不是所有的碰撞恢复系数都值得以室内或现场试验的方式获取,因为试验的成本相对高昂。因此大多数情况下,我们还是要利用公式计算恢复系数,不过在碰撞过程中是否所有被撞击的物体开始都应看作弹塑性材料呢?如果不是,那么上述公式则需进一步修正。

这样的问题就存在于我国西部较为干旱的高寒山区,那儿昼夜温差大,岩土体风化作用强烈,多发育散粒体斜坡。散粒体斜坡是重力堆积于坡脚,且达到动态临界平衡的碎石堆<sup>[25]</sup>;堆积物主要为块碎石,直径集中在3~20 cm,具有结构松散、高压缩、低黏结力等独特物理力学特征<sup>[26]</sup>;颗粒之间几乎没有胶结物联结,完全是一盘散砂<sup>[27]</sup>。因此笼统地将整个散粒体斜坡看为弹塑性体将导致计算的滚石法向碰撞系数偏大,低估了其自身的耗能潜力,导致设计的防护结构材料浪费。本文尝试将散粒体斜坡区分为松散层与密实层,以细、宏观相结合的角度对滚石法向碰撞系数计算公式进行修正,并对其影响因素进行分析,不失为一种积极探索。

## 1 滚石碰撞散粒坡面问题描述

在川藏交通廊道昌都至伯舒拉岭段开展崩塌隐患现场调查工作,调查结果显示危岩体往往位于山体上部,山脚多为重力堆积的散粒体,厚度在0.5~50 m,坡表基本无植被发育。正如我们所知砂层有耗能能力,一些学者的研究也证实了这一点,如裴向军等<sup>[28]</sup>,C.Zhu等<sup>[29]</sup>,王永东等<sup>[30]</sup>,朱大鹏等<sup>[31]</sup>关于砂土、砾石或碎石垫层的耗能缓冲效果的研究。特别地,徐胜<sup>[32]</sup>指出保持在蓬松状态,自然堆砌的垫层耗能效果佳。王东坡等<sup>[33]</sup>指出松散砂土垫层比密实砂土垫层具有更好的耗能效果。吴建利等<sup>[34]</sup>指出EPS泡沫-砂土组合缓冲层的消能效

果最优,其次为碎石土,砂最差。综上可知松散碎裂介质耗能可观,而西藏的散粒体斜坡又何尝不是由松散碎裂介质组成。

对于松散介质,以砂层为例,张连震等<sup>[35-36]</sup>指出砂层压缩过程呈现显著的非线性特征(图1(c)),和岩石全应力应变曲线<sup>[37]</sup>压密阶段的非线性具有相似性(图1(b)),均是由于孔隙的闭合引起。那么西藏的散粒体斜坡在滚石碰撞下是否也表现出显著非线性呢?那么整体将其考虑为弹塑性体(图1(a))是否合理?笔者认为西藏散粒体斜坡有所不同,可以分为松散层和密实层(图2),松散层更像阎宗岭<sup>[38]</sup>描述的堆石体,即由颗粒和孔隙组成的无黏聚性的散体颗粒材料。

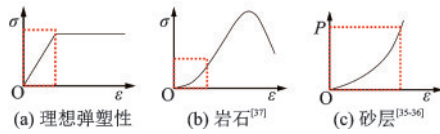


图1 应力(或压力)应变关系<sup>[35-37]</sup>

Fig.1 Relationship between stress (or pressure) and strain<sup>[35-37]</sup>

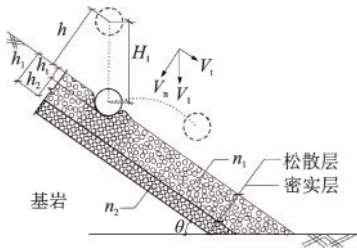


图2 滚石碰撞坡面模型

Fig.2 Model of rockfall impact on a slope

由此,为了便于下文公式推导,本文将该地区滚石碰撞坡面的过程(图3)分成三个阶段:

I、自由落体运动阶段,外界条件(降雨、冻融等)变化使得岩体结构面强度衰减,逐渐形成危岩,危岩失稳脱离母体,裂解成滚石,在重力作用下自由下落至坡面。

II、松散层压密阶段,松散层的散粒在滚石冲击作用下破碎,破碎细颗粒充填粗颗粒间孔隙;颗粒间挤压、滑移错动,由随机排列趋于定向排列,排列过程中孔隙再次被充填,冲击影响范围内的松散颗粒被压密至与密实层孔隙度相当(如图2所示);此阶段松散层孔隙的闭合为体积变形(区别于塑性变形),假定滚石为刚体,松散层变形是由孔隙闭合,颗粒重新排列造成,压密后的散粒体再视作弹塑性体,遵循连续介质力学理论假定。

