

# 滚石对垫层材料的冲击特性研究

沈均<sup>1,2</sup>, 何思明, 吴永<sup>2</sup>

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都610041; 2. 中国科学院研究生院, 北京100049)

**摘要** 在极限分析上限定理的基础上, 选择合适的机动位移速度场及容许破坏模式, 推导出地基承载力上限解, 然后利用弹塑性力学知识得出了滚石冲击压力以及滚石冲击深度的计算表达式。

**关键词** 滚石; 冲击特性; 垫层材料; 极限分析; 上限定理; 冲击压力; 冲击深度

**中图分类号** X43 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2009)17-8286-03

## Study on the Impact Properties of Rock fall onto Cushion Material

SHEN Jun et al (Key laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610041)

**Abstract** Based on the upper bound limit analysis theorem, upper-bound answers of bearing capacity of circular shallow foundations by suitable choice of a kinematically admissible velocity field and admissible failure mechanisms were derived. By means of mechanical knowledge of elastoplastic, the calculation formulas for calculating the impact depth and impact pressure of rock-fall were deduced.

**Key words** Rockfall; Impact property; Cushion material; Limit analysis; Upper bound theorem; Impact pressure; Impact depth

滚石是我国山区常发生的一种自然灾害, 特别是西部山区随处可见, 其分布范围极广, 发生突然, 频率高, 对其危害范围内的各种构筑物、人类活动构成了严重的威胁<sup>[1-3]</sup>。因此, 笔者利用极限分析中的机动法, 构建圆形基础地基承载力机动许可破坏模式, 建立了滚石冲击深度及滚石冲击压力的计算表达式, 并通过算例验证了计算模型较合理, 这对保证我国生命线工程具有重要的科学意义与现实意义。

### 1 基本假设

进行滚石对垫层材料冲击力计算之前, 先作相关假设: 滚石简化为刚性球形, 质量均匀分布; 垫层土体为理想弹塑性体; 滚石的刚度比垫层土体刚度大得多, 可以近似假设滚石为刚体; 垫层土体满足莫尔-库仑破坏准则。因此, 滚石冲击可以简化为刚性球体压入一个弹性半空间的力学问题。假设球体半径为  $R$ , 与半空间上一个半径为  $a$  的圆形相接触, 其简化模型见图1。

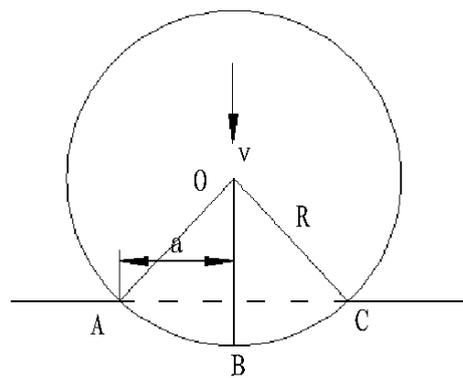


图1 滚石冲击简化模型

Fig.1 Simplified model of rockfall impact

### 2 滚石冲击计算

**2.1 滚石冲击计算模型** 冲击接触速度对滚石压入深度影响较大, 而冲击速度主要依赖于滚石下落高度。设冲击瞬间的动能为  $E_i$ , 压入土体之后在土体阻力作用下, 滚石将嵌入土体之中, 设阻力做功  $E_f$ , 忽略压入过程中其他能量耗散, 则:

$$E_i = E_f \quad (1)$$

假设滚石质量为  $m$ , 下落高度  $h_i$ , 根据动能定理:

$$E_i = mgh_i \quad (2)$$

设滚石压入过程中阻力所做功  $E_f$  为阻力  $f$  及压入量  $s$  的函数, 则

$$E_f = f_1(f, s) \quad (3)$$

而阻力  $f$  为  $s$  的函数:

$$f = f_2(s) \quad (4)$$

研究表明: 滚石的冲击速度大于塑性极限冲击速度之后, 就会在垫层材料上产生塑性变形区。而实际滚石的冲击速度远远超过临塑冲击速度, 势必在接触面上形成大范围的塑性区。根据塑性力学知识可得:

$$E_f = \int_0^s \int_0^{2\pi} \int_0^a p^u r dr d\theta ds \quad (5)$$

式中,  $p^u$  为垫层材料的极限承载力, 其他符号意义同前。

根据国内外相关资料<sup>[4]</sup>可知, 滚石冲击土体或其他物体时, 均可看成准静态过程。滚石冲击土体之后, 随着滚石压入深度  $s$  的增加, 垫层材料将向滚石两侧挤出, 类似于地基基础两侧土体的变形破坏, 为此, 笔者建立圆形基础, 采用极限分析的上限定理计算圆形基础的地基承载力。

**2.2 极限分析上限定理** 极限分析法建立在虚功率原理的基础上, 虚功率原理可叙述为: 任何一组与静力许可应力场  $\sigma_{ij}^0$  平衡的外荷载  $F_i$  与  $p_i^0$ , 对任何机动许可的速度场  $v_i^*$  所作的虚外功功率等于静力场  $\sigma_{ij}^0$  对虚应变  $\dot{\epsilon}_{ij}$  所作的虚内功功率。即:

$$\int_V F_i v_i^* dV + \int_S p_i^0 v_i^* dS = \int_V \sigma_{ij}^0 \dot{\epsilon}_{ij} dV \quad (6)$$

在虚功率原理的基础上, 可推导出上限定理为: 在所有与运动许可的位移速度场和应变率场相对应的荷载中, 极限荷载最小, 或者可以理解为: 按运动许可的速度场与应变率场求得的极限荷载  $P_u^+$  都大于真正的极限荷载  $P_u^{[5]}$ 。

### 2.3 极限承载力计算

**2.3.1 破坏机制。** 从上述定理出发, 根据松散体极限平衡理论, 建立半径为  $a$ , 埋深为  $z$  的圆形浅基础, 建立如图2所示破坏机制:

**2.3.2 极限承载力计算。** 根据外力功与内能耗散相等, 利

基金项目 国家自然科学基金项目(40872181); 交通部西部科技项目(2006-318-792-85); 国道317线西藏段公路边坡病害超前诊断及处治技术研究。

作者简介 沈均(1981-), 男, 四川广元人, 硕士研究生, 研究方向: 山地灾害防治。

收稿日期 2009-03-05

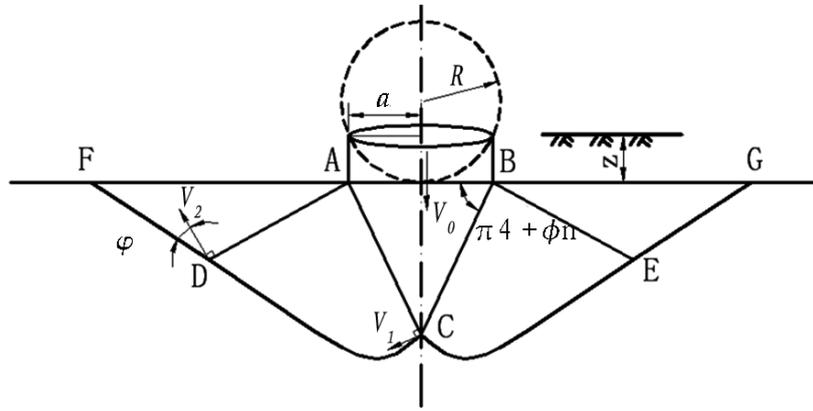


图2 地基破坏机制

Fig 2 Failure mechanism of foundation

用虚功率原理, 引用文献[6-8]得到圆形基础极限承载力: 内部耗能相等, 建立极限承载力  $p^u$  表达式:

$$p^u = \frac{c \cdot \cos \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)}{2 \cos^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)} + \frac{2c \left[ \frac{1}{3} e^{\frac{3}{2} \tan \phi} - \frac{1}{2} e^{\tan \phi} + \frac{1}{6} \right]}{\sin \phi \tan \phi \sin^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)} + 2 \cdot \frac{2e^{\frac{3}{2} \tan \phi} \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) + e^{\tan \phi}}{\cos \phi} - \frac{e^{\frac{3}{2} \tan \phi}}{2(1 - \sin \phi)} + 2q_r \frac{e^{\tan \phi}}{\tan^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)} + \frac{e^{2 \tan \phi}}{\tan \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)} \cdot e^{2 \tan \phi} \quad (7)$$

