

文章编号:1005-0523(2018)03-0104-08

灰岩地区类砌体型危岩座滑过程中突然断裂的能量解

王小委,李洪梅

(江西交通职业技术学院路桥工程系,江西 南昌 330013)

摘要:野外地质调查发现灰岩地区危岩崩塌呈现与砂岩地区危岩崩塌特征不同,破坏时解体现象明显,所形成的崩塌灾害往往具有群发性,并可能产生显著的气垫效应,灰岩地区危岩的“类砌体型结构”特征是导致上述现象的主要原因。本文在构建类砌体型危岩座滑解体模型基础上,采用断裂力学分析方法和能量守恒原理建立了类砌体型危岩系统能量方程,提出了危岩体解体与否的判据,从能量角度诠释了类砌体型危岩座滑过程中突发性断裂特征,并预测了望霞W2#危岩体发生解体时的座滑偏转角度为 34° 。本文研究成果可为评估灰岩地区危岩稳定性提供科学依据,理论和实践意义重大。

关键词:灰岩地区危岩;类砌体型结构;座滑解体;系统能量方程;突发性解体判据

中图分类号:P642.21

文献标志码:A

危岩是指位于陡崖上被岩体结构面切割,稳定性较差的岩石块体及其组合,其失稳、破坏往往带来惨重的人员伤亡和巨大的经济损失。目前,针对砂岩地区危岩破坏机理研究比较深入系统,代表性的研究成果有:陈洪凯等^[1]探讨了崩塌灾害形成机制,并基于损伤力学和断裂力学研究了危岩主控结构面端部损伤特性;张永兴等^[2]分析了边坡内张性地应力和岩腔发育深度对差异风化型危岩形成与破坏的影响^[3];Yi Zhi-jian (2001)、杨锡武(2002)等^[4-5]基于断裂力学的线场分析方法得到了平面应力裂纹线场的弹塑性精确解,指出边坡的变形失稳源于坡体内部的剪切裂纹扩展及贯通;Frayssines 和 Hantz^[6]分析了高陡边坡破坏机制,认为在评价岩体稳定性时有必要考虑岩桥作用;于明明等^[7]将危岩简化为悬臂梁,构建了危岩稳定性分析的悬臂梁力学模型,并对四川三清村某高边坡危岩做了实例分析。灰岩地区危岩崩塌呈现与砂岩地区危岩崩塌不同特征,破坏时解体现象明显,所形成的崩塌灾害具有群发性,并可能产生显著的气垫效应,如重庆武隆鸡尾山、南川金佛山甑子岩特大型山体崩塌灾害等。野外地质调查分析表明灰岩地区危岩的“类砌体型结构”(quasi-masonry structure)特征是导致上述现象的主要原因。

整体来看,对于灰岩地区具有“类砌体型结构”特征的危岩破坏机制的研究基本处于起步阶段,且针对类砌体型危岩座滑过程中突然断裂机制未研究,这也是目前灰岩地区崩塌致灾范围、致灾程度等预测结果合理性较差的根本原因。本文拟采用断裂力学分析方法及能量守恒原理揭示类砌体型危岩座滑过程中突然断裂的能量解,以期初步探索灰岩地区危岩破坏机制,同时为评估此类危岩稳定性提供科学依据。

1 灰岩地区类砌体型危岩座滑解体模型的构建

长江三峡广阔地区灰岩分布众多,而灰岩地区具有类砌体结构特征的危岩体在主控结构面潜在破坏段孕裂过程中必然积蓄大量弹性应变能,当弹性应变能超过某一临界值时,危岩体突发性破坏,轻则岩体表面解体剥落、掉块,重则整体断裂、坍塌。以重庆市巫山县望霞W2#危岩为例,该危岩体具有典型类砌体结构特征,如图1。此危岩体底部为泥岩、泥页岩构成的软弱层,在危岩体自重作用下,软弱层逐渐压缩变形,导致

收稿日期:2018-01-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51378521)

作者简介:王小委(1990—),男,硕士,讲师,研究方向为公路地质灾害形成机理及防治。

上部危岩体发生有角度的转动而倾斜(弹性应变能积蓄的过程),倾斜后的危岩体内部应力重分布,使岩体某些部位拉剪应力超过岩体容许应力而出现开裂、剥落、掉块现象,如图 2 示。



