

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2019.05-07

基于最大周向应力准则的滑塌式危岩稳定性分析

肖圣亮

(江西省铅山县水利局, 江西 铅山, 334500)

摘要:我国山地地形分布广泛,山体危岩崩塌是山区的主要地质灾害之一.为了研究不同裂缝角度、水平地震力和垂直地震力等因素对危岩体安全系数的影响规律,运用最大周向应力准则对贵州高原与四川盆地交接地带的赤水河深切“V”型河谷的某危岩体进行稳定性分析,得出如下结论:危岩体安全系数随着裂缝角度的增大而减小,但在裂缝角度小于 55° 时,危岩体安全系数减小速度较快,裂缝角度大于 55° 时,安全系数减小速度较慢;危岩体安全系数随水平地震系数或垂直地震系数的增大而减小,且为线性减小趋势;水平地震力对危岩体的危害程度高于相等大小下的垂直地震力.

关键词:滑塌式危岩;最大周向应力准则;安全系数;裂缝角度;地震力

中图分类号:P642 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4701(2019)05-0346-06

0 引言

危岩是指位于陡崖或陡坡上被多组岩体结构面结合,由于重力、地震、水体等因素诱发处于不稳定的结构体及组合^[1].我国幅员辽阔,地质环境复杂,三分之二的国土面积为山区^[2],危岩滑塌灾害较易发生.目前,国内外对危岩的概念有一定的差异,具体名称有“崩塌”、“落石”和“危岩”,都是从发育和失稳模式来定义的^[3-4].危岩崩塌具有不确定性,灾害发生较为迅速,在极短时间内造成较大的危害.随着我国大量基础设施和库区移民工程的兴建,危岩崩塌灾害成为灾害防治不可忽略的重要部分,危岩对山体斜坡下方居民的生命财产安全以及道路交通均存在较大威胁,因此对危岩体进行稳定性分析显得尤为重要.

近些年来,国内外学者对于危岩破坏前的力学机制及破坏机理的研究取得了一定的成果.陈洪凯等^[5-6]以极限平衡理论为基础,建立了危岩稳定性计算公式,构建了危岩稳定性评价方法;随着计算机的发展,数值模拟方法也逐渐被广泛使用,刘明星等^[7]通过运用FLAC方法对地震荷载下含单一顺坡向危岩体的破坏

行为进行模拟,所得结果比刚体极限平衡法更贴合实际;但大量的工程实践表明上述方法存在一定的缺陷,极限平衡法计算结果与工程实际存在较大的误差,数值模拟有时不能真正模拟实际工程状态.不过近几年来,在岩土工程领域,随着断裂力学的快速发展,其在岩石工程领域的运用愈发广泛,断裂力学的概念常被引入高陡岩石边坡的危岩稳定性判别当中,王林峰等^[8]利用最大周向应力理论得出了危岩主控结构面应力强度因子和断裂角的计算公式.

最大周向应力准则作为判别危岩稳定性的断裂力学方法之一,由于其具有相对于现有规范法计算显示的危岩稳定状态更为敏感、易于工程判别等优点^[9],被众多学者用来预测危岩的断裂破坏.笔者在此运用最大周向应力准则对典型的滑塌式危岩进行分析,通过计算不同裂缝角度、水平地震力、垂直地震力相对应的危岩体安全系数,探究这几种因素对危岩体安全系数的影响规律.

1 最大周向应力准则

最大周向应力准则认为,危岩体裂缝总是沿着最

收稿日期:2019-04-22

作者简介:肖圣亮(1983-),男,大学本科,工程师.