III、滚石回弹阶段,滚石继续冲击压密过的松

散层,发生弹塑性变形。变形到一定程度,滚石回弹,继续沿坡面向下碰撞弹跳。

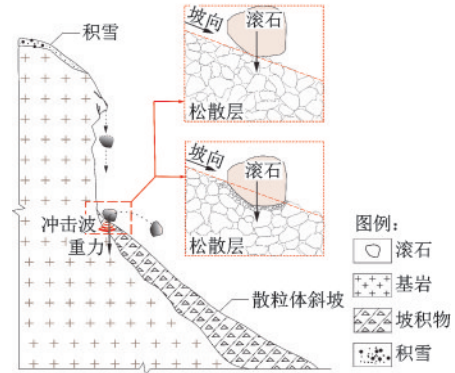


图3 碰撞过程示意

Fig.3 Impact process

## 2 滚石法向碰撞恢复系数公式修正

基于上述讨论与假定,分别考虑散体斜坡的微观离散、宏观连续特性进行如下滚石法向碰撞恢复系数公式修正。

### 2.1 法向碰撞恢复系数公式

#### 2.1.1 自由落体运动阶段

在高达 $H_1$ 的位置,裂隙岩体裂解成滚石,自由下落与散粒体斜坡松散层面碰撞,假设坡面夹角为 $\theta$ (图2),松散层初始孔隙度为 $n_1$ ,密实层孔隙度为 $n_2$ 。滚石做自由落体运动,刚刚到达坡面时,滚石的速度为:

$$V_1 = \sqrt{2gH_1} \quad (1)$$

式中, $V_1$ 为滚石刚与坡面接触时的速度; $H_1$ 为落距; $g$ 为重力加速度。

将式(1)中速度 $V_1$ 分解得到滚石法向速度 $V_n$ ,切向速度 $V_t$ :

$$V_n = \sqrt{2gH_1} \cos \theta, V_t = \sqrt{2gH_1} \sin \theta \quad (2)$$

#### 2.1.2 松散层压密阶段

此阶段滚石与坡面相互作用体现在两个方面:碰撞面的支撑作用及滚石与接触面间的摩擦作用<sup>[39]</sup>。滚石在法向上的自由落高不只是 $h$ ,由碰撞冲量模型(图4)可知最大冲击力出现在开始冲击后的短暂时间段内,因此自由落高还需考虑一定的松散层压密厚度,即自由落高 $H_1$ 由两部分组成(如图3):自由落体法向高度 $h = H_1 \cos \theta$ 与松散层变形量 $h_1 = h_1 - h_2$ 。由于压密阶段是瞬时的(相比撞击的时间而言),因此,压密阶段高度增量取松散层变形

量的一半,即  $0.5 h_t$ ,此时  $H_t = h + 0.5 h_t$ 。

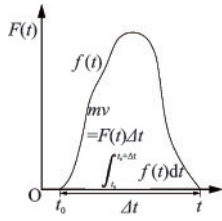


图4 碰撞冲量模型<sup>[40]</sup>

Fig.4 Impact impulse model<sup>[40]</sup>

虽然滚石自由落体与坡面的碰撞属于斜碰问题,但是在坡面法线方向,仍然可以按正向碰撞问题求解,引入日本道路公团提出的自由落体、正碰条件下的滚石最大冲击力<sup>[41]</sup>公式(式(3)):

$$P_{\max} = 2.108M^{\frac{2}{3}}\lambda^{\frac{2}{5}}H^{\frac{3}{5}} \quad (3)$$

式中, $H$ 为滚石自由下落高度(m); $P_{\max}$ 为最大冲击力(kN); $M$ 为质量(t); $\lambda$ 为拉梅系数,建议取值为  $1\ 000\ \text{kN}/\text{m}^2$ 。

由式(3)可得图3模型中滚石法向最大冲击力计算公式为:

$$P_{\text{max}} = 2.108M^{\frac{2}{3}}\lambda^{\frac{2}{5}}H_t^{\frac{3}{5}} \quad (4)$$

因此,滚石受碰撞面上支撑作用所做的功为:

$$W_{\text{nc}} = P_{\text{max}}(h_1 - h_2) \quad (5)$$

式中, $h_1$ 为松散层的初始厚度; $h_2$ 为松散层压密后的厚度。

由于表层松散,所以不考虑黏聚力,摩擦作用所做的功为:

$$W_{\text{nf}} = Gh_1 \sin \theta \tan \varphi \quad (6)$$

式中, $G$ 为滚石重力; $\varphi$ 为松散堆积层内摩擦角。

在松散层压密过程中,由动能守恒定律可得:

$$\frac{1}{2}MV_{\text{in}}^2 - \frac{1}{2}MV_{\text{n}}^2 = G \cos \theta h_1 - W_{\text{nc}} - W_{\text{nf}} \quad (7)$$

式中, $V_{\text{in}}$ 为滚石将松散层压密后的法向速度。

### 2.1.3 滚石回弹阶段

当松散层(图3)被滚石压密后,依据前述假定条件,此时可将整个松散层看作理想弹塑性体。可引入C.Thornton<sup>[10]</sup>提出的滚石在理想弹塑性面上的碰撞恢复系数计算公式:

$$e_n' = \left\{ \frac{6\sqrt{3}}{5} \left[ 1 - \frac{1}{6} \left( \frac{V_y}{V_{\text{in}}} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \cdot \left\{ \frac{V_y}{V_{\text{in}}} \left[ \frac{V_y}{V_{\text{in}}} + 2 \sqrt{1.2 - 0.2 \left( \frac{V_y}{V_{\text{in}}} \right)^2} \right]^{-1} \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (8)$$