图 1 望霞W2# 危岩类砌体结构特征

Fig.1 Masonry structure characteristics of unstable rock block W2



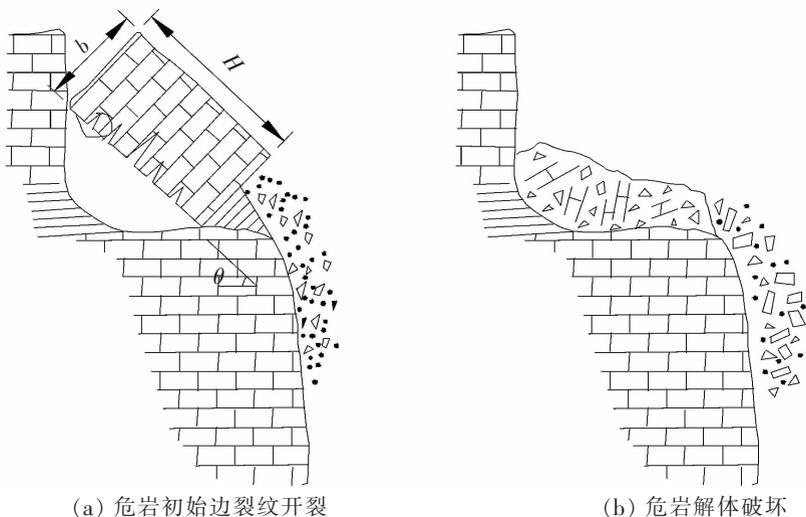
(a) W2 危岩破坏前情况

(b) W2 危岩破坏后情况

图 2 W2# 危岩破坏前后情况

Fig.2 Condition of unstable rock block W2

依据此破坏模式,同时忽略因下部软弱层压缩变形导致的危岩体整体下挫,仅仅考虑危岩体转动倾斜的情况下,构建灰岩地区类砌体型危岩座滑过程断裂模型,如图 3 示。



(a) 危岩初始边裂纹开裂

(b) 危岩解体破坏

图 3 灰岩地区危岩座滑过程的断裂模型

Fig.3 Fracture model of unstable rock block sliding process in limestone area

2 类砌体型危岩座滑过程的能量计算

类砌体型危岩下部软弱基座在危岩体自重及降雨的双重作用下,逐渐软化、破坏,进而导致危岩体发生座滑,座滑的直接结果就是使岩体发生有角度的偏转。将危岩体视为一能量体系,偏转过程中,体系能量逐渐调整,表现为危岩体内部弹性应变能的积聚,重力势能的下降。当危岩体内部弹性应变能积聚到一定程度后,初始裂纹面上应力集中明显,达到裂纹开裂扩展的临界条件,裂纹断裂扩展,最终导致危岩体解体,且断裂解体存在突发性。下面将从能量角度解释类砌体型危岩座滑过程中断裂解体的突发性特征。

类砌体型危岩整个座滑过程包括3个基本节点,分别是:座滑起始点、座滑进行点和座滑结束点,危岩体内在对应3个节点上的能量相互不同,导致岩体内部应力状态不同。下面分别针对这3个节点,分析、计算岩体内部能量的组成和大小。假定危岩体座滑之前倾斜角度为 θ_1 ,座滑结束时倾斜角度为 θ_2 ,座滑过程中倾斜角度用 θ 表示。

2.1 类砌体型危岩座滑起始时能量计算

针对座滑之前的危岩体,能量主要包括两部分,一部分是危岩体的重力势能,另一部分是危岩体的弹性应变能,计算方法分别如下。

重力势能 E_{p1}

$$E_{p1} = \frac{WH}{2} \sin\theta_1 \quad (1)$$

弹性应变能 E_{e1}

$$E_{e1} = \frac{1}{2} \int \int_A \sigma \varepsilon dx dy = \frac{W^2}{2E} \left(\frac{H^3}{b^3} \cos^2\theta_1 + \frac{H}{b} \sin^2\theta_1 \right) + \frac{W^2}{8G} \frac{H}{b} \cos^2\theta_1 \quad (2)$$