式中:  $c$  为土体黏聚力,  $\phi$  为土体内摩擦角。对于砂土  $c$  为零, 其破坏区在  $90^\circ$  范围内, 则上限解可简化为

$$p^u = 2q_r \frac{e^{\tan \phi}}{\tan^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)} + \frac{e^{2 \tan \phi}}{\tan \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)} \cdot e^{2 \tan \phi} \quad (8)$$

**2.3.3 滚石冲击深度及冲击压力计算。** 根据变形几何关系, 滚石压入量  $d$  与接触半径  $a$  应满足如下关系:

(1) 当  $a < R$  时:  $a^2 = (2R - d) \cdot d$ ,  $z = d$ ; 由(2)、(3)、(6)、(9)式联立并结合塑性力学知识得:

$$mgh = \int_0^d a^2 p^u d \quad (9)$$

$$P = (2R - d)^2 \cdot p^u \quad (10)$$

解(9)、(10)两式即可得到滚石冲击深度  $d$  和滚石冲击压力  $P$ 。

(2) 当  $a \geq R$  时:  $a = R = z$ ; 由(1)、(2)、(5)、(8)式联立并结合塑性力学知识得:

$$mgh = \int_0^R a^2 p^u d + \int_R^d R^2 \cdot p^u d \quad (11)$$

$$P = R^2 \cdot p^u \quad (12)$$

解(11)、(12)两式即可得到滚石冲击深度  $d$  和滚石冲击压力  $P$ 。

### 3 对比计算与参数敏感性分析

**3.1 对比计算** 设有一半径为  $0.5 \text{ m}$  的滚石从  $5 \text{ m}$  高垂直冲击某砂土垫层, 采用滚石冲击压入深度以及冲击压力, 相关计算参数为: 砂砾石垫层的容重为  $19.5 \text{ kN m}^{-3}$ , 粘聚力为  $0 \text{ kPa}$ , 内摩擦角为  $30^\circ$ ; 滚石的半径为  $0.5 \text{ m}$ , 容重为  $25 \text{ kN m}^{-3}$ , 下落高度为  $5 \text{ m}$ 。

计算结果表明: 当滚石从  $5 \text{ m}$  高度处自由落下, 滚石冲击压入量为  $0.337 \text{ m}$ ; 当滚石从  $13.698 \text{ m}$  高度处自由落下, 滚石冲击压入量达到滚石半径, 此时, 滚石与砂垫层接触半径达到最大值: 滚石半径  $0.5 \text{ m}$ , 对应的滚石冲击极限压力为:  $P = 860.67 \text{ kN}$ , 而按照日本公路协会计算冲击压力为:  $892.26$