式中, $e_n'$ 为理想弹塑性面上滚石法向碰撞恢复系数; $V_y$ 为坡面土体初始屈服法向冲击速度。

将何思明等<sup>[11]</sup>提出的坡面土体初始屈服法向冲击速度公式(9)代入(8)式中可求出  $e_n'$ 。

$$V_y = 18.1 \frac{R^{\frac{3}{2}}}{E^2 m^{\frac{1}{2}}} \left( \frac{2c \cos \varphi}{C_{v1} - C_{v2} \sin \varphi} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (9)$$

其中:

$$C_{v1} = \frac{3}{2} (1 + \xi^2)^{-1} - (1 + \mu_1) (1 - \xi \tan^{-1} \xi)$$

$$C_{v2} = \frac{1}{2} (1 + \xi^2)^{-1} + (1 + \mu_1) (1 - \xi \tan^{-1} \xi)$$

$$\xi = 0.0475 + (1 + \mu_1) \left( \frac{1 - \sin \varphi}{3 + \sin \varphi} \right)$$

式中, $R$ 为等效半径, $R = 1/R_1 + 1/R_2$ , $R_1$ 、 $R_2$ 分别为两个球体的半径(其中一个球体是滚石,另一个是坡面,其可以看成是一个平面,质量为无限大的球体); $E$ 为等效弹性模量,可通过等式  $1/E = (1 - \mu_1^2)/E_1 + (1 - \mu_2^2)/E_2$  求得, $E_1$ 、 $E_2$ 、 $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 分别为两个接触球体各自的弹性模量和泊松比; $m$ 为等效质量, $1/m = 1/m_1 + 1/m_2$ ;  $c$ 、 $\varphi$ 分别坡面岩土体的黏聚力和内摩擦角;其余符号意义同前。

由法向碰撞恢复系数的定义可得滚石碰撞理想弹塑性面后的速度  $V_{\text{in}}'$ :

$$V_{\text{in}}' = e_n' V_{\text{in}} \quad (10)$$

滚石在理想弹塑性面上碰撞后回弹,在离开松散层时,同样会受到摩擦力的作用,根据动能守恒定律有:

$$\frac{1}{2}MV_{2n}^2 - \frac{1}{2}M(V_{\text{in}}')^2 = W_{\text{nc}} - W_{\text{nf}} \quad (11)$$

式中, $V_{2n}$ 为滚石碰撞坡面后回弹的法向速度。

为便于理论推导计算,由滚石碰撞恢复系数Newton定义式(12),联立式(2)、(7)~(11),化简后可得松散层上的滚石法向碰撞恢复系数(式13):

$$e = \frac{V_2}{V_1} \quad (12)$$

式中, $e$ 为滚石碰撞恢复系数; $V_1$ 为碰撞坡面前的滚石速度,即刚与坡面接触时的速度; $V_2$ 为滚石碰撞坡面后再回弹的速度。

$$e_n = \frac{V_{2n}}{V_n} = \sqrt{\left( \phi \left( 1 + \frac{(h_1 - h_2)(1 - \tan \theta)}{H_t \cos \theta} - \frac{W_{\text{nc}}}{MgH_t \cos^2 \theta} \right) + \frac{(h_1 - h_2)(1 - \tan \theta \tan \varphi)}{H_t \cos \theta} \right)} \quad (13)$$

其中:

$$\psi = \frac{\sqrt{3}}{5} \left( 6 - \frac{MV_y^2}{K} \right) \sqrt{1 + 2 \sqrt{\frac{1.2}{V_y}} - 0.2}$$

$K = 2Mg(H_1 \cos \theta + (h_1 - h_2)(\cos \theta - \sin \theta)) - 2W_{nc}$   
式中,符号意义同前。

## 2.2 碰撞回弹临界条件

由于西藏的散粒体斜坡松散层较厚且孔隙度大,如果滚石在压密松散层时耗尽了能量,将不再发生回弹,滚石不再运动。对于松散层,设其初始状态时孔隙率为 $n_1$ ,压实状态时孔隙率为 $n_2$ ,压缩过程其实就是孔隙率改变的过程。根据孔隙率的计算公式(14),将 $n_1, n_2, h_i$ 代入有(式(15)):

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (14)$$

式中, $V_v$ 为孔隙体积; $V$ 为总体积。

$$h_i = \frac{V}{S}(n_1 - n_2) \quad (15)$$

式中, $S$ 为松散层压密区截面面积。

所以,当滚石对散粒体斜坡松散层的最终压密厚度 $h_y < h_i$ 时,滚石便不会回弹,即:

$$h_y < \frac{V}{S}(n_1 - n_2) \quad (16)$$

## 3 法向碰撞恢复系数影响因素分析

分别选取滚石下落高度、滚石形状、松散层厚度、斜坡坡度、滚石大小为变量,利用Abaqus软件模拟分析了各工况下碰撞恢复系数的变化规律,并与上文修正的法向碰撞恢复系数公式以及何思明等<sup>[14]</sup>公式(为便于表述,后文用“文献[14]计算法”表示)计算结果进行对比。

