

边坡落石运动轨迹计算新方法

杨海清, 周小平

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 考虑落石形状对落石运动轨迹的影响, 将落石近似成椭圆形。根据落石运动的 5 种常见形式, 即自由落体运动、斜抛运动、碰撞、滑动和滚动, 分别得到了各种运动形式的运动速度计算公式。在碰撞阶段考虑了地面的弹塑性变形, 得到了与碰撞前速度、落石形状和地面材料有关的恢复系数计算公式, 并根据接触力学的有关理论得到了碰撞冲击力的计算公式, 给出了落石连续滚动的判别条件。将理论公式应用于重庆万州首立山落石运动轨迹预测, 验证了理论公式的可行性和有效性。

关 键 词: 椭圆形落石; 弹塑性碰撞; 恢复系数; 运动轨迹

中图分类号: TU 454

文献标识码: A

A new approach to calculate trajectory of rockfall

YANG Hai-qing, ZHOU Xiao-ping

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: In order to take the effects of the profile on the trajectory of rockfall into account, the boulder is approximately supposed to be elliptic. According to the five common forms of rockfall, containing rolling, slide, collision, freely falling body movement and parabolic motion, the formulae to calculate the velocity of different kinds of motion are proposed respectively. When the boulder collide with earth, the elastoplastic deformations of earth are considered. Coefficient of restitution, which relates to the velocity before collision, the shape of boulder and geomaterial of earth, is presented. Moreover the impulse force due to collision are obtained on the basis of contact mechanics. Besides, the criterion of continuous rolling is put forward. Finally, an illustrative example is given to show the capability of the presented model to predict the rockfall trajectory of Shoulishan in Wanzhou of Chongqing.

Key words: elliptic boulder; elastoplastic collision; coefficient of restitution; movement trajectory

1 引 言

边坡落石系指: 悬崖或陡坡上个别岩块在自重或外力作用下突然脱离母岩体而急剧地下落的现象。落石是一种突发性的地质灾害, 虽然其规模不如滑坡巨大, 但落石发生往往很突然, 同样能造成巨大的损失。落石运动是一种极其复杂的运动, 影响边坡落石运动轨迹的主要因素有: 边坡的形状、边坡坡面的地质力学性质、落石的大小、形状等^[1-3]。落石本身及地面的条件是多样的, 落石的运动形式也是多种多样的, 要实现落石运动轨迹的精确计算存在很大的困难。现实中落石与边坡坡面碰撞的受力情况具有很大的不确定性, 这使得落石的运动轨迹计算变得非常复杂。国外有文献用概率的方法来

描述模型的输入参数, 对于落石的大小、初始速度矢量这样的参数不是采用确定的值, 而是给出一个概率分布的函数, 用这样的手段来反映这种不确定性^[4-5]。国内对落石运动的分析多采用一些简单经验公式, 如罗依尼维里教授提出的落石运动轨迹预测公式和根据牛顿碰撞理论建立的计算公式^[6-7]。这些公式往往靠一个综合参数来代表多个影响因素, 参数选取颇为困难, 而且这些计算公式大多是将落石近似成圆形, 无法考虑落石形状对落石运动轨迹的影响。

本文基于接触力学和运动学理论, 将落石近似成椭圆形, 提出了落石运动轨迹预测新的计算公式, 将落石运动分为 5 种形式: 自由落体运动、斜抛运动、碰撞、滑动和滚动, 实际中的落石为其中某几

种运动形式的组合。本文的落石碰撞过程采用了接触力学的分析方法,考虑面接触的情况,不仅可以计算碰撞后的速度,而且可以计算碰撞产生的最大冲击力,为工程设防提供了理论依据。

2 落石运动计算

图 1 表示落石的典型运动轨迹,本文将落石运动分为 5 种形式:自由落体运动、斜抛运动、碰撞、滑动和滚动。根据运动学原理分别得到了每一种运动形式的速度计算公式。落石的实际运动轨迹即为这 5 种运动形式的组合。

