

岩质边坡滚石飞落模型与防治技术

崔 喆^{1,2}, 石永飞², 孟家琪³

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省交通规划设计研究院, 陕西 西安 710075;
3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘 要:针对公路岩质边坡的滚石灾害问题,建立岩石跳跃滚落的理论分析模型,推导了岩石运动的轨迹方程、滚石第 1 次落点后的水平速度和竖向速度以及第 2 次落点的水平距离,计算了滚石掉入构筑物表面的水平距离和对砂垫层的撞击能,并计算了滚石撞入砂垫层的入土深度,分析了撞击能与入土深度的关系,同时推导出了滚石落入砂垫层的冲击压力、最大法向压应力、撞击能以及压入量,并通过 2 个算例对提出的模型进行验证,根据计算结果选取了合理的防护方式对滚石灾害进行防护。研究表明:算例 1 滚石对砂垫层的压入量为 1.28 m,设计构筑物上的砂垫层厚度为 2 m,同时考虑到构筑物的安全储备,滚石撞击坡面后的水平运动距离小于撞击点到公路路缘的水平距离,滚石飞落至地面的撞击能为 167 kJ,采用型号为 AXI-015(防护等级为 200 kJ)的被动防护网可有效防护构筑物,避免安全事故的发生;算例 2 滚石落入砂垫层的压入量为 0.87 m,撞击能为 124 kJ,设计洞口顶回填 1.5 m 厚的砂垫层,采用防护等级为 150 kJ 的被动防护网可有效防护边坡滚石灾害。采用提出的模型计算并进行防护的效果非常明显,证明了所建模型的可实施性,为以后类似工程提供了有益指导。

关键词:道路工程;岩质边坡;弹性力学;滚石灾害;砂垫层;防护网

中图分类号:U411 **文献标志码:**A

Free-fly rolling model of stone on rock slope and control techniques

CUI Zhe^{1,2}, SHI Yong-fei², MENG Jia-qi³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Provincial Transport Planning Design and Research Institute, Xi'an 710075, Shaanxi, China; 3. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: Aiming the problem of rolling stone disasters of highway rock slopes, a theoretical analysis model of rock jumping and rolling was established. By deducing the trajectory equation of rock movement, the horizontal velocity and vertical velocity of the first drop point of rolling stone and the horizontal distance of the second drop point were derived. In addition, the horizontal distance of rolling stone falling into the structure surface and the impact energy on sand cushion were calculated, the depth of rock rolling into sand cushion was calculated, and the relationship between impact energy and depth was analyzed. At the same time, the impact pressure, the maximum normal compressive stress, the impact energy and the amount of indentation of rolling

收稿日期:2017-11-11

基金项目:国家自然科学基金项目(41272285)

作者简介:崔 喆(1978-),男,陕西西安人,陕西省交通规划设计研究院高级工程师,长安大学工学博士研究生,

E-mail:723648316@qq.com。

stone falling into sand cushion were derived. The proposed model was verified by two examples. According to the calculation results, a reasonable protection method was selected for the protection of rolling stone hazards. The results show that in the first example, the amount of indentation of rolling stone falling to sand cushion is 1.28 m, and the thickness of sand cushion on the designed structure is 2 m. Considering the safety reserve of structure, the distance of horizontal movement of rolling stone after hitting the slope is less than the horizontal distance from the impact point to road edge, and the impact energy of rolling stone flying down to the ground is 167 kJ. The passive protective net of AXI-015 (protection grade is 200 kJ) can effectively protect the structure and avoid accident. In the second example, the amount of indentation of rolling stone falling into sand cushion is 0.87 m, the impact energy is 124 kJ, and the thickness of sand cushion with 1.5 m is backfilled to the top of the designed hole. The passive protective net of AXI-015 (protection grade is 150 kJ) can effectively protect slope rolling rock hazards. The effect is obvious of which using proposed method for calculation and protection. At the same time, it is proved that the model can be implemented, which can provide useful guidance for similar projects in future. 6 tabs, 3 figs, 25 refs.