### 3.1 算例概况

川藏交通廊道察达隧道进口斜坡位于瓦塘村管辖区,距瓦塘村1~2 km,为典型松散体斜坡,坡面为松散层(图5),坡度 $25^\circ \sim 30^\circ$ 。斜坡基岩为中生代白垩系( $\gamma\delta K$ )中-厚层灰白色花岗闪长岩,较坚硬,表层长期风化作用呈现出暗红色,卸荷作用强烈,发育多组交错的节理裂隙。斜坡上覆盖有第四系全新世崩坡积地层( $Q_4^{col+dl}$ ),可分为两层:上层松散,厚度约0.2 m,下层密实、潮湿。现场调查发现山体上部发育危岩体,如图5所示。

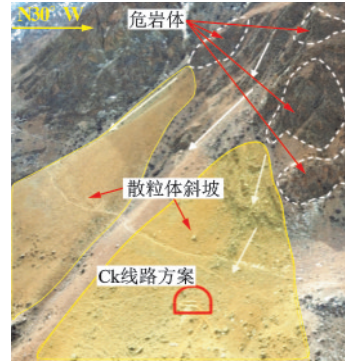


图5 察达隧道进口斜坡

Fig.5 Entrance slope of the Chada tunnel

## 3.2 数值计算模型及工况设置

### 3.2.1 数值计算模型

基本模型从上至下由滚石、松散层、密实层3部分组成(图6),其中松散层厚度与康玉曲察达隧道进口斜坡厚度一致为0.2 m,密实层厚度为0.15 m;斜坡边长设置为1.5 m,坡度设置为 $30^\circ$ ;由于滚石与坡面尺寸存在较大差别,因此从简化计算的角度出发,将坡面看成半无限平面。滚石为弹性坚硬岩石,堆积层采用摩尔-库伦本构模型。材料参数见表1。

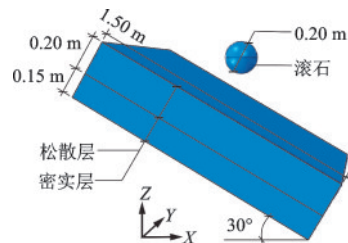


图6 基本模型

Fig.6 Basic model

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料名称	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ Pa	泊松比	内摩擦角/ ( $^\circ$ )
滚石	2 400	5e10	0.24	—
松散层	1 800	4.8e8	0.31	35
密实层	2 100	4.9e8	0.28	35

网格划分时,将坡体的松散、密实层划分为六面体网格,而滚石则划分为四面体网格,如图7所示。接触设置时,在滚石表面(主面)与松散层表面(从面)之间设置接触对。同时为了便于计算分析,在设置边界条件时,将松散层模型表面设置为自

由,其余各边界均为固定。

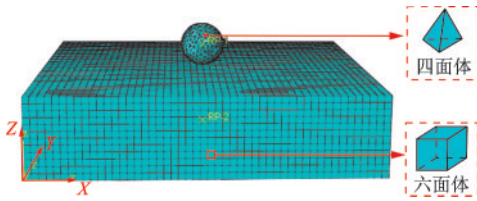


图7 基本模型网格划分

Fig.7 Mesh generation of the basic model

### 3.2.2 工况设置

依据察达隧道进口区域植被稀少,斜坡上覆松散

堆积层等条件,以图7所示模型为基础,选取表2的5种影响因素,以控制变量法设置工况进行数值模拟试验。

由于建模时松散层坡度不同导致计算初始状态不同,因滚石不宜紧贴松散层,因此为了控制试验的初始状态,遂将滚石的几何中心不宜与碰撞点重合,本文中两者距离统一设置为0.3 m,并施加初始速度来模拟滚石从高处下落的效果。在研究滚石形状时,将不规则的滚石分为立方体和棱柱体两种,模拟滚石下落时分别以平面、棱与坡体松散层发生碰撞。

表2 模拟工况

Table 2 Simulated conditions

工况	一	二	三	四	五
控制变量	下落高度/m	滚石形状	松散层厚度/m	斜坡坡度/(°)	滚石直径/m
变量值	20	球体	0.05	0	0.05
	25	立方体	0.10	15	0.10
	30	棱柱体	0.15	30	0.15
	35	—	0.20	45	0.20
	40	—	0.25	60	—
	—	—	0.30	—	—

注:工况五为球体滚石直径

### 3.3 对比验证及影响因素分析

在滚石下落高度不同时,本文计算方法得到的法向碰撞恢复系数值比较接近数值模拟结果(图8),而数值模拟试验值在0.40~0.65间波动且存在下降趋势;本文计算方法与文献[14]计算法结果趋势一致,法向碰撞恢复系数随下落高度的增加逐渐减小,且小于其计算结果。

不同滚石形状下,本文计算方法和文献[14]算法计算结果恒定不变(图9),这与公式中没有相应的滚石形状变量有关。数值模拟试验结果表明,立方体、球体、棱柱体滚石法向碰撞恢复系数依次增大,棱柱体能量损耗小。总体上,本文计算方法结果与数值模拟试验结果更接近。