2.2 类砌体型危岩座滑过程中能量计算

座滑过程中危岩体的能量也主要包括重力势能和弹性应变能,由于危岩体座滑过程其实也是一个摩擦接触的过程,势必产生热量,各项能量的计算方法分别如下。

重力势能 E_p

$$E_p = \frac{WH}{2} \sin\theta \quad (3)$$

弹性应变能 E_e

$$E_e = \frac{1}{2} \int \int_A \sigma \varepsilon dx dy = \frac{W^2}{2E} \left(\frac{H^3}{b^3} \cos^2\theta + \frac{H}{b} \sin^2\theta \right) + \frac{W^2}{8G} \frac{H}{b} \cos^2\theta \quad (4)$$

危岩体座滑过程中与周围母岩(或基座)的摩擦接触问题十分复杂,实际要研究透彻很难。为简化本文研究,我们认为危岩体与母岩(或基座)摩擦过程中摩擦系数不变,将原本复杂的摩擦生热问题简单化。座滑的某个时刻,危岩体如图3示,将危岩体座滑过程视为绕圆心 O 的匀角速度转动,转动半径用 R 表示,转动角速度用 ω 表示。针对图3建立力学分析模型4,对危岩体进行受力分析,建立平衡方程

$$\left. \begin{aligned} N_1 - f_2 &= m \sin\theta \\ W - f_1 - N_2 &= m \sin\theta \\ f_1 &= N_1 \mu_1 \\ f_2 &= N_2 \mu_2 \\ a &= \omega^2 \frac{H}{2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

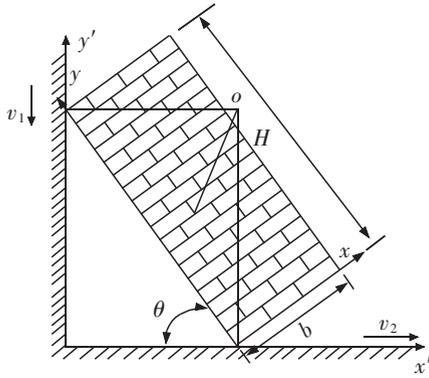


图 4 座滑过程的物理模型

Fig.4 Physical model of unstable rock block during sliding

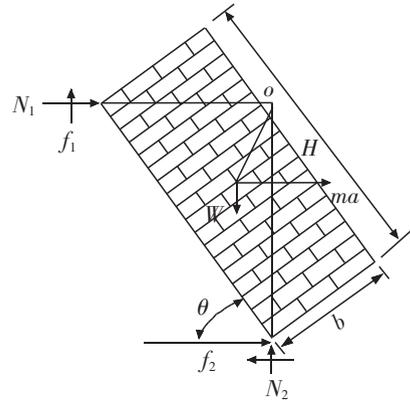


图 5 座滑过程的力学分析模型

Fig.5 Mechanical analysis model of unstable rock block during sliding

式中: N_1, N_2 分别为危岩体座滑过程中两个支撑部位的支撑力, kN; f_1, f_2 分别为危岩体座滑过程中两个支撑部位的摩擦力, kN; μ_1, μ_2 分别为危岩体与后部母岩和底部基岩的摩擦系数; a 为危岩体绕轴中心转动的加速度, m/s^2 。其余各量意义同前。

求解上述方程组, 得 N_1, N_2, f_1 和 f_2

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \frac{W\mu_2 - \frac{H}{2}m\omega^2(\mu_2 \cos\theta - \sin\theta)}{1 + \mu_1\mu_2} \\ N_2 &= \frac{W - \frac{H}{2}m\omega^2(\cos\theta - \mu_1 \sin\theta)}{1 + \mu_1\mu_2} \\ f_1 &= \frac{W\mu_2 - \frac{H}{2}m\omega^2(\mu_2 \cos\theta - \sin\theta)}{1 + \mu_1\mu_2} \mu_1 \\ f_2 &= \frac{W - \frac{H}{2}m\omega^2(\cos\theta + \mu_1 \sin\theta)}{1 + \mu_1\mu_2} \mu_2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

座滑过程中上支撑点下滑 Δl_1

$$\Delta l_1 = H \sin\theta_1 - H \sin\theta = H(\sin\theta_1 - \sin\theta) \quad (7)$$