Key words: road engineering; rock slope; elastic mechanics; rolling disaster; sand cushion; protective net

0 引言

国内外专家学者针对公路边坡稳定性问题做了大量深入的研究,并取得了非常好的成果,但是对于公路边坡滚石问题的研究比较少^[1]。滚石是边坡体表面的块石因某种原因(地震、强降雨等)失稳后,沿着坡面急速向下滚动的一种自然现象。对于公路高边坡而言,由于边坡上的滚石滑动、滚动、下落、跳跃或是回弹等运动具有突发性、随机性、多发性等特性,使得对于滚石所引起的灾害的治理难度较大。滚石灾害由于石块自由掉落,冲击公路路面,对路面上行驶的车辆和行人等产生严重的危害。

吕庆等根据现场调查和试验,对滚石运动轨迹进行了分类,建立了滚石的运动轨迹公式,并确定了滚石运动的主要影响因素^[2];黄润秋等基于正交试验分析并确立了基于滚石形状、质量和坡面形状等因素下,坡边上的滚石加速度评价标准,确定了滚石的冲击能量^[3];杨海清等在前人研究基础上,以滚石运动轨迹的分类为基础,考虑滚石形状和地面弹塑性变形等因素,通过建立恢复系数计算公式,得出了碰撞冲击力的计算公式^[4];何思明等以球形压模压入半空间理论为基础,通过对材料冲击特性的研究,建立了滚石冲击压力的计算公式^[5-6]。经过诸多学者的探索 and 不断深入的研究,对于滚石在下滑过程中的速度、冲击力等研究趋于完善。

为了最大限度地减轻滚石飞落对交通造成的影响,最有效的方式是在合理位置采取遮挡措施阻止滚石直接冲击路面。因此,计算滚石崩落速度、轨迹以及对庇护物的冲击压力与动能是研究边坡滚石问题的首要任务,这对于边坡工程的安全保障具有非常重要的意义。

1 滚石飞落砂垫层模型

1.1 滚石飞落运动方程

滚石起落点通常发生在岩质边坡坡面的突变处或因滚石碰撞而产生速度变化处,假设滚石飞落不受空气阻力影响,则滚石飞落的弧线可以看作是抛物体运动的轨迹。在 $t_0=0$ 时刻,假设滚石处于下页图 1 中 $C(0,0)$ 点,坡高为 h ,速度为 v , $0^\circ < \alpha < \beta < 90^\circ$ 。 α 为第 1 级边坡的坡度, β 为第 2 级边坡的坡度, γ 为滚石在 O 点碰撞后的飞落方向与水平方向的夹角,碰撞点为 $O(x_0, y_0)$, A 处是防护栏,在 O 点碰撞后边坡岩石开始飞落的运动速度为 u 。设边坡岩石在 C 点沿 x 、 y 轴速度分量 v_x 、 v_y 为

$$\begin{cases} v_x = v \cos(\alpha) \\ v_y = v \sin(\alpha) \end{cases} \quad (1)$$

则 t 时刻边坡岩石的坐标 x 、 y 为

$$\begin{cases} x = v_x t \\ y = v_y t + \frac{1}{2} g t^2 \end{cases} \quad (2)$$