大拉应力的方向进行开裂,其裂缝条件满足以下方程:

$$\frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial^2 \sigma_{\theta}}{\partial \theta^2} < 0 \quad (1)$$

沿着裂缝方向的等效应力强度因子 K_e 可表示为:

$$K_e = \frac{1}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} [K_{I} (1 + \cos \theta_0) - 3K_{II} \sin \theta_0] \quad (2)$$

式中, K_{I} 为第一类断裂强度因子, K_{II} 为第二类断裂强度因子, θ_0 为开裂角。

θ_0 可由式(1)推出,表示如下:

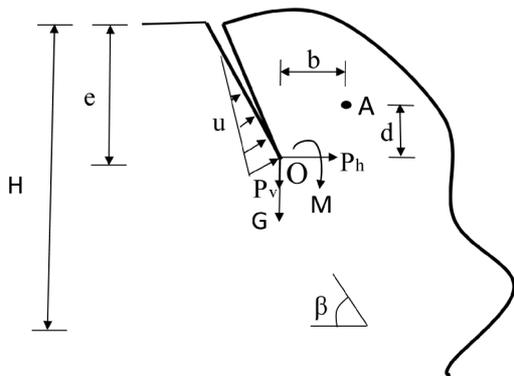
$$\theta_0 = 2 \arctan \frac{1 - \sqrt{1 + 8(K_{II}/K_{I})^2}}{4(K_{II}/K_{I})} \quad (3)$$

根据第一类断裂强度因子 K_{I} 和第二类强度因子 K_{II} , 将(3)式带入(2)式中可求得等效应力强度因子 K_e , 则由危岩体岩石的断裂韧度 K_{Ic} 和等效应力强度因子 K_e 可将危岩体安全系数的断裂力学表达式定义如下:

$$F_s = \frac{K_{Ic}}{K_e} \quad (4)$$

2 危岩应力强度因子分析

根据陈洪凯等^[9]的研究结果,危岩主要分为 3 类:滑塌式危岩、坠落式危岩和倾倒式危岩。本文主要针对滑塌式危岩进行分析,将危岩实际所受荷载平移到裂缝尖端 O 处,滑塌式危岩简化模型如图 1 所示。



O 是裂纹尖端, H 为危岩体平均高度, e 是垂直裂缝高度, β 为平均倾角, G 是危岩体单位长度重量, d 是裂缝尖端到重心的垂直距离, b 是裂缝尖端到重心的水平距离, P_v 和 P_h 是单位长度的垂直地震力和水平地震力, u 是裂缝表面的水压力。

图 1 滑塌式危岩裂缝简化模型

将 G 、 P_v 和 P_h 沿裂缝面进行分解, 分别得到切向力 T 和法向力 N 如下:

$$T = (G + P_v) \sin \beta + P_h \cos \beta \quad (5)$$

$$N = P_h \sin \beta - (G + P_v) \cos \beta \quad (6)$$

当裂缝尖端 O 低于重心 A 时, 裂缝尖端的力矩可表示为:

$$M = (G + P_v) b + d P_h \quad (7)$$

当裂缝尖端 O 高于重心 A 时, 裂缝尖端的力矩可表示为:

$$M = (G + P_v) b - d P_h \quad (8)$$

综合公式(5)~(8), 则可将 G 、 P_v 和 P_h 表示如下:

$$G = \gamma V \quad (9)$$

$$P_h = \mu_h \gamma V \quad (10)$$

$$P_v = \mu_v \gamma V \quad (11)$$

式中: γ 为危岩体的容重, V 为单位长度危岩体积, μ_h 是水平地震系数, μ_v 是竖向地震系数。

危岩的破坏过程实际上是裂缝结构面在荷载组合下发生的裂缝扩展, 依据断裂力学理论, 可将危岩稳定性分析转化为断裂模型的分析, 其中断裂模型如图 2 所示, 将其进行受力分解同时将强度因子进行叠加。对于图 2(a), 假定裂隙水压力在裂缝结构面贯通并均布, 则其强度因子可由下式表示:

$$K_{II} = F_1 \left(\frac{e_1}{h} \right) \bar{u} \sqrt{\pi d_0} \quad (12)$$

图 2(b) 表示的是剪切力, 其强度因子可由下式表示:

$$K_{II} = F_1 \left(\frac{e}{h} \right) \bar{u} \sqrt{\pi d_0} \quad (13)$$

图 2(c) 表示的是弯矩, 其强度因子可由下式表示:

$$K_{I2} = F(x) \sigma_{\max} \sqrt{\pi d_0} \quad (14)$$

图 2(d) 表示的是拉应力, 其强度因子可由下式表示:

$$K_{I3} = F_3 \left(\frac{e}{h} \right) \sigma \sqrt{\pi d_0} \quad (15)$$

对于式(12)~(15), 其中, $F_1(e/h)$ 、 $F_2(e/h)$ 、 $F_3(e/h)$ 和 $F(x)$ 为形状系数, e_1 为裂隙水充填高度, 暴雨状态 $e_1 = 2e/3$, 天然状态 $e_1 = e/3$ ^[10]。其它变量的表达式如下:

$$d_0 = \frac{e}{\sin \beta_1} \quad (16)$$

$$\bar{u} = \gamma_w e_1 \quad (17)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{6M}{h^2} \quad (18)$$

$$\sigma = \frac{N \sin \beta_1}{h} \quad (19)$$

依据断裂力学理论并按照强度因子叠加法，危岩裂缝结构面的 I 型应力强度因子可表示如下：

$$K_I = K_{I1} + K_{I2} + K_{I3} \quad (20)$$

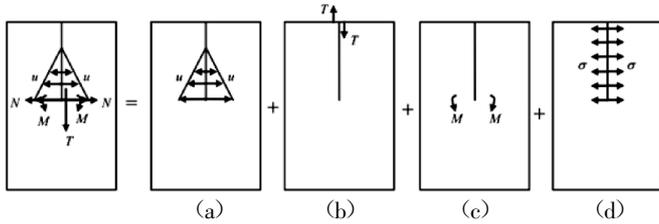


图2 断裂模型

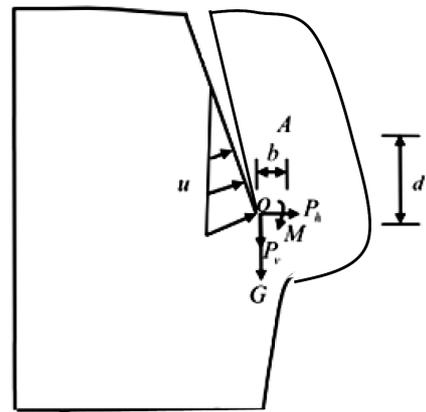


图3 W26 危岩简化模型

3 算例及计算方案

3.1 工程概况

位于贵州高原与四川盆地交接地带的赤水河属于深切“V”型河谷，河谷两岸分布有较多的陡峭岩石边坡，该区域内危岩体发育密集，岩体主要由花岗岩组成，可将其视为脆性材料，本次研究对象为 W26 危岩体，危岩体积约为 640m³(17.6m×7.5m×3.6m)，重达 1 230t。该危岩的简化模型如图 3 所示，其具体参数分别如下：单位长度质量为 187t，岩石的黏聚力 $c_1=325\text{kPa}$ ，岩石的内摩擦角 $\varphi_1=42^\circ$ ，裂缝面的黏聚力 $c_2=52\text{kPa}$ ，裂缝面的内摩擦角 $\varphi_2=27^\circ$ 。

3.2 荷载计算

3.2.1 荷载类型

所要考虑的危岩体上的荷载主要包括以下 4 个部分：

- (1)危岩体的自重：危岩体的体积与天然容重的乘积。
- (2)裂隙水压力：主要考虑静水压力的影响，天然状态下裂隙充水高度取裂缝长度的三分之一，暴雨状态下裂隙充水高度取裂缝长度的三分之二。

(3)水平地震力：假定其作用在危岩体重心位置，为水平地震系数与危岩体自重的乘积。

(4)垂直地震力：假定其作用在危岩体重心位置，为垂直地震系数与危岩体自重的乘积。

3.2.2 荷载组合

本文主要考虑 4 种荷载组合(工况)：

工况一：自重+天然状态下的裂隙水压力。

工况二：自重+暴雨状态下的裂隙水压力。

工况三：自重+天然状态下的裂隙水压力+地震力。

工况四：自重+暴雨状态下的裂隙水压力+地震力。

对于滑塌式危岩 4 种工况均要考虑，其中工况四主要是针对处于特大型水利工程区或者强烈度地震区的防治工程。

3.3 计算方案

为了研究危岩裂缝角度、水平地震力、垂直地震力对其安全系数的影响规律，运用极限平衡法分别计算不同影响因素下危岩的安全系数，计算方案如表 1、表 2 和表 3 所示。