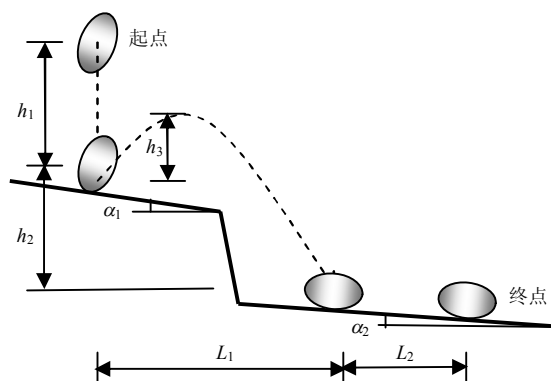


图 1 落石典型运动路径
Fig.1 Typical trajectory of rockfall

2.1 自由落体阶段

当岩块脱离母岩,只在重力作用下自由坠落时,或者在只有一定的初始角速度时,如危岩突然倾倒破坏后坠落。如果忽略空气阻力的作用,角速度在坠落过程中保持不变,则落石的速度为

$$v_1 = \sqrt{2gh_1} \quad (1)$$

式中: h_1 为自由落体的高度; g 为重力加速度。

2.2 碰撞过程

落石与坡面接触碰撞过程是落石运动学计算的重点和难点。本文的碰撞计算以 Hertz 接触力学为基础,假定落石为刚体,碰撞时地面只发生法向变形,切向不发生变形。将碰撞过程分为两个阶段,即压缩阶段和回弹阶段。压缩阶段指落石从与地面接触到压缩地面产生最大的弹塑性变形过程;回弹阶段指地面从最大弹塑性变形位置弹性恢复至残余塑性变形位置的过程。首先定义恢复系数为碰撞后质心的速度与碰撞前质心速度之比,然后将速度沿接触面分解为法向和切向,分别计算恢复系数。

2.2.1 法向恢复系数计算

(1) 法向弹塑性变形

根据 Hertz (1882 年)^[8]弹性碰撞理论,落石与地面发生弹性碰撞时,接触区的应力分布函数 $p(r)$ 和接触区半径 a 分别为

$$p(r) = p_m \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$a = \left(\frac{3FR}{4E} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

$$E = \frac{E^*}{1-\nu^2} \quad (4)$$

$$p_m = \frac{3F}{2\pi a^2} \quad (5)$$

式中: F 为作用在接触区中心的集中荷载,与凹陷深度有关; r 为距接触区中心的距离; R 为落石与地面接触区中心的曲率半径; E^* 和 ν 分别为地面接触区岩土材料的弹性模量和泊松比。

Johnson (1985 年)^[9]提出了接触区中心地面凹陷深度 α 与荷载 F 的关系:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{a^2}{R} = \left(\frac{9F^2}{16RE^2} \right)^{\frac{1}{3}} \\ F &= \frac{4}{3} E \sqrt{R} \alpha^{\frac{3}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

使地面接触处恰好达到塑性的落石临界碰撞速度为 V_y , 接触中心的荷载为 F_y , 此时落石的动能全部转化为地面的弹性应变能为

$$\frac{1}{2} m V_y^2 = \int_0^{\alpha_y} F d\alpha = \frac{8E\alpha_y^5}{15R^2} \quad (7)$$

式中: m 为落石的质量; α_y 为临界半径。

联立式 (2)、(3), 有:

$$\alpha_y = \frac{\pi R p_y}{2E} \quad (8)$$

式中: p_y 为接触面材料屈服应力,可根据试验确定。

将式 (8) 代入式 (7), 有:

$$V_y = \left(\frac{\pi}{2E} \right)^2 \left(\frac{8R^3}{15m} \right)^{\frac{1}{2}} (p_y)^{\frac{5}{2}} \quad (9)$$