$\text{kN}$ ; 计算结果与日本公路协会推荐公式计算结果对比情况见图3。

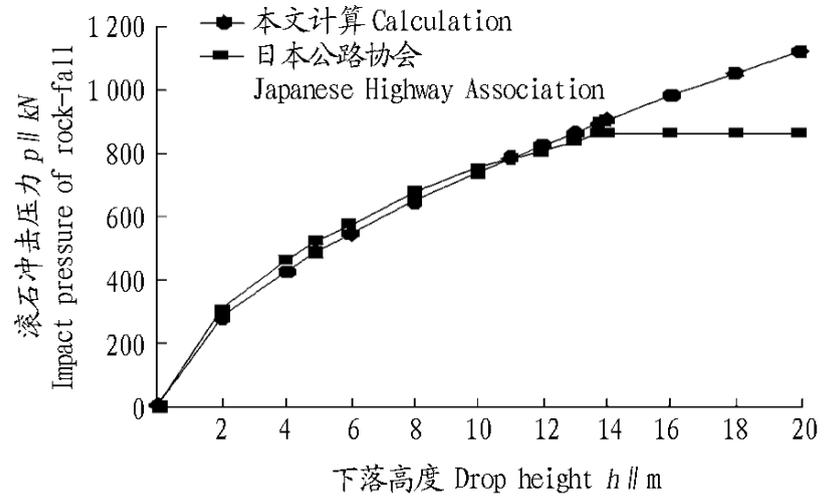


图3 计算结果对比

Fig 3 Comparison of calculation results

计算公式为<sup>[9]</sup>:

$$P = 2.108 (mg)^{\frac{2}{3}} \frac{2}{5} H^{\frac{3}{5}} \quad (13)$$

式中:  $P$  为滚石冲击力( $\text{kN}$ );  $m$  为滚石质量( $\text{t}$ );  $g$  为重力加速度;  $k$  为拉梅常数, 一般为  $1000 \text{ kN m}^{-2}$ , 而实际取值在  $1000 \sim 10000 \text{ kN m}^{-2}$ ;  $H$  为滚石下落高度( $\text{m}$ )。

上式是基于 Hertz 接触理论获得的冲击力计算公式, 完全没有考虑滚石冲击过程中砂垫层的弹塑性变形特性。因而计算误差较大, 主要表现为过高地估算了冲击力, 造成防护结构的浪费。

同日本公路协会推荐公式计算所得结果比较, 在达到极限冲击高度之前, 笔者计算结果与推荐公式计算结果符合较好, 而之后偏离较大, 这说明垫层材料的弹塑性特性对滚石冲击力计算有重大影响, 不考虑垫层材料的弹塑性特性, 过高地估算了冲击力, 造成防护结构不必要的浪费, 也进而说明了计算的合理性。

### 3.2 参数敏感性分析

**3.2.1 垫层材料内摩擦角对滚石冲击特性的影响。** 令  $c = 0$ ,  $k = 19.5 \text{ kN m}^{-3}$ ,  $R = 0.5 \text{ m}$ , 取  $30^\circ, 33^\circ, 36^\circ$  时, 计算结果如图4.5所示。

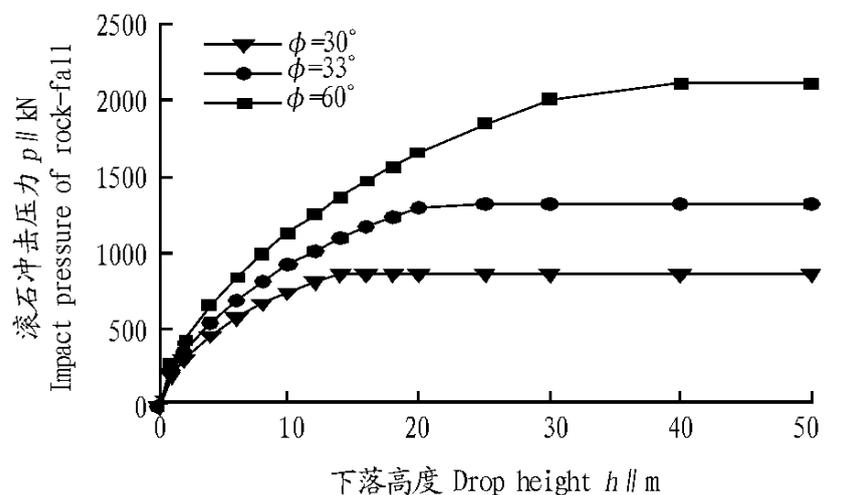


图4 滚石冲击压力与垫层材料内摩擦角关系

Fig 4 Relationship between the impact pressure of rock-fall and internal friction angle of cushion material

图4.5为滚垫层材料内摩擦角与滚石冲击压力及冲击深度之间的关系曲线, 从计算结果看: 相同冲击高度情形下, 垫层材料强度指标越低, 则冲击深度越深, 冲击压力越小。反之, 垫层材料强度越高, 欲达到极限压力时所对应的冲击高度也相应提高, 而且影响很明显。