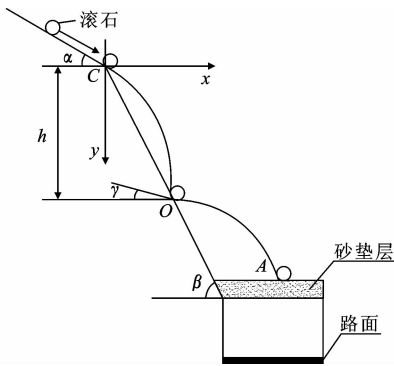


图 1 滚石飞落模型

Fig. 1 Falling model of rolling stone

式中: g 为重力加速度。

由式(1)、式(2)得到边坡岩石飞落的运动方程为

$$y = x \tan(\alpha) + \frac{x^2 g}{2v^2 \sin^2(\alpha)} \quad (3)$$

坡度为 β 的直线方程为

$$y = x \tan(\beta) \quad (4)$$

由式(1)~式(4)能够解得边坡岩石飞落至碰撞点 O 的时间 t 为

$$t = \frac{2v}{g} (\tan(\beta) - \tan(\alpha)) \cos^2(\alpha) \quad (5)$$

将式(5)代入式(2)可得 O 的坐标为

$$\begin{cases} x_O = \frac{2v^2}{g} (\tan(\beta) - \tan(\alpha)) \cos^2(\alpha) \\ y_O = \frac{2v^2}{g} (\tan(\beta) - \tan(\alpha)) \cos^2(\alpha) \tan(\beta) \end{cases} \quad (6)$$

根据能量守恒定律有

$$\frac{1}{2} m v_O'^2 - \frac{1}{2} m v^2 = mgh \quad (7)$$

式中: m 为飞落滚石的质量; v_O' 为滚石在 O 点碰撞前的飞落速度。

则在碰撞点 O 滚石入射速度 v_r 为

$$v_r = \sqrt{v^2 + 2gh} \quad (8)$$

入射速度在 x 、 y 方向的速度分量 v_{rx} 、 v_{ry} 分别为

$$\begin{cases} v_{rx} = v_r \cos(\gamma) \\ v_{ry} = v_r \sin(\gamma) \end{cases} \quad (9)$$

为防止滚石对公路交通产生破坏,应在滚石飞落地面之前对其进行有效阻隔,因此需求出滚石飞落至防护体时的速度以及撞击能,以选择合理有效的防护结构。

1.2 滚石飞落撞击能量

滚石飞落与坡面碰撞假定为刚性碰撞,滚石飞落撞击导致的总能量损失用恢复系数的方法考虑。

假定法向的恢复系数为 $K_n^{[7]}$,切向的恢复系数为 $K_\tau^{[8]}$,则

$$\begin{cases} K_n = \frac{v_m}{v_{On}} \\ K_\tau = \frac{v_{\tau r}}{v_{O\tau}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: v_{On} 为撞击前法向速度; v_m 为撞击后法向速度; $v_{O\tau}$ 为撞击前切向速度; $v_{\tau r}$ 为撞击后切向速度; n 、 τ 分别为法向和切向。

$K_n \leq 0$, $K_\tau \leq 1$, 当 $K_n = K_\tau = 1$ 时是无摩擦碰撞^[9], 当 $K_n = K_\tau = 0$ 时滚石飞落运动停止。撞击前法向及切向速度 v_{On} 、 $v_{O\tau}$ 和入射速度 v_x 、 v_y 的关系为^[10]

$$\begin{cases} v_{On} = v_x \sin(\beta) - v_y \cos(\beta) \\ v_{O\tau} = v_x \cos(\beta) + v_y \sin(\beta) \end{cases} \quad (11)$$

根据式(10)、式(11),飞落的滚石在 O 点撞击后沿 x 、 y 方向速度分量 v_{Ox} 、 v_{Oy} 与撞击后法向和切向速度 v_m 、 $v_{\tau r}$ 的关系为^[11]

$$\begin{cases} v_{Ox} = v_m \sin(\beta) + v_{\tau r} \cos(\beta) \\ v_{Oy} = v_{\tau r} \sin(\beta) - v_m \cos(\beta) \end{cases} \quad (12)$$

由式(10)~式(12)可得撞击后飞落的滚石沿 x 、 y 方向速度分量 v_{Ox} 、 v_{Oy} 分别为^[12]

$$\begin{cases} v_{Ox} = K_n (v_x \sin(\beta) - v_y \cos(\beta)) \sin(\beta) + K_\tau (v_x \cos(\beta) + v_y \sin(\beta)) \cos(\beta) \\ v_{Oy} = K_\tau (v_x \cos(\beta) + v_y \sin(\beta)) \sin(\beta) - K_n (v_x \sin(\beta) - v_y \cos(\beta)) \cos(\beta) \end{cases} \quad (13)$$