根据 Thornton (1998 年)^[10-11]的研究,如图 2 所示,当接触区应力超过屈服点应力后 (AB 段),接触区中心集中荷载 F 与凹陷深度 α_y 有如下线性关系:

$$F = F_y + \pi p_y R(\alpha - \alpha_y) \quad (10)$$

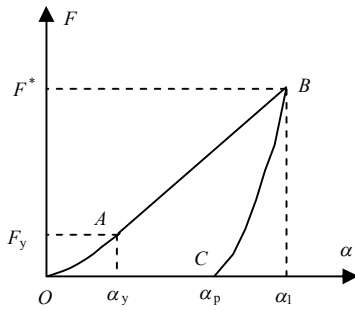


图 2 碰撞过程集中力与凹陷深度的关系

Fig.2 Force-displacement relationship during collision^[9]

该直线延长线与纵坐标轴交点为 F_0 , 超过屈服点的切线刚度为

$$K_N = \pi R p_y = 2E\alpha_y \quad (11)$$

Thornton (1998 年)^[10-11]的研究表明, 在回弹阶段起点由于塑性变形其曲率半径 R_p 要大于弹性接触时的曲率半径 R , 根据接触区长度 a 相等的原则, 定义等效弹性集中力为 F_e , 由式 (3) 得

$$R_p F^* = R F_e \quad (12)$$

$$F_e = \frac{4}{3} E \sqrt{R} \alpha_1^{\frac{3}{2}} \quad (13)$$

式中: F^* 为达到最大凹陷深度时的集中力。

由图 2 中线段 AB , 根据式 (11), 有:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{F^* - F_0}{\pi R p_y} \\ F_0 &= F_y - 2Ea_y \alpha_y \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

将式 (14) 代入式 (3) 和式 (6), 有:

$$F_0 = -\frac{F_y}{2} \quad (15)$$

则有:

$$\alpha_1 = \frac{2F^* + F_y}{2\pi R^* p_y} \quad (16)$$

$$(a^*)^2 = \frac{2F^* + F_y}{2\pi p_y} \quad (17)$$

联立式 (12)、(13)、(17), 得

$$R_p = \frac{4E}{3F^*} \left(\frac{2F^* + F_y}{2\pi p_y} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (18)$$

由等效弹性集中力得到回弹阶段集中力的计算公式为

$$F = \frac{4}{3} E (R_p)^{\frac{1}{2}} (\alpha - \alpha_p)^{\frac{3}{2}} \quad (19)$$

根据式 (19) 可以计算碰撞冲击力。

(2) 恢复系数计算

设落石与地面接触前的速度为 V_i , 回弹完成后离地的速度为 V_r , 可以定义法向恢复系数 e_n ($0 \leq e_n \leq 1$) 为

$$e_n = \frac{V_r}{V_i} \quad (20)$$

当 $V_i \leq V_y$ 时, 地面不发生塑性变形, 法向恢复系数 $e_n = 1$; 当 $V_i > V_y$ 时, 落石离地时的动能等于地面弹性恢复对落石所做的功, 由式 (19) 可得

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m V_r^2 &= \int_{\alpha_p}^{\alpha_1} \frac{4}{3} E (R_p)^{\frac{1}{2}} (\alpha - \alpha_p)^{\frac{3}{2}} d\alpha = \\ &= \frac{2}{5} F^* (\alpha_1 - \alpha_p) \end{aligned} \quad (21)$$

式中: $\alpha_1 - \alpha_p = (a^*)^2 / R_p$ 。

将式 (17)、(18) 代入式 (20), 得

$$\frac{1}{2} m V_r^2 = \frac{3(F^*)^2}{10Ea^*} \quad (22)$$

将式 (22) 代入式 (20), 得

$$e_n^2 = \frac{3(F^*)^2}{5Ea^* m V_i^2} \quad (23)$$

落石在压缩阶段, 动能全部转化为地面的变形能:

$$\frac{1}{2} m V_i^2 = \frac{2}{5} F_y \alpha_y + \frac{1}{2} (F_y + F^*) (\alpha_1 - \alpha_y) \quad (24)$$