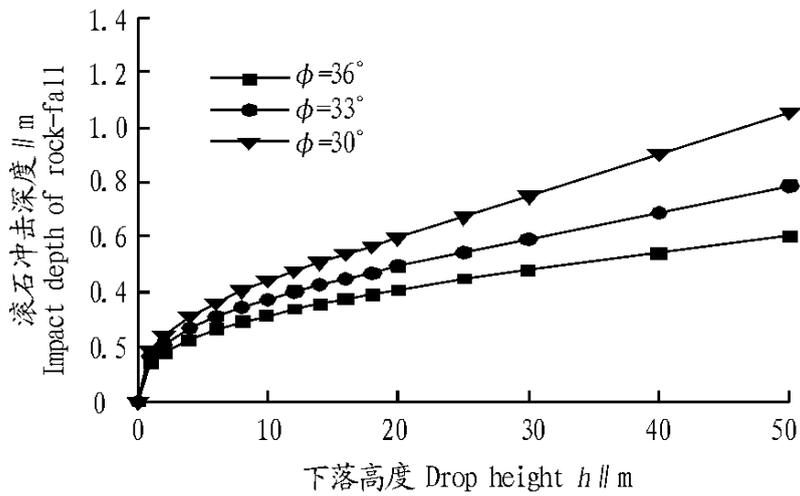


图5 滚石冲击深度与垫层材料内摩擦角关系

Fig.5 Relationship between the impact depth of rockfall and internal friction angle of cushion material

3.2.2 垫层材料重度 对滚石冲击特性的影响。令  $c=0$ ,  $R=0.5\text{ m}$ ,  $\phi=30^\circ$ , 分别取  $18, 22, 25\text{ kN/m}^3$  计算结果如图 6、7 所示:

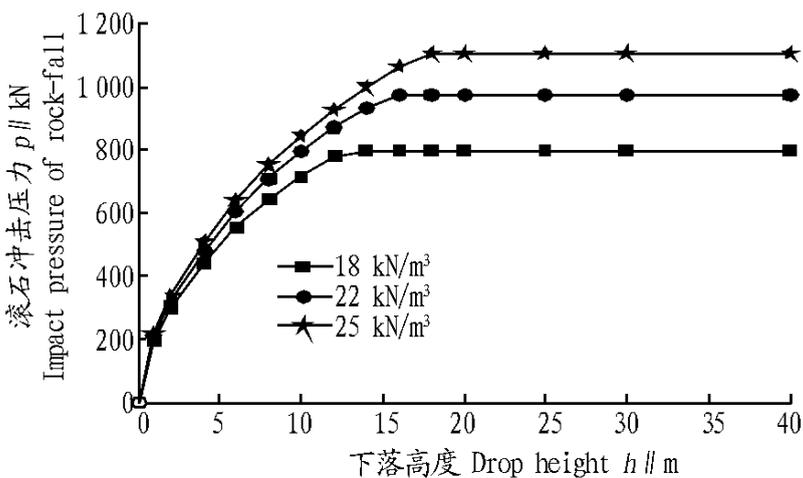


图6 滚石冲击压力与垫层材料重度关系

Fig.6 Relationship between the impact pressure of rockfall and weight of cushion material