根据文献[3],飞落的滚石撞击后法向的恢复系数取值范围为 $0.2 < K_n < 0.5$,切向的恢复系数取值范围为 $0.2 < K_\tau < 0.9$ 。在有基岩出露的坡面取最大值,在无植被覆盖或植被覆盖较少的砾岩及硬土坡面取中间值,在松散的残积土或黏土坡面取小值^[13]。基岩和砾石较多的边坡取值范围为: $0.33 < K_n < 0.37$, $0.83 < K_\tau < 0.87$ ^[14]。

据经验公式 $E_m = 0.6mv^2$ (E_m 为能量),当滚石飞落至平地,其改变了运动方向,能量损失 E'_m 为^[15]

$$E'_m = \lambda E_m = \frac{1}{2} m v'^2 \quad (14)$$

式中: λ 为滚石飞落运动改变方向时能量损失的系数; v' 为滚石飞落运动改变方向后运动方向上的初速度^[16]。

滚石飞落至坡底后,能量 E_m 可表示为

$$E_m = 1.2 \times \frac{1}{2} m v^2 = 1.2 [mgh - mgh \cot(\theta)] \quad (15)$$

$$\theta = \frac{1}{2} m [(u \sin(\gamma))^2 + (u \cos(\gamma))^2]$$

1.3 滚石 x 方向距离计算

假定某滚石飞落的初速度 $v_x = 2 \text{ m/s}$, $v_y = 0 \text{ m/s}$ ^[17]; 因坡斜面大多是基岩或砾石区, $K_n = 0.35$, $K_\tau = 0.85$ 。撞击点 O 的坐标为 $\left(\frac{8\tan(\beta)}{g}, \frac{8\tan^2(\beta)}{g}\right)$, 入射速度 $v_{rx} = 2 \text{ m/s}$, $v_{ry} = 4\tan(\beta)$ ^[18]。代入式(13)并整理可得

$$\begin{cases} v_{Ox} = 0.35v_{rx} + \frac{\cos^2(\beta)}{2}v_x + \frac{v_{ry}}{4}\sin(2\beta) \\ v_{Oy} = 0.35v_{ry} + \frac{\sin^2(\beta)}{2}v_y + \frac{v_{rx}}{4}\sin(2\beta) \end{cases} \quad (16)$$

式中: v_{rx} 、 v_{ry} 分别为碰撞前速度在 x 、 y 方向上的分量。

假定经时间 t_0 滚石飞落到砂垫层, 则

$$t_0 = \frac{\sqrt{v_{Oy}^2 + 2g\Delta h} - v_{Oy}}{g} \quad (17)$$

经时间 t_0 滚石飞落一段距离, 假定在砂垫层的碰撞位置为 $A(x_A, y_A)$ 点, 落入 A 点时的撞击速度为 v_{Ax} 、 v_{Ay} , 则 $v_{Ax} = v_{Ox}$, $v_{Ay} = v_{Oy}t_0 + \frac{1}{2}gt_0^2$ 。其距 O 点的

水平分量为 Δl , 竖向分量为 Δh , 则 $\Delta h = v_{Oy}t_0 + \frac{1}{2}gt_0^2$,

$\Delta l = v_{Ox}t_0$ ^[19]。

1.4 滚石飞入砂垫层的弹性模型

假定完全弹性条件时, 飞落的滚石受法向力作用压入土体垫层, 则可将其简化为刚性的球体压模受法向力作用弹性压入半空间体的力学模型^[20]。设球体的半径为 r , 半空间上的一个半径为 a 的圆形与之接触^[21]。根据弹性力学理论给出该问题在弹性接触时的完备解。接触压应力的分布为

$$p(r) = \frac{3P}{2\pi a^2} \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

式中: $p(r)$ 为接触压应力; P 为法向压力。

最大接触压应力 p'_{\max} 处于 $r=0$ 处, 即

$$p'_{\max} = \frac{3P}{2\pi a^2} \quad (19)$$

接触圆的半径为

$$a = \left(\frac{3rP}{4E} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (20)$$