不同松散层厚度下本文计算方法滚石法向碰撞恢复系数值小于文献[14]算法计算结果(图

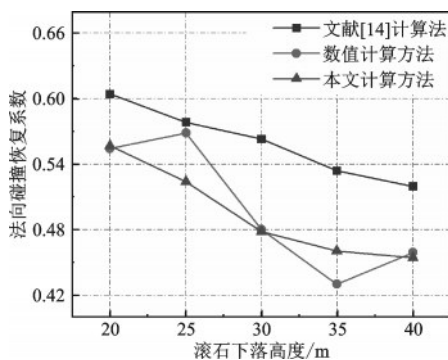


图8 不同下落高度滚石法向碰撞恢复系数

Fig.8 Normal restitution coefficient of rockfall impact with different falling heights

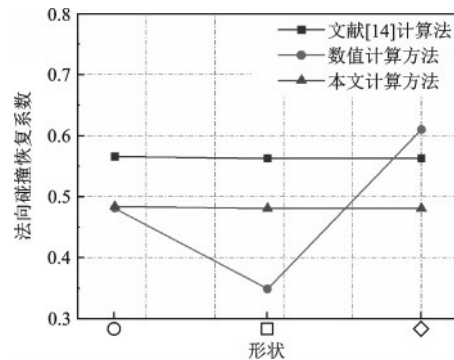


图9 不同形状滚石法向碰撞恢复系数

Fig.9 Normal restitution coefficient of rockfall impact with different shapes

10), 趋势与数值模拟的相吻合, 均随松散层厚度增大而减小, 松散层消能作用明显。数值模拟试验结果下降较本文计算方法快, 趋势上两种计算结果更吻合。而文献[14]计算法中因未考虑松散土层厚度影响, 故其计算结果恒定。

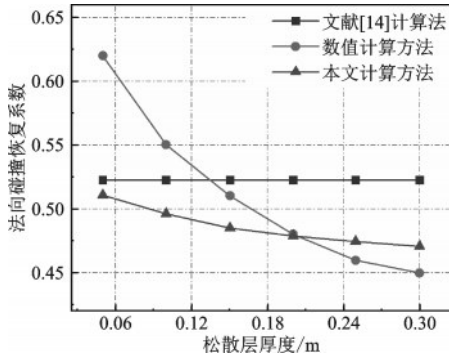


图10 不同松散层厚度滚石法向碰撞恢复系数

Fig.10 Normal restitution coefficient of rockfall impact with different loose layer thickness

不同斜坡坡度下, 本文计算方法法向碰撞恢复系数值小于文献[14]计算法、以及数值模拟的计算结果(图11), 数值模拟试验结果介于前两种方法计算结果之间, 即系数在0.46~0.54间跳动, 整体呈上升趋势, 表明随着斜坡坡度的增加, 滚石更容易回弹。

不同滚石直径下, 本文计算方法和文献[14]计算法的计算结果均为固定值(图12), 数值模拟试验结果在0.4~0.5波动。

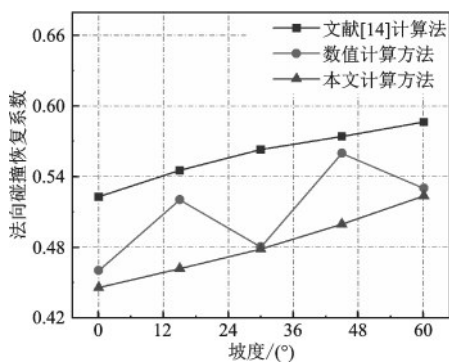


图11 不同坡度滚石碰撞法向恢复系数

Fig.11 Normal restitution coefficient of rockfall impact with different slopes

综上, 本文计算方法对松散层厚度变化更敏感, 与文献[14]计算法存在差别。在松散层厚度变化时, 本文计算方法结果随变量值增加而减小, 与数值模拟结果保持一致趋势, 这主要归结于文[14]

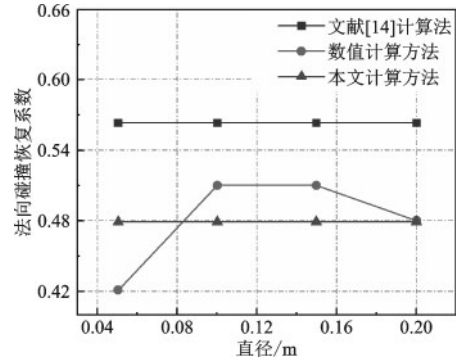


图12 不同直径滚石碰撞恢复系数对比

Fig.12 Normal restitution coefficient of rockfall impact with different diameters

计算法未考虑到坡体松散层压密耗能的影响, 因此不能体现松散层的耗能作用。除此之外, 本文计算方法考虑松散层受冲击的压密特征后, 本文计算方法的得到的滚石碰撞恢复系数水平均低于文[14]计算法的。

同时, 通过分析碰撞后松散层的等效应力(图13)可知, 碰撞使得等效应力以碰撞点为中心向四周扩散, 并且呈左右对称状分布, 在碰撞中心外一定范围内形似上下镜像的两个“八”字(图13), 受斜