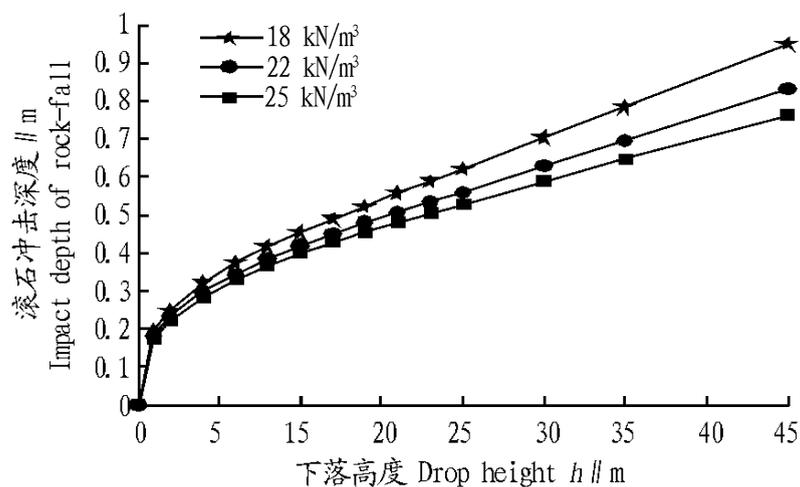


图7 滚石冲击深度与垫层材料重度关系

Fig.7 Relationship between the impact depth of rockfall and weight of cushion material

图6、7 为垫层材料重度与滚石冲击压力及冲击深度之间的关系曲线,从计算结果看:垫层材料重度对滚石冲击特性影响较明显。相同冲击高度情形下,垫层材料容重越低,对应的垫层材料密实度越低,滚石冲击深度越深,冲击压力则越小。

#### 4 结论

根据滚石刚度远高于垫层材料刚度这一事实,将球形压模压入半空间问题简化为圆形基础,在计算圆形基础地基承载力的基础上,利用国内外研究资料以及塑性力学知识研究了滚石冲击压力、冲击深度的计算方法,并得出了以下结论:

(1) 考虑垫层材料弹塑性特性后,在滚石尚未达到极限冲击压力之前,计算结果与日本公路协会推荐计算公式计算的结果吻合较好,当超过极限冲击压力之后,冲击压力将不再增加,随着冲击高度的增加,改变的只是滚石压入深度,这表明该文计算公式提供的计算更加符合实际情况。

(2) 滚石冲击过程中,滚石压入深度随滚石冲击高度增加而增加;随着滚石冲击高度的进一步增加,滚石压入深度随滚石冲击高度呈近似线性关系变化。

(3) 垫层材料的强度指标对滚石冲击压力及冲击深度计算有重大影响,垫层材料内摩擦角越低,对应的极限冲击压力越小,冲击深度越大。

(4) 垫层材料的重度对滚石冲击压力及冲击深度计算有重大影响,垫层材料重度越小,密实度越低,对应的极限冲击压力越小,冲击深度越大。

#### 参考文献

- [1] 张路青,许兵,尚彦军,等.川藏公路南线八宿—林芝段滚石灾害的工程地质调查与评价[J].岩石力学与工程学报,2004,23(9):1551-1557.
- [2] 张路青,杨志法,张英俊.公路沿线遭遇滚石的风险分析——方法研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(8):5543-5548.
- [3] 杨志法,张路青,尚彦军.两个值得关注的工程地质力学问题[J].工程地质学报,2002,10(1):10-14.
- [4] JOHNSON K L. Contact mechanics [M]. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1985.
- [5] CHEN W F. Limit analysis and soil plasticity [M]. Elsevier: ASCE, Science, Amsterdam, 1975.
- [6] BOWLES J E. 基础工程分析与设计 [M]. 唐念慈,译.北京:中国建筑工业出版社,1987.
- [7] 郑大同.地基极限承载力的计算 [M].北京:中国建筑工业出版社,1979.
- [8] 李亮,杨小札.圆形浅基础地基承载力极限分析的上限解析解[J].铁道学报,2001,23(1):94-97.
- [9] 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: 329-340.

(上接第8252页)

- [8] 杨永川,达良俊,陈波.天童米槠-木荷群落主要树种的结构及空间格局[J].生态学报,2006(9):2927-2938.
- [9] 徐锦海,许冬焱.肇庆九龙湖水源涵养林黑桫欏群落特征的研究[J].

安徽农业科学,2008,36(17):7434-7436.

- [10] 王伯荪.植物群落学 [M].北京:高等教育出版社,1987.
- [11] 沈海龙,张群,范少辉,等.次生林群落结构特性对红松幼树生长的影响[J].林业科学研究,2004,17(5):610-615.