式中: E 为垫层材料的弹性模量。

飞落滚石最大弹性压入量 δ 为^[22]

$$\delta = \frac{9P}{16Ea} \quad (21)$$

由式(20)、式(21)可得出在完全弹性状态下, 刚性飞落滚石法向压力 P_e 与压入量 δ 的关系为

$$P_e = \frac{32\sqrt{3}}{27} E \sqrt{r} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (22)$$

根据几何变形关系, 飞落滚石压入量与接触半径有如下的关系: ①当 $\delta \leq r$ 时, $a^2 = (2r - \delta)\delta$, 当 $\delta \ll r$ 时, $a^2 = 2r\delta$; ②当 $\delta \geq r$ 时, $a = r$ 。

1.5 飞落滚石的冲击特性

假定质量为 m 的岩石在冲击速度为 v 时, 垫层材料为完全弹性状态, 由能量守恒原理可得^[23]

$$\frac{1}{2}mv^2 = \int_0^\delta P_e \delta d\delta \quad (23)$$

将式(22)代入式(23)积分, 经整理得

$$\delta = \left[\frac{45\sqrt{3}mv^2}{128r^{\frac{1}{2}}E} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (24)$$

对应的飞落滚石的冲击压力 P'_e 为

$$P'_e = \frac{32\sqrt{3}}{27} E r^{\frac{1}{2}} \left[\frac{45\sqrt{3}mv^2}{128r^{\frac{1}{2}}E} \right]^{\frac{3}{5}} \quad (25)$$

而冲击时最大法向压应力为

$$p_{\max} = 0.443 \left(\frac{E^{\frac{1}{3}}}{r^{\frac{1}{3}}} mv^2 \right)^{\frac{1}{5}} \quad (26)$$

2 实例分析

2.1 实例一

商洛—漫川关高速公路岩质高边坡(图2), 边坡高度28 m, 分为2级: 第1级高15 m, 坡率1:0.4; 第2级高10 m, 坡率1:0.25(表1)。边坡为顺层块状结构, 整体稳定性一般, 开挖导致坡面出露的危岩较多, 滚石灾害频繁发生, 对行人和车辆的安全造成很大威胁。现考虑在坡底处路面设置一挡石混凝土结构, 结构表面铺设一层厚砂砾, 以缓冲滚石的冲击, 防止滚石对结构造成毁坏, 殃及行人及车辆。

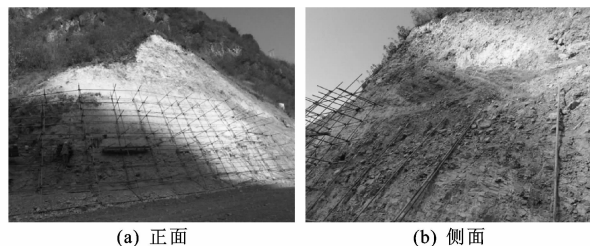


图2 实例一边坡

Fig. 2 Side slope of the first example

表1 边坡参数(实例一)

Tab. 1 Parameters of slope (the first example)

参数	第1级坡率 α	第2级坡率 β	第1级坡高/m	第2级坡高/m
参数值	1:0.4	1:0.25	15	10

现假设滚石半径 $R = 0.5 \text{ m}$, 滚石重度 $\gamma_g =$

26 kN/m³,其在 C 点开始发生弹跳时的横向速度为 2 m/s,纵向速度为 0,则根据前文推导的公式,滚石在碰撞后的速度 $v_{Ox}=1.98$ m/s, $v_{Oy}=12.29$ m/s,

表 2 滚石与砂垫层参数(实例一)

Tab. 2 Parameters of rolling stone and sand cushion (the first example)

参数	滚石参数		滚石飞落点参数			砂垫层参数		
	R/m	重度 $\gamma_g/(kN \cdot m^{-3})$	$\Delta l/m$	$\Delta h/m$	t_0/s	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	最大承载力 σ/kPa
参数值	0.5	26	2.24	7.47	1.12	40	0.27	345