表 1 裂缝角度计算方案

裂缝角度 $\beta/^\circ$	水平地震系数	垂直地震系数	计算工况
25°	0.05	0.05	工况一、工况二、工况三、工况四
35°	0.05	0.05	工况一、工况二、工况三、工况四
45°	0.05	0.05	工况一、工况二、工况三、工况四
55°	0.05	0.05	工况一、工况二、工况三、工况四
65°	0.05	0.05	工况一、工况二、工况三、工况四
75°	0.05	0.05	工况一、工况二、工况三、工况四

注：工况一与工况二不考虑地震力，工况三与工况四按照表中地震系数计算地震力。

表 2 垂直地震力计算方案

水平地震系数	垂直地震系数	裂缝角度 $\beta/^\circ$	计算工况
0.05	0.10	45°/75°	工况三、工况四
0.10	0.10	45°/75°	工况三、工况四
0.15	0.10	45°/75°	工况三、工况四
0.20	0.10	45°/75°	工况三、工况四
0.25	0.10	45°/75°	工况三、工况四
0.30	0.10	45°/75°	工况三、工况四

表 3 水平地震力计算方案

垂直地震系数	水平地震系数	裂缝角度 $\beta/^\circ$	计算工况
0.05	0.10	45°/75°	工况三、工况四
0.10	0.10	45°/75°	工况三、工况四
0.15	0.10	45°/75°	工况三、工况四
0.20	0.10	45°/75°	工况三、工况四
0.25	0.10	45°/75°	工况三、工况四
0.30	0.10	45°/75°	工况三、工况四

4 结果及分析

4.1 裂缝角度对危岩体安全系数的影响

在实际工程中，危岩体中存在的裂缝角度通常是不相同的，为了探究不同裂缝角度对安全系数的影响规律，依据算例中危岩体参数，假定其具有不同的裂缝角度，按照表 1 的计算方案，分别计算其相对应的安全系数，得到安全系数-裂缝角度关系曲线如图 4 所示。