座滑过程中下支撑点右滑 Δl_2

$$\Delta l_2 = H \cos\theta - H \cos\theta_1 = H(\cos\theta - \cos\theta_1) \quad (8)$$

座滑过程中产生的摩擦热 Q

$$Q = Q(\theta) = f_1 \Delta l_1 + f_2 \Delta l_2 \quad (9)$$

由于本文已将类砌体型危岩座滑失稳过程视为物体绕转轴中心做匀角速度转动的运动学过程, 因而对于角速度 ω 的计算可简单转化为对类砌体型危岩弹冲破坏平均速度 v 的求解, 针对危岩弹冲破坏平均速度的求解问题, 本文不另做研究, 仅参考文献[8]给出的计算方法。

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta E}{m}} \quad (10)$$

$$\Delta E = \frac{g_2(S_r)S_2G_2u_t^3}{6he^2u_0^2} \Delta\Pi \quad (11)$$

式中: ΔE 为危岩体启动时能量释放量, J; $g_2(S_r)$ 为危岩体底部应变软化介质的水化致裂函数; S_r 为主控结构面岩土介质的饱和度; S_2 为危岩体主控结构面应变软化段长度, m; G_2 为危岩体主控结构面应变软化段岩土体剪切模量, kPa; u_t 为突变模型的展开点, 也是失稳模型的奇点, m; h 为潜在破坏面的高度, m; u_0 为对应于

剪应力峰值点的危岩体位移, m ; $\Delta\Pi$ 为危岩体动力失稳释放的弹性能, J 。

3 类砌体型危岩座滑过程中突发性解体的能量解释

类砌体型危岩座滑过程中, 危岩体重力势能下降, 体内弹性应变能逐渐积累, 在弹性应变能积累到一定程度后, 初始裂纹尖端绷紧到极限状态, 当危岩体继续座滑, 弹性应变能继续积累, 初始裂纹尖端无法承受更大的荷载, 继而发生断裂扩展, 并最终导致危岩体解体坍塌, 初始裂纹在座滑过程中受力大致如图 5 示, 可见, 座滑过程中, 危岩体内初始裂纹尖端受力趋于恶化是裂纹开裂扩展的主要原因。

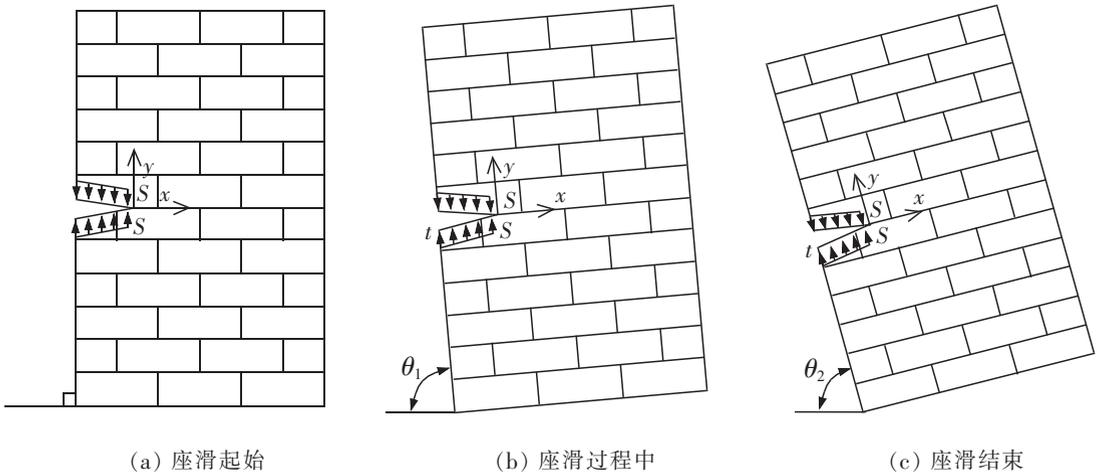


图 6 类砌体型危岩座滑过程中初始裂纹受力分析

Fig.6 Force analysis of initial cracks of unstable rock block during sliding

按能量平衡理论, 封闭体系在任一时刻总的能量是不变的, 变化的主要是能量形式, 即由一种能量形式转化到另一种能量形式。对于类砌体型危岩, 座滑过程中能量也应该满足这种转化平衡关系, 我们以危岩体座滑刚开始和座滑过程中两个时刻为研究点, 建立危岩体系统能量平衡方程。