计算结果如表 3 所示,滚石到达 A 点的冲击速度为 17.26 m/s,滚石的压入量大于滚石的半径 (1.28 m>0.5 m),此时,滚石与垫层材料接触半径达到最大值。对应的滚石冲击压力 $P_e=1\,334$ kN,相应施加在防护结构上的极限压应力为 $p_{max}=118.56$ kN/m²,对应的压入量为 1.28 m。

表 3 滚石撞击分析结果(实例一)

Tab. 3 Impact analysis results of rolling stone (the first example)

参数	滚石冲击压力 P_e/kN	最大法向压应力 $p_{max}/(kN \cdot m^{-2})$	撞击能/kJ	压入量 δ/m
参数值	1 334	118.56	167	1.28

根据滚石对砂垫层的冲击压力和最大法向压应力,可以对庇护结构的受力进行设计验算^[24]。针对滚石冲击压缩量的大小,设计砂垫层的厚度应不小于

对应的 O 点坐标 $x_O=2.79, y_O=9.08$,落入砂垫层 A 点时的竖向速度 $v_{Ay}=17.26$ m/s。计算所得滚石与砂垫层参数见表 2。

2.2 实例二

柞水—山阳高速公路九里坪隧道口为岩质边坡,如图 3 所示。地形地貌为高陡山坡,山大谷深,岩体完整性一般,岩质坚硬但节理发育,岩性为抗风化能力强的板岩,开挖过程中边坡一经扰动,上部块石易于滚落,影响隧道洞口行车安全。边坡最高开挖高度为 30 m,分为 2 级,第 1 级高 10 m,坡率 1:0.7,第 2 级高 10 m,坡率 1:0.3,见表 4,坡度为 60°~65°,进口轴线与地形近于直交,发育 2 组节理,洞口仰坡可能会产生风化面掉块。

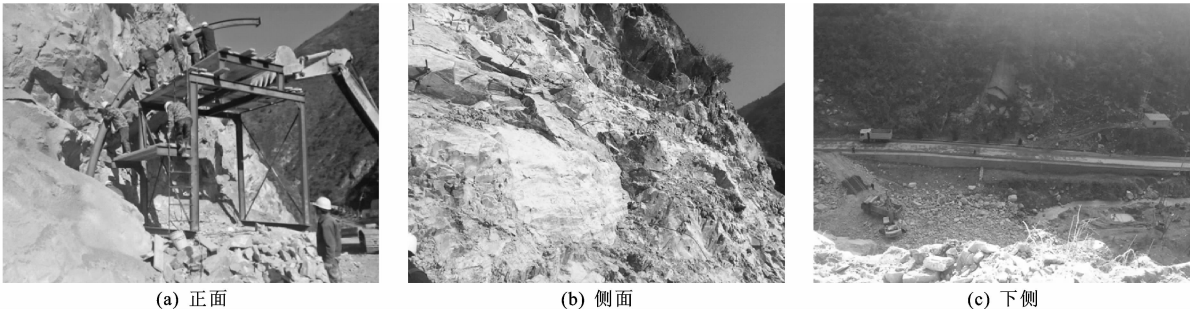


图 3 实例二边坡

Fig. 3 Side slope of the second example

表 4 边坡参数(实例二)

Tab. 4 Parameters of slope (the second example)

参数	第 1 级坡率 α	第 2 级坡率 β	第 1 级坡高/m	第 2 级坡高/m
参数值	1:0.7	1:0.3	10	10

现假设滚石半径 $R=0.3$ m,滚石重度 $\gamma_g=28$ kN/m³,其在 C 点开始发生弹跳时的横向速度为 3.5 m/s,纵向速度为 2 m/s,则滚石在 O 点碰撞后的速度 $v_{Ox}=3.17$ m/s, $v_{Oy}=14.85$ m/s,对应的 O 点坐标 $x_O=2.73, y_O=9.08$,落入砂垫层 A 点时的竖向速度 $v_{Ay}=21.74$ m/s。计算所得滚石与砂垫层参数见下页表 5。