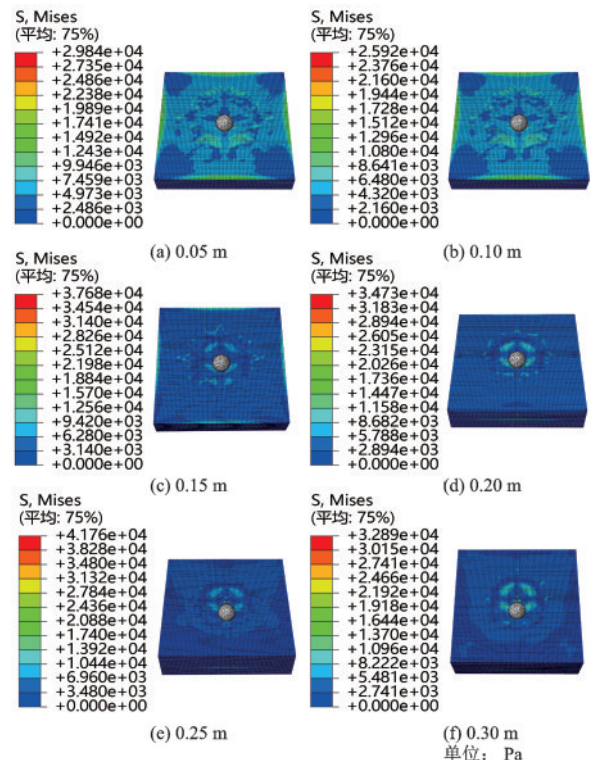


图13 不同厚度松散层滚石碰撞等效应力

Fig.13 Equivalent stresses of rockfall impact on loose layers with different thickness

坡自身坡度和不同厚度松散层支撑作用影响,上下非对称分布,不过在松散层厚度为0.05、0.10、0.15、0.20 m(图13(a)、(d))时有对称分布趋势,笔者分析松散层比较薄时,滚石的碰撞相当于“敲击”一下坡面,碰撞时间较短,耗能作用不明显,所以等效力扩散范围大,这好比水滴滴在平静湖面激起水波;松散层较厚时,碰撞就好比小石头沉入了水中,相比前者花费的碰撞时间长,耗能作用明显,故无大范围水波。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

考虑到滚石碰撞散粒体斜坡问题的复杂性,对其进行适当简化后,得到的滚石法向碰撞恢复系数改进公式适用于如下情况:(1)滚石刚度远大于斜坡散粒体刚度,可近似看作刚体;(2)由于计算中考虑质能守恒,滚石在碰撞压密土层过程中,土颗粒无明显飞溅;(3)计算中需满足弹塑性理论,土体可近似看作均匀材料,密实层为各向同性弹塑性体,松散层与密实层同种土体,孔隙率不同。

应用文中改进公式计算的滚石法向碰撞恢复系数与模拟结果较为吻合,普遍小于已有相关公式计算结果,意味着滚石碰撞后能量耗散考虑得更大,尤其是不同松散层厚度工况时。对于散粒体结构,粒间孔隙的填充也需要能量驱动,因此计算公式考虑这部分能量耗散亦是力求毗邻实际,而相比计算公式,数值模拟简化少,能反映实际情况中的一些规律特性,比如本文中滚石碰撞坡面等效力分布趋势:松散层越厚,等效力扩散范围越小,现实生活中亦是如此,越厚越松散材料,压密空间越大,力的传播范围就越小,依据动能守恒定律,碰撞前后速度差越大。对于滚石碰撞散粒体斜坡问题,在未来需要关注的重点是如何定量评估某散粒体斜坡的耗能潜力,如何最大化的利用散粒体的耗能潜力,这也是使工程防护结构经济化的一项举措。

### 4.2 结论

通过考虑松散介质的孔隙压密特征,改进了滚石法向碰撞恢复系数的计算式,并以实际斜坡为算例进行数值模拟,分析了5种影响因素下滚石法向碰撞恢复系数变化规律,并与改进公式、现有相关公式计算结果进行对比,所得结论如下:

(1)将滚石与散粒体斜坡的碰撞分为自由落体、松散层压密、碰撞回弹阶段。基于运动、动力学理论,推导出考虑斜坡松散层孔隙压密特征的滚石法向碰撞恢复系数计算公式,并将新公式计算结果与数值模拟结果对比,趋势一致,结果较为吻合。

(2)散粒体斜坡松散层厚度为变量时,本文计算方法得出的滚石法向碰撞恢复系数值小于文[14]算法,结果随厚度增大而减小,表明滚石法向碰撞恢复系数对厚度变化敏感,且结合松散层等效力分析可知随松散层厚度增加耗能效果明显。其他变量下,本文计算方法的得到的滚石碰撞恢复系数水平均低于文献[14]算法的。