根据式 (5)、(6)、(16), 得

$$\frac{1}{2} m V_i^2 = \frac{2}{5} F_y \alpha_y + \frac{(F^*)^2 - F_y^2}{2\pi R p_y} \quad (25)$$

根据式 (7)、(11), 得

$$(F^*)^2 = 2Ea_y \left(m V_i^2 - \frac{1}{6} m V_y^2 \right) \quad (26)$$

将式 (26) 代入式 (23), 再与式 (8) 和式 (17) 联立得

$$e_n^2 = \frac{6\sqrt{3}}{5} \left(\frac{F_y}{2F^* + F_y} \right)^{\frac{1}{2}} \left[1 - \frac{1}{6} \left(\frac{V_y}{V_i} \right)^2 \right] \quad (27)$$

联立式 (6)、(9) 和 (25) 得

$$\frac{F^*}{F_y} = \left[\frac{6}{5} \left(\frac{V_i}{V_y} \right)^2 - \frac{1}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

将式 (28) 代入式 (27) 得到法向恢复系数的表达式^[10-11]:

$$e_n = \left(\frac{6\sqrt{3}}{5} \right)^{\frac{1}{2}} \left[1 - \frac{1}{6} \left(\frac{V_y}{V_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{\frac{V_y}{V_i}}{\frac{V_y}{V_i} + 2\sqrt{\frac{6}{5} - \frac{1}{5} \left(\frac{V_y}{V_i} \right)^2}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (29)$$

2.2.2 切向恢复系数计算

图 3 表示椭圆形落石的 3 种可能碰撞形式, 椭圆形落石的质心坐标为 (n_G, t_G) , 接触点中心坐标为 (n_P, t_P) , $d_n = n_G - n_P$, $d_t = t_G - t_P$, d_n 恒大于 0。定义切向恢复系数为

$$e_t = \frac{V_{t12}}{V_{t1}}, (-1 \leq e_t \leq 1) \quad (30)$$

式中: V_{t1} 为碰撞前的切向速度, V_{t2} 为碰撞后的切向速度。

根据 d_t 的大小可分为以下 2 种情况: ①当 $d_t > 0$ 时, $e_t > 0$ 落石碰撞后要向前运动, 如图 3(a) 所示; ②当 $d_t = 0$ 时, $e_t = 0$ 落石碰撞后沿坡面滑动, 如图 3(b) 所示; ③当 $d_t < 0$ 时, $e_t < 0$ 落石碰撞后向后运动, 如图 3(c) 所示。 e_t 的大小可以根据现场推石试验或者由崩塌遗迹的岩块位置估算, 其确定方法与按牛顿碰撞理论确定切向恢复系数的方法类似, 区别在于要先判断运动方向。根据 Hunger 和胡厚田等^[12]的研究, 考虑瞬间摩擦的作用, 切向速度大小在碰撞过程中损失率约为 10%。

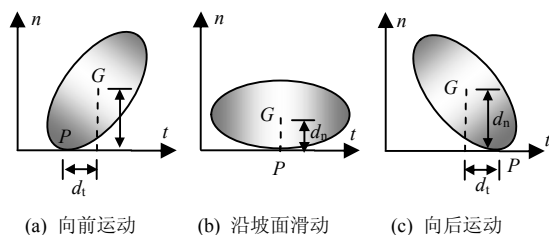


图 3 落石碰撞的 3 种可能形式

Fig.3 Different possibilities for the block at the impact

2.3 斜抛运动阶段

当落石在碰撞后法向恢复系数和切向恢复系数均大于 0 时, 落石将离地做斜抛运动。落石做斜抛运动的危害性极大, 工程设防时常采用阻挡结构物, 因此, 需要确定落石做斜抛运动的弹跳最大高度和最大水平运动距离。