计算结果如下页表 6 所示,滚石到达 A 点的冲

击速度为 17.26 m/s,滚石的压入量大于滚石的半径 (0.87 m>0.3 m),此时,滚石与垫层材料接触半径达到最大值,对应的滚石冲击压力 $P_e=986$ kN,相应施加在防护结构上的极限压应力为 $p_{max}=89.45$ kN/m²,对应的压入量为 0.87 m。

根据滚石对砂垫层的冲击压力和最大法向压应力,可以对庇护结构的受力进行设计验算^[25]。针对滚石冲击压缩量的大小,洞顶设计回填砂垫层的厚度应不小于 1.5 m。算出的滚石飞落到隧道洞顶的撞击能为 124 kJ,选用 SNS 型号为 AXI-015(防护级别为 150 kJ)、高为 2 m 的被动防护网作为结构的安全储备。

表 5 滚石与砂垫层参数(实例二)

Tab. 5 Parameters of rolling stone and sand cushion (the second example)

参数	滚石参数		滚石飞落点参数			砂垫层参数		
	R/m	重度 $\gamma_g/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\Delta l/\text{m}$	$\Delta h/\text{m}$	t_0/s	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	最大承载力 σ/kPa
参数值	0.3	28	1.85	9.73	1.21	40	0.27	345

表 6 滚石撞击分析结果(实例二)

Tab. 6 Analysis results of rolling stone (the second example)

参数	滚石冲击压力 P_e'/kN	最大法向压应力 $p_{\max}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	撞击能/kJ	压入量 δ/m
参数值	986	89.45	124	0.87

4 结 语

(1)针对公路岩质边坡的滚石灾害问题,建立了滚石跳跃滚落的理论分析模型,推导了滚石运动的轨迹方程,滚石第 1 次落点后的水平速度和竖向速度以及第 2 次落点的水平距离,计算了滚石掉入构筑物表面的水平距离和对砂垫层的撞击能,并计算了滚石撞入砂垫层的入土深度,分析了撞击能与入土深度的关系,同时求出了滚石落入砂垫层的冲击压力、最大法向压应力、撞击能以及压入量。

(2)运用力学模型计算某工程实例问题,根据计算结果选取了合理的防护方式对滚石灾害进行防护,效果非常明显,同时证明了所建模型的可实施性,为以后类似工程提供了有益指导。

(3)公路滚石灾害在中国研究时间较短,其危害性还未引起足够重视,相关研究相对较少,且常是将其作为边坡治理的附加研究,但滚石对公路交通的危害不容忽视,下一步应开展滚石灾害防治方面的系统研究。

参考文献:

References:

[1] 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.
YANG Zhi-fa, ZHANG Lu-qing, SHANG Yan-jun. Two engineering geomechanics subjects to be worth paying close attention[J]. Journal of Engineering Geology,2002,10(1):10-14.

[2] 吕庆,孙红月. 边坡滚石运动的计算模型[J]. 自然灾害学报,2003,12(2):79-84.
LU Qing, SUN Hong-yue. Evaluation models of rockfall trajectory[J]. Journal of Natural Disasters,2003,12(2):79-84.

[3] 黄润秋,刘卫华. 基于正交设计的滚石运动特征现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(5):

882-891.
HUANG Run-qiu, LIU Wei-hua. In-situ test study of characteristics of rolling rock blocks based on orthogonal design[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(5):882-891.

[4] 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 Hai-qing, ZHOU Xiao-ping. A new approach to calculate trajectory of rockfall[J]. Rock and Soil Mechanics,2009,30(11):3411-3416.

[5] 何思明. 滚石对防护结构的冲击压力计算[J]. 工程力学,2010,27(9):175-180.
HE Si-ming. Calculation of compact pressure of rockfall on shield structures[J]. Engineering Mechanics,2010,27(9):175-180.

[6] 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(增2):5543-5548.
ZHANG Lu-qing, YANG Zhi-fa, ZHANG Ying-jun. Risk analysis of encountering rock-falls on highway and method study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(S2):5543-5548.