$$E_{p1} + E_{\varepsilon 1} = E_p + E_{\varepsilon} - \Delta U + Q \quad (12)$$

将重力势能 E_p 、弹性应变能 E_{ε} 、裂纹扩展释放的弹性应变能 ΔU 以及危岩体与母岩(或基座)摩擦产生的热能 Q 分别对角度 θ 求导

$$dE_p = \frac{WH}{2} \sin d\theta \quad (13)$$

$$dE_{\varepsilon} = \left(\frac{W^2 H}{2Eb} - \frac{W^2 H}{8Gb} - \frac{W^2 H^3}{2Eb^3} \right) \sin 2\theta d\theta \quad (14)$$

$$d\Delta U = \frac{\pi G^2 \Delta A a_{ij}}{E} \left[\frac{3F_1 F_2}{b^2} \cos 2\theta + \left(\frac{F_2^2}{H^2} - \frac{9F_1^2 H^2}{4b^4} - \frac{0.56^2}{b^2} \right) \sin 2\theta \right] d\theta \quad (15)$$

$$dQ = \left[\frac{\mu_1 H}{1 + \mu_1 \mu_2} \left[\frac{H}{2} m \omega^2 (\mu_2 \sin \theta_1 \sin \theta + \sin \theta_1 \cos \theta + \mu_2 \cos 2\theta - \sin 2\theta) - W \mu_2 \cos \theta \right] + \frac{\mu_2 H}{1 + \mu_1 \mu_2} \left[\frac{H}{2} m \omega^2 (\mu_2 \cos \theta_1 \cos \theta - \cos \theta_1 \sin \theta + \sin 2\theta - \mu_2 \cos 2\theta) - W \sin \theta \right] \right] d\theta \quad (16)$$

座滑过程中, 类砌体型危岩系统能量方程如下式

$$dV = dE_p + dE_{\varepsilon} + dQ + d\Delta U \quad (17)$$

当 $-(dE_p + dE_{\varepsilon} + dQ) < d\Delta U$, 即 $dV > 0$ 时, 表明系统释放出的能量不足以使裂纹开裂扩展, 类砌体型危岩不发生解体现象; 当 $-(dE_p + dE_{\varepsilon} + dQ) = d\Delta U$, 即 $dV = 0$ 时, 为判断类砌体型危岩发生解体现象的临界条件; 而当 $-(dE_p + dE_{\varepsilon} + dQ) > d\Delta U$, 即 $dV < 0$ 时, 表明系统释放出的能量足以使裂纹开裂扩展, 类砌体型危岩发生解体现象。

4 算列分析

4.1 望霞危岩变形特征

望霞危岩自1999年7—8月首次出现变形以来,先后于2010年8—10月,2011年10月发生过多处失稳现象,其中2011年10月21日凌晨发生的失稳现象最为显著,直接导致W1#危岩体发生崩塌,W2#危岩体暂时处于稳定状态。

纵观危岩地质概况及变形特征,认为望霞W2#危岩在受到地形、地貌;地质构造;地层岩性;降雨及人类工程活动的影响下有再次挤压下部软弱基座导致进一步下挫、偏转的可能,偏转到一定程度后即发生解体现象,且解体呈现突发性。

4.2 望霞W2#危岩突发性解体预测

根据资料绘制W2#危岩剖面图。

危岩体高 $H=70$ m,长约80 m,厚约10~15 m,取平均值 $b=12.5$ m,体积约 7×10^4 m³,倾斜角度 $\theta_1=81^\circ$,危岩单位宽度 $W=28\ 245$ kN,危岩体与后壁及基座摩擦系数 μ_1, μ_2 分别取为0.6,0.5,危岩体弹性模量 $E=35$ GPa,剪切模量 $G=14$ GPa,按文献[8]计算给出的危岩体弹冲速度 $v=3.082\ 3$ m/s,则本文研究对象类砌体型危岩体转动角速度 $\omega=v/R=0.086\ 7$ rad/s。我们认为砌块与砌块间完全断开则产生解体现象,故 $\Delta A=1/2d-a_{ij}=5$ cm。将以上各参数代入式(13)~式(17)得:

$$dE_p = \frac{WH}{2} \cos\theta d\theta = 9.885\ 8 \times 10^5 \cos\theta d\theta;$$

$$dE_\varepsilon = \left(\frac{W^2H}{2Eb} - \frac{W^2H}{8Gb} - \frac{W^2H^3}{2Eb^3} \right) \sin 2\theta d\theta = -1.977\ 5 \times 10^3 \sin 2\theta d\theta;$$

$$d\Delta U = \frac{\pi G^2 \Delta A a_{ij}}{E} \left[\frac{3F_1 F_2}{b^2} \cos 2\theta + \left(\frac{F_2^2}{H^2} - \frac{9F_1^2 H^2}{4b^4} - \frac{0.56^2}{b^2} \right) \sin 2\theta \right] d\theta = (1.1 \cos 2\theta - 24.8 \sin 2\theta) \times 10^3 d\theta;$$

$$dQ = \left\{ \begin{aligned} & \frac{\mu_1 H}{1 + \mu_1 \mu_2} \left[\frac{H}{2} m \omega^2 (\mu_2 \sin \theta_1 \sin \theta_1 + \sin \theta_1 \cos \theta + \mu_2 \cos 2\theta - \sin 2\theta) - W \mu_2 \cos \theta \right] \\ & + \frac{\mu_2 H}{1 + \mu_1 \mu_2} \left[\frac{H}{2} m \omega^2 (\mu_1 \cos \theta_1 \cos \theta - \cos \theta_1 \sin \theta + \sin 2\theta - \mu_2 \cos 2\theta) - W \sin \theta \right] \end{aligned} \right\} d\theta;$$

$$= [-(7.517\ 1 \sin \theta + 4.306\ 9 \cos \theta) \times 10^5 + (2.000\ 7 \cos 2\theta - 4.001\ 3 \sin 2\theta) \times 10^3] d\theta$$

$$dV = dE_p + dE_\varepsilon + dQ + d\Delta U = [(5.578\ 9 \cos \theta - 7.517\ 1 \sin \theta) \times 10^5 + (3.100\ 7 \cos 2\theta - 30.778\ 8 \sin 2\theta) \times 10^3] d\theta$$

考虑到类砌体型危岩体偏转过程中倾角 θ 逐渐减小,故 $d\theta < 0$,不妨令 $d\theta = -1$,将 $dV = dV(\theta)$ 在 Matlab 中以曲线图的形式绘出,如图7示。按上节建立的类砌体型危岩体突发性解体能量判据:当 $dV < 0$ 时,表明系统释放出的能量足以使裂纹开裂扩展,类砌体型危岩发生解体现象,结合图7可知,当类砌体型危岩偏转到倾角为 34° 时即发生解体现象。

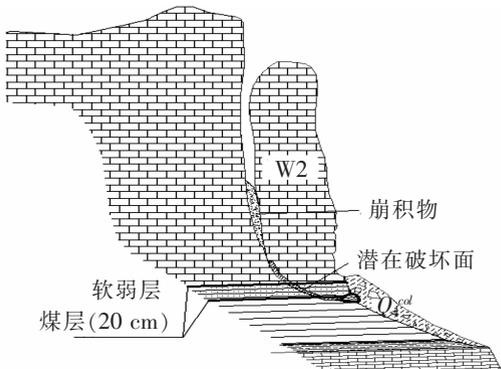


图7 望霞危岩剖面图

Fig.7 Cross-section of Wangxia unstable rock block

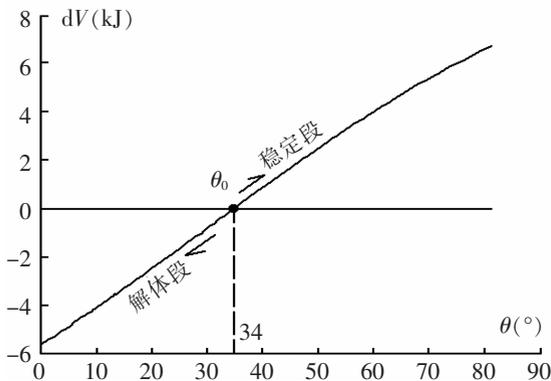


图8 系统能量增量曲线

Fig.8 System energy increment curve

5 结论及建议

野外地质调查发现类砌体型危岩座滑过程中的解体现象明显,有时呈现局部解体,有时呈现突发性解体、垮塌,本文将危岩体视为一能量体系,从能量角度探究类砌体型危岩座滑过程中的突发性断裂解体现象,主要结论如下:

1) 类砌体型危岩座滑过程中体系内能量发生变化,初始裂纹面上受力由简单压缩向压缩、剪切演化,并最终发展为拉伸、剪切,初始裂纹面上拉伸、剪切应力达到一定程度后即发生开裂、扩展,进而演化为解体,且常常表现为突发性。

2) 依据类砌体型危岩系统能量方程,构建了危岩体解体与否的判据,即:当 $dV>0$ 时,类砌体型危岩不发生解体现象;当 $dV=0$ 时,为判断类砌体型危岩发生解体现象的临界条件;当 $dV<0$ 时,类砌体型危岩发生解体现象。以望霞 W2# 危岩为例,预测该危岩体偏转到倾角为 34° 时可能发生解体。

本文将类砌体型危岩座滑过程简化为一个刚体偏转过程,但危岩体发生座滑主要原因还是基座底软弱层受压缩,关于这一点本文未做深入研究,后期将开展软弱基座压缩变形机理研究,以期进一步揭示灰岩地区类砌体型危岩座滑解体的本质。

参考文献:

- [1] 陈洪凯,鲜学福,唐红梅. 石质山区崩塌灾害形成机制—以四面山国家级风景名胜区红岩山为例[J]. 四川大学学报:工科版, 2010,42(3):1-6.
- [2] CHEN H K,TANG H M, YE S Q. Damage model of control fissure in perilous rock [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006,27(7):967-974.
- [3] 张永兴,卢黎,张四平,等. 差异风化型危岩形成和破坏机理[J]. 土木建筑与环境工程,2010,32(2):1-6.
- [4] 杨锡武,易志坚. 基于离心模型试验和断裂理论的加筋边坡合理布筋方式研究[J]. 土木工程学报,2002,35(4):59-64.
- [5] 易志坚,王士杰,王向坚. II型平面应力裂纹线场的弹塑性精确解[J]. 应用数学和力学,1995,16(10):909-916.
- [6] FRAYSSINES M,HANTZ, D. Modelling and back-analysing failures in steep lime-stone cliffs[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2009,46(7):1115-1123.
- [7] 于明明,贾志献,李小雪. 基于悬臂梁力学模型分析高边坡危岩体的稳定性—以四川省三清村高边坡 W1 危岩体为例[J]. 安全与环境工程,2012,19(1):117-123.
- [8] 张瑞刚. 危岩突发性失稳机制研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2012.

Energy Solution for Sudden Fracture of Quasi-masonry Unstable Rock Block in Limestone Area During Sliding

Wang Xiaowei, Li Hongmei

(Road and Bridge Engineering Department, Jiangxi V&T College of Communication, Nanchang 330013, China)

Abstract: Field geological investigation shows that the unstable rock block collapse in limestone area is different from that of sandstone area. When disintegration occurs, the disintegration phenomenon is obvious, and the collapse disaster often features large areas of damage and may yield a significant air cushion effect. The rock mass structure of unstable rock block in limestone area is the main cause of the above phenomenon. In this paper, the energy equation of a type of unstable rock block system was established based on the fracture model of a type of masonry unstable rock block. The fracture mechanics method and the energy conservation principle were adopted, the criterion of disintegration or failure of rock mass was put forward, and the sudden fracture in the course of sliding of rock block was explained from the angle of energy, and the deflection angle of W2 was predicted to be 34° . The research results of this paper provide a scientific basis for scientific assessment of the stability of unstable rock block, which has great theoretical and practical significance.

Key words: unstable rock block in limestone area; quasi-masonry structure; breakup of block sliding; system energy equation; criterion of sudden breakup