落石做斜抛运动时没有和地面接触, 如果忽略空气阻力的影响, 可以根据能量守恒得到弹跳的最大高度为

$$h_3 = \frac{1}{2g} (V_r \cos \theta_1 - V_{t2} \sin \theta_1)^2 \quad (31)$$

式中: h_3 为弹跳最高点与坡面碰撞点的竖直距离。

如图 1 所示, 最大水平运动距离为

$$L_1 = V_{t2} \left[\frac{V_r}{g} + \sqrt{\frac{2(h_3 + h_2)}{g}} \right] \quad (32)$$

式中: L_1 为起跳点与下一个碰撞点的水平距离。

2.4 滑动阶段

当落石与坡面碰撞后的法向速度为 0 而切向速度不为 0, 且 $d_t = 0$ 时, 落石会沿坡面滑动。下滑时的速度为

$$V_{t4} = \sqrt{2gL_2(\sin \theta_2 - f \cos \theta_2) + V_{t3}^2} \quad (33)$$

式中: f 为滑动摩擦系数; L_2 为滑动的距离; V_{t3} 为碰撞后的切向初速度; V_{t4} 为滑动后的切向速度。

如果已知滑动后坡面的坡度不变且坡面较长时, 可以根据上式计算出落石滑动停止时所经过的切向距离。

2.5 滚动阶段

当落石与坡面碰撞后法向速度为 0, 而 $d_t < 0$, 切向速度反向时, 落石会向后滚动。落石滚动与落石形状和落石的运动速度等有关。

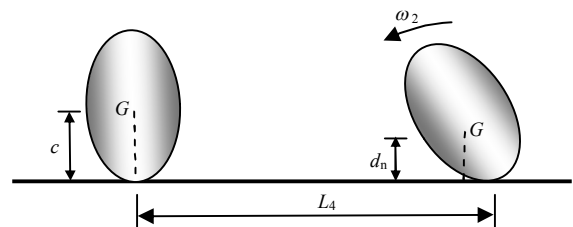


图 4 椭圆形落石滚动过程

Fig.4 Rolling stage of elliptical rockfall

忽略滚动摩擦的影响, 要使椭圆形落石连续滚动, 即要使落石滚动通过质心离水平面最高点位置时角速度大于 0, 必须满足:

$$mg(c-d_n) - \frac{1}{2}mV_{t5}^2 - \frac{1}{2}I_G\omega_2^2 > 0 \quad (34)$$

式中： c 为椭圆形落石的长轴长度； V_{t5} 和 ω_2 为碰撞结束后开始滚动时的切向速度和角速度； I_G 为落石的转动惯量。

如果落石滚动过程中不满足式 (34)，落石将在滚动起始点与质心最高点间来回滚动，最终静止在这一范围内。

如果落石满足式 (34)，根据椭圆形落石滚动过程机械能守恒，可得

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2}m[\omega_3^2(d_{t4}^2 + d_{n4}^2)] + \frac{1}{2}I_G\omega_3^2 - \\ & \frac{1}{2}mV_{t5}^2 - \frac{1}{2}I_G\omega_2^2 = mg(d_{n4} - d_n) \end{aligned} \quad (35)$$

式中： d_{t4} 和 d_{n4} 为滚动过程中任意时刻的质心与接触点的相对位置； ω_3 为滚动过程任意时刻的滚动角速度。

3 算 例

本文对万州首立山危岩 W49 进行计算，W49 所在岩层产状为 $160^\circ \angle 5^\circ$ ，危岩地质剖面如图 5 所示。将落石近似简化为长轴为 8 m、短轴为 4 m 的椭圆，质心离地面高度为 9 m，落石重 6 200 kg。危岩下方地面主要为 0.9 m 厚的粉质黏土，弹性模量为 1.8 MPa，泊松比为 0.4，且地面接近水平。椭圆形落石长轴与竖直方向的夹角为 25° 。