(3)建议采取防护措施时,适当考虑散粒体斜坡自身的耗能缓冲潜力。

## 参考文献:

- [1] Brake M R. An analytical elastic plastic contact model with strain hardening and frictional effects for normal and oblique impacts[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2015,62:104-123.
- [2] Ma J L, Liu D Y, Chen X P. Normal and oblique impacts between smooth spheres and liquid layers: Liquid bridge and restitution coefficient[J]. *Powder Technology*, 2016,301: 747-759.
- [3] Li X, Dong M, Jiang D Y, et al. The effect of surface roughness on normal restitution coefficient, adhesion force and friction coefficient of the particle-wall collision [J]. *Powder Technology*, 2020,362:17-25.
- [4] Nietiadi M L, Rosandi Y, Urbassek H M. Collisions between ice-covered silica grains: An atomistic study [J]. *Icarus*, 2020,352:113996.
- [5] 鲍四元,邓子辰. 利用DMSM方法求解弹性撞击恢复系数[J]. *动力学与控制学报*, 2005,3(4):44-49.  
Bao S Y, Deng Z C. Solution of the coefficient of restitution for elastic impact using DMSM[J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2005,3(4): 44-49. (in Chinese)
- [6] Johnson W. *Impact strength of material*[M]. London: Edward Arnold Limited, 1972.
- [7] Stronge W J. *Impact mechanics*[M]. London: Cambridge University Press, 2004.
- [8] Hertz H. Über die Berührung fester elastischer Körper [J]. *Journal Für die Reine und Angewandte Mathematik*, 1881,92: 156-171.
- [9] Johnson K L. *Contact mechanics*[M]. London: Cambridge University Press, 1985.
- [10] Thornton C. Coefficient of restitution for collinear colli-

- sions of elastic-perfectly plastic spheres [J]. *Journal of applied mechanics*, 1997, 64(2): 383-386.
- [11] 何思明,李新坡,吴永. 滚石冲击荷载作用下土体屈服特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(增1): 2973-2977.  
He S M, Li X P, Wu Y. Research on yield property of soil under rock-fall impact [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27 (Sup1): 2973-2977. (in Chinese)
- [12] 何思明,吴永,杨雪莲. 滚石坡面冲击回弹规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(增1): 2793-2798.  
He S M, Wu Y, Yang X L. Study of rock-fall motion on slope [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27 (Sup1): 2793-2798. (in Chinese)
- [13] 何思明,吴永,李新坡. 颗粒弹塑性碰撞理论模型[J]. *工程力学*, 2008, 25(12): 19-24.  
He S M, Wu Y, Li X P. Theoretical model on elastic-plastic granule impact [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(12): 19-24. (in Chinese)
- [14] 何思明,吴永,李新坡. 滚石冲击碰撞恢复系数研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(3): 623-627.  
He S M, Wu Y, Li X P. Research on restitution coefficient of rock fall [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30 (3): 623-627. (in Chinese)
- [15] 杨海清,周小平. 边坡落石运动轨迹计算新方法[J]. *岩土力学*, 2009, 30(11): 3411-3416.  
Yang H Q, Zhou X P. A new approach to calculate trajectory of rockfall [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(11): 3411-3416. (in Chinese)
- [16] 章广成,唐辉明,向欣. 冲击地面过程中落石特征参量的理论分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(增1): 2839-2846.  
Zhang G C, Tang H M, Xiang X. Characteristic parameters theoretical analysis of rockfall impact on ground [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(Sup1): 2839-2846. (in Chinese)
- [17] 柳宇. 滚石坡面运动恢复系数研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.  
Liu Y. The study of the coefficient of restitution of the rolling stones movement on slope [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [18] 梅雪峰,胡卸文,罗刚,等. 基于弹塑性理论的落石碰撞恢复系数和峰值冲击力研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(8): 14-20.  
Mei X F, Hu X W, Luo G, et al. A study on the coefficient of restitution and peak impact of rockfall based on the elastic-plastic theory [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(8): 14-20. (in Chinese)
- [19] 叶四桥,巩尚卿. 落石碰撞法向恢复系数的模型试验研究[J]. *中国铁道科学*, 2015, 36(4): 13-19.  
Ye S Q, Gong S Q. Research on normal restitution coefficient of rockfall collision by model tests [J]. *China Railway Science*, 2015, 36(4): 13-19. (in Chinese)
- [20] 吕庆,周春锋,于洋,等. 滚石坡面碰撞破裂效应的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(增1): 3359-3366.  
Lyu Q, Zhou C F, Yu Y, et al. Experimental study on fragmentation effects of rockfall impact upon slope [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(Sup1): 3359-3366. (in Chinese)
- [21] Cui S H, Pei X J, Huang R Q. Rolling motion behavior of rockfall on gentle slope: an experimental approach [J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14 (8): 115-127.
- [22] 叶阳,曾亚武,曾超,等. 花岗岩球砾法向恢复系数试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(3): 633-643.  
Ye Y, Zeng Y W, Zeng C, et al. Experimental study on the normal restitution coefficient of granite spheres [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(3): 633-643. (in Chinese)
- [23] 叶阳,曾亚武,彭志雄,等. 大理岩球砾法向碰撞恢复系数及损伤破碎试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(7): 1680-1690.  
Ye Y, Zeng Y W, Peng Z X, et al. Experimental study on normal coefficient of restitution and fragmenting of marble spheres [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37 (7): 1680-1690. (in Chinese)
- [24] 胡杰,李术才,石少帅,等. 隧道仰坡落石冲击模型试验研究与机制探讨[J]. *岩土力学*, 2018, 39(7): 2527-2536.  
Hu J, Li S C, Shi S S, et al. Model test study of rockfall impacts on tunnel heading slope and discussion of related mechanisms [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(7): 2527-2536. (in Chinese)
- [25] 杨晴雯,裴向军,吴梦秋,等. 不同加固技术在散粒体斜坡表层的应用对比研究[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(1): 139-147.  
Yang Q W, Pei X J, Wu M Q, et al. Research on the effect of different reinforcement methods on the surface of a granular slope [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(1): 139-147. (in Chinese)
- [26] 裴钻. 高寒山区散粒体斜坡形成演化过程及灾变机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.  
Pei Z. The Evolution and catastrophic mechanism of talus slopes in alpine areas [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016. (in Chinese)