[7] 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 Si-qiao, GONG Shang-qing. Research on normal restitution coefficient of rockfall collision by model tests[J]. China Railway Science,2015,36(4):13-19.

[8] 丁冰冰. 岩质边坡危岩落石室内模型试验研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
DING Bing-bing. The indoor model experimental study on rockfall on the rock slope[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2015.

[9] 叶四桥,陈洪凯,唐红梅. 落石冲击力计算方法[J]. 中国铁道科学,2010,31(6):56-62.
YE Si-qiao, CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei. The calculation method for the impact force of the rockfall[J]. China Railway Science,2010,31(6):56-62.

[10] 陈宇龙. 滚石运动过程中关键参数的影响分析[J]. 岩土工程学报,2013,35(增2):191-196.
CHEN Yu-long. Influence of key factors on trajectories of rockfalls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(S2):191-196.

[11] 袁进科. 斜坡震裂岩体结构特征与震后崩塌识别体系

- 研究[D]. 成都:成都理工大学,2012.
- YUAN Jin-ke. Influence of key factors on trajectories of rockfalls [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2012.
- [12] 沈 秦. 地质力学模型试验技术的进展[J]. 长江科学院院报,2001,18(5):32-36.
- SHEN Qin. Development of geomechanics model experiment techniques[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2001,18(5):32-36.
- [13] 阳友奎,周迎庆,姜瑞琪,等. 坡面地质灾害柔性防护的理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2005.
- YANG You-kui, ZHOU Ying-qing, JIANG Rui-qi, et al. Theory and practice of flexible protection to slope geological disasters [M]. Beijing: Science Press,2005.
- [14] 王汉辉,王均星,王开治. 边坡稳定的有限元塑性极限分析[J]. 岩土力学,2003,24(5):733-738.
- WANG Han-hui, WANG Jun-xing, WANG Kai-zhi. Plastic limit analysis of slope stability using finite element[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24 (5): 733-738.
- [15] 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 Si-ming, LI Xin-po, WU Yong. Research on yield property of soil under rock-fall impact [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(S1):2973-2977.
- [16] 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 Si-ming, WU Yong, LI Xin-po. Research on restitution coefficient of rock fall[J]. Rock and Soil Mechanics,2009,30(3):623-627.
- [17] 赵 旭,刘汉东. 水电站高边坡滚石防护计算研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(20):3742-3748.
- ZHAO Xu, LIU Han-dong. Research on protective structures for high slopes rockfall around a hydro-power station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(20):3742-3748.
- [18] 孔德珩. 山房山危岩体稳定性分析、滚石运动特征及防治建议研究[D]. 长春:吉林大学,2015.
- KONG De-heng. Study on stability, movement characteristics and countermeasures of unstale rock mass in Sam-bang Mountain[D]. Changchun: Jilin University,2015.
- [19] 朱 彬. 岩质边坡滚石运动特性及防护研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.
- ZHU Bin. Study on motion characteristic and protection of rockfalls on rock slope [D]. Chongqing: Chongqing University,2010.
- [20] 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.
- [21] 赵丽娜,周科平,高峰,等. 露天矿边坡滚石运动特征及控制[J]. 灾害学,2008,23(3):76-79.
- ZHAO Li-na, ZHOU Ke-ping, GAO Feng, et al. Motion characteristics and control of rockfall of open-pit slope[J]. Journal of Catastrophology, 2008, 23 (3): 76-79.
- [22] PIPKIN B W, TRENT D D, HAZLETT R, et al. Geology and the environment [M]. Boston: Cengage Learning,2013.
- [23] STEVENS W D. Rocfall, a tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls[D]. Toronto: University of Toronto,1998.
- [24] AZZONI A, LA BARBERA G, ZANINETTI A. Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1995, 32 (7): 709-724.
- [25] COROMINAS J, COPONS R, MOYA J. Quantitative assessment of the residual risk in a rock fall protected area[J]. Landslides,2005,2(4):343-357.