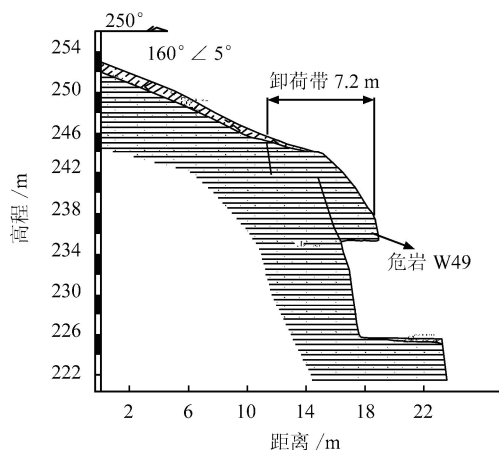


图 5 W49 危岩剖面示意图

Fig.5 Cross-section of W49 in Shoulshan

本文计算结果表明：落石在失稳后先沿结构面滑动，滑动面摩擦系数为 0.2，落石脱离滑面的水平方向速度和竖直方向速度分别为 4.83 m/s 和 2.25 m/s。离开滑面后落石与危岩下方的地面碰撞，碰撞前的竖直方向速度为 14.21 m/s。落石接触面中

心的曲率半径为 2.89 m，由于接触面地面为松散的黏土，弹性变形小、塑性变形大且临界屈服应力接近于 0，因此，法向恢复系数为 0.27，切向恢复系数为 0.3，碰撞前后速度方向相反。所以，碰撞后落石将向后滚动，直到与山体接触后稳定。法向恢复系数 e_n 与碰撞前的速度 V_i 关系如图 6 所示。从图中可知，法向恢复系数随碰撞前速度的增加而减小，而且落石块度越大，恢复系数越大。

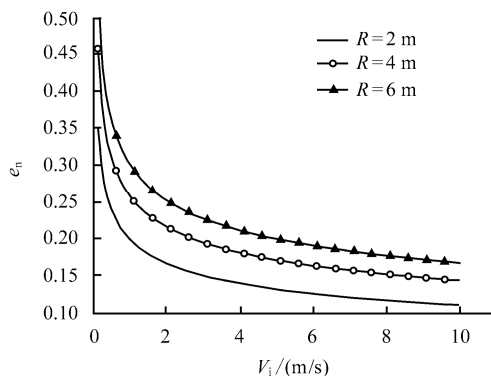


图 6 法向恢复系数与碰撞前速度的关系

Fig.6 The relationship between normal coefficient of restitution and input velocity

根据文献[6]的研究，落石与地面碰撞的恢复系数如表 1 所示，其中文献[6]假定落石形状为圆形。本算例中山坡表层覆盖物为松散的坡积层，查表 1 可得法向恢复系数为 0.3，大于本文解。落石的椭圆形假定与圆形假定的最大区别在于椭圆形假定可以考虑运动方向。对比分析表明，本文的碰撞恢复系数求解公式考虑了岩土体材料的弹塑性变形，物理意义清晰，因而更加符合实际。

表 1 法向恢复系数表^[6]
Table 1 The recovery factor

序号	山坡表面覆盖物情况	恢复系数 e
1	基岩外露	0.7
2	密实的岩块堆积层	0.5
3	长有草皮的光滑坡面	0.3
4	松散的坡积层、堆积层等	0.3
5	基岩埋藏不深 (≤ 0.5 m) 的山坡	0.5