- [27] 张元才,黄润秋,傅荣华,等.溜砂坡大规模失稳动力学机制试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(1):65-72.  
Zhang Y C, Huang R Q, Fu R H, et al. Experimental research on dynamic failure mechanism of large-scale talus slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 65-72. (in Chinese)
- [28] 裴向军,刘洋,王东坡.滚石冲击棚洞砂土垫层耗能缓冲机理研究[J].四川大学学报(工程科学版),2016,48(1):15-22.  
Pei X J, Liu Y, Wang D P. Study on the energy dissipation of sandy soil cushions on the rock-shed under rockfall impact load [J]. Journal of Sichuan university (Engineering Science Edition), 2016, 48(1): 15-22. (in Chinese)
- [29] Zhu C, Wang D, 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.
- [30] 王永东,燕新,彭浩,等.基于Hertz理论和JKR理论的落石冲击力学研究[J].地下空间与工程学报,2019,15(增2):598-603.  
Wang Y D, Yan X, Peng H, et al. Study on rock-fall impact mechanics based on Hertz theory and JKR theory [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(Sup2): 598-603. (in Chinese)
- [31] 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):44-51.  
Zhu D P, Peng T X, Huang L. Experimental study on layering effect of sand layer[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(3): 44-51. (in Chinese)
- [32] 徐胜.落石冲击力计算方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.  
Xu S. Study on the computational method of rockfall impact force[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [33] 王东坡,周良坤,裴向军,等.滚石冲击棚洞砂土垫层物理模型试验及数值模拟研究[J].振动与冲击,2020,39(18):195-202.  
Wang D P, Zhou L K, Pei X J, et al. Experimental and numerical study on rockfall impacts on sand-soil cushions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(18): 195-202. (in Chinese)
- [34] 吴建利,胡卸文,梅雪峰,等.高位落石作用下不同缓冲层与钢筋混凝土板组合结构动力响应[J].水文地质工程地质,2020,47(4):114-122.  
Wu J L, Hu X W, Mei X F, et al. Dynamic response of RC plate with different cushion layers under the high-level rockfall impact [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 114-122. (in Chinese)
- [35] 张连震,李志鹏,张庆松,等.基于土体非线性压密效应的劈裂注浆机制分析[J].岩石力学与工程学报,2016,35(7):1483-1493.  
Zhang L Z, Li Z P, Zhang Q S, et al. Split grouting mechanism based on nonlinear characteristics of compression process of soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1483-1493. (in Chinese)
- [36] 张连震,李志鹏,张庆松,等.砂层压密特性及其对劈裂-压密注浆扩散过程的影响[J].煤炭学报,2020,45(2):667-675.  
Zhang L Z, Li Z P, Zhang Q S, et al. Compaction behavior of sand layer and its effect on diffusion process of fracture-compaction grouting mode [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(2): 667-675. (in Chinese)
- [37] 曹文贵,张超,贺敏,等.考虑空隙压密阶段特征的岩石应变软化统计损伤模拟方法[J].岩土工程学报,2016,38(10):1754-1761.  
Cao W G, Zhang C, He M, et al. Statistical damage simulation method of strain softening deformation process for rocks considering characteristics of void compaction stage [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1754-1761. (in Chinese)
- [38] 阎宗岭.堆石体物理力学特性及其工程应用研究[D].重庆:重庆大学,2003.  
Yan Z L. Research on physical and mechanical characteristics of rockfill and its engineering applications [D]. Chongqing: Chongqing University, 2003. (in Chinese)
- [39] 毛宇祥.拟建线路工程昌都段崩塌发育分布特征及其滚石运动过程研究[D].成都:成都理工大学,2020.  
Mao Y X. Study on development and distribution characteristics of collapse and rockfall movement process in Changdu section of Proposed line project [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [40] Azzoni A, Barbera G L, Zaninetti A. Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1995, 32 (7) : 709-724.
- [41] Kawahara S, Muro T. Effects of dry density and thickness of sandy soil on impact response due to rockfall [J]. Journal of Terramechanics, 2006, 43(3): 329-340.

(本文编辑:苏泽云)