4 结 论

(1) 本文将落石运动分为 5 种形式：自由落体运动、斜抛运动、碰撞、滑动和滚动，实际中的落石为其中某几种运动形式的组合。

(2) 本文将落石近似成椭圆形，考虑了落石形状对落石运动轨迹的影响。

(3) 算例分析表明: 落石与地面碰撞法向恢复系数随碰撞前速度的增加而减小, 而且落石块度越大, 恢复系数越大。

(4) 考虑了落石与地面碰撞的弹塑性变形不仅得到了恢复系数的计算公式, 而且能够计算碰撞冲击力, 可以为工程设防提供合理依据。

参考文献

- [1] DAY R W. Case studies of rockfall in soft versus hard rock[J]. **Environmental and Engineering Geoscience**, 1997, 3(1): 133—140.
- [2] 吕庆, 孙红月, 翟三扣, 等. 边坡滚石运动的计算模型[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 79—84.
LÜ Qing, SUN Hong-yue, ZHAI San-kou, et al. Evaluation model of rockfall trajectory[J]. **Journal of Natural Disasters**, 2003, 12(2): 79—84.
- [3] 谢全敏, 夏元友. 危岩块体稳定性的综合评价方法分析[J]. 岩土力学, 2002, 27(6): 110—116.
XIE Quan-min, XIA Yuan-you. Comprehensive assessment method of stability of critical rock- block mass and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 27(6): 110—116.
- [4] GUZZETTI F, CROSTA G, DETTI T, et al. Stone: a computer program for the three dimensional simulation of rock-falls[J]. **Computers & Geosciences**, 2002, 28: 1079—1093.
- [5] AZZONI A, LA BARBERA G, 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.
- [6] 唐红梅, 易朋莹. 危岩落石运动路径研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2003, 25(1): 17—23.
TANG Hong-mei, YI Peng-ying. Research on dangerous rock movement route[J]. **Journal of Chongqing Jianzhu University**, 2003, 25(1): 17—23.
- [7] CHAU K T, WONG R H C, WU J J. Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2002, 39: 69—77.
- [8] HERTZ H. Über die Berührung fester elastischer Körper [J]. **Journal für die Reine und Angewandte Mathematik**, 1882, 92(4): 156—171.
- [9] JOHNSON K L. Contact mechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [10] COLIN THORNTON, ZEMIN NING. A theoretical model for the stick/bounce behavior of adhesive, elastic-plastic spheres[J]. **Powder Technology**, 1998, 99: 154—162.
- [11] VU-QUOC L, ZHANG X, LESBURG L. Contact force-displacement relations for spherical particles accounting for plastic deformation[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2001, 38(36—37): 6455—6490.
- [12] 胡厚田. 崩塌与落石[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.
- [7] 彭小沾, 崔希民, 臧永强, 等. 时间函数与地表动态移动变形规律[J]. 北京科技大学学报, 2004, 26(4): 341—344.
PENG Xiao-zhan, CUI Xi-min, ZANG Yong-qiang, et al. Time function and prediction of progressive surface movement and deformation[J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2004, 26(4): 341—344.
- [8] 黄乐亭, 王金庄. 地表动态沉陷变形的3个阶段与变形速度的研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(4): 420—424.
HUANG Le-ting, WANG Jin-zhuang. Study on the three stage and deformation velocity of dynamic surface subsidence deformation[J]. **Journal of China Coal Science**, 2006, 31(4): 420—424.
- [9] 刘玉成, 曹树刚, 刘延保. 缓倾斜煤层矩形采空区地表沉陷盆地模型[J]. 中国矿业, 2008, 17(6): 73—76.
LIU Yu-cheng, CAO Shu-gang, LIU Yan-bao. The subsidence basin model under rectangular goaf due to mining gentle-inclined coal seam[J]. **Journal of China Mining Magazine**, 2008, 17(6): 73—76.
- [10] 李德海. 覆岩岩性对地表移动过程时间影响函数的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3780—3783.
LI De-hai. Influence of cover rock characteristics on time influencing parameters in process of surface movement[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(22): 3780—3783.
- [11] 邓英尔, 谢和平. 全过程沉降的新模型与方法[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 1—4.
DENG Ying-er, XIE He-ping. New model and method of forecasting settlement during complete process construction and operation[J]. **Rock and soil Mechanics**, 2005, 26(1): 1—4.
- [12] 王伟, 卢延浩. 基于 Weibull 曲线的软基沉降预测模型分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 803—808.
WANG Wei, LU Ting-hao. Study on prediction model of soft foundation settlement based on Weibull curve[J]. **Rock and soil Mechanics**, 2007, 28(4): 803—808.

上接第 3410 页