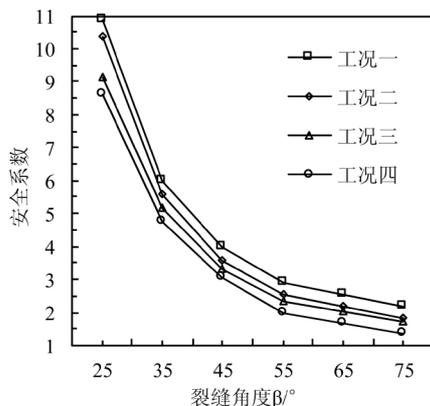


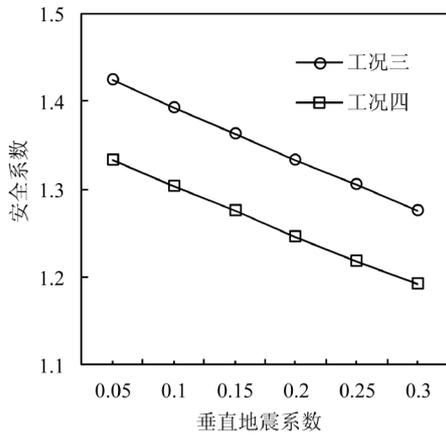
图 4 裂缝角度与安全系数关系曲线

由图 4 可知，在工况一至工况四这 4 种计算条件下，危岩体安全系数均随着裂缝角度的增大而减小。本文研究对象 W26 危岩属于滑塌式危岩，危岩体安全系数主要有两个因素控制：抗剪强度和裂缝结构面上的剪切力，裂缝结构面上的剪切力随着裂缝角度的增大而增大，但抗剪强度却随着裂缝角度的增大而减小，危岩体安全系数在两个因素综合影响下随着裂缝角度的增大而减小，随着裂缝角度不断增大，最终剪切力将大于抗剪强度致使危岩发生崩塌破坏。在裂缝角度小于 55°时，危岩体安全系数减小速率较快；裂缝角度大于 55°时，安全系数-裂缝角度关系曲线趋于平缓，安全系数减小较为缓慢。当危岩体裂缝角度较小时，岩体结构处于稳定状态，安全系数较大；随着裂缝角度的增大，岩体由稳定状态向失稳状态过渡，其安全系数迅速减小；当裂缝角度增大到一定程度，岩体趋于失稳。在计算工况一条件下危岩体安全系数最高，工况四条件下危岩体安全系数最低。这是因为工况四同时考虑了暴雨和地震因素，在暴雨条件下，不利于岩体稳定的静水压力增大，同时降雨水体能够软化结构面裂隙中的填充物，带走细颗粒物导致岩体稳定性降低；地震因素

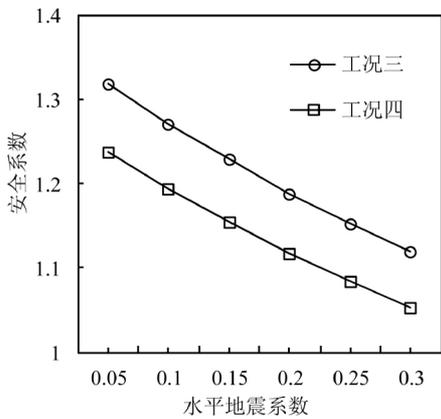
则使岩体结构造成损伤,进而使岩体稳定性降低。

4.2 垂直地震力对危岩体安全系数的影响

地震因素是危岩体失稳的重要因素之一,其中垂直地震力以纵波的形式传播,为研究垂直地震力对危岩体安全系数的影响规律,按照表2计算方案,分别计算不同工况下的安全系数。得到安全系数-垂直地震系数关系曲线如图5所示。



(a) $\beta=45^\circ$



(b) $\beta=75^\circ$

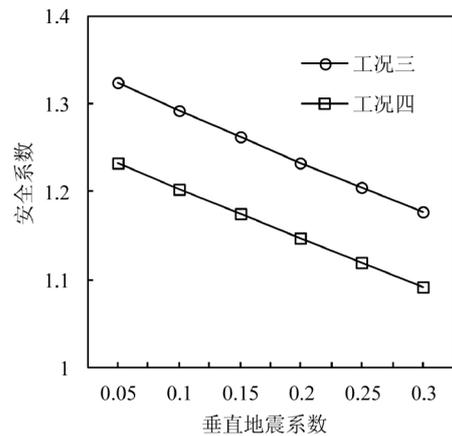
图5 垂直地震系数与安全系数关系曲线

由图5可知,在均考虑地震因素的工况三与工况四两种荷载组合下,危岩体安全系数随着地震力的增大基本呈现线性减小趋势,图5(a)和图5(b)分别表示危岩体在裂缝倾角为 45° 和 75° 两种情况下安全系数随垂直地震力的变化规律,将两图进行对比可知,在相同大小的垂直地震力影响下,裂缝倾角为 75° 条件下的安全系数小于裂缝倾角为 45° 条件下的安全系数,说明安全系数随着裂缝倾角的增大而减小,结论和上文的研究规律相吻合。

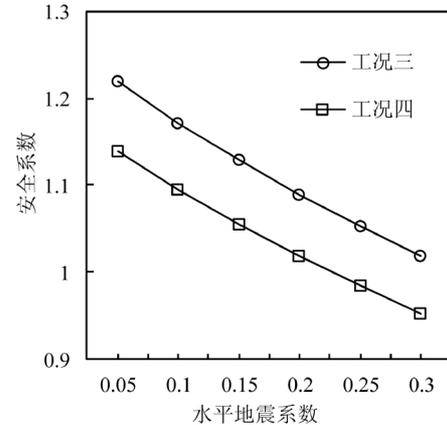
将图5和图4进行对比后可得:虽然安全系数均随着垂直地震力或水平地震力的增大而减小,但是水平地震力影响下的危岩体安全系数小于同等大小的垂直地震力作用下的危岩体安全系数,即水平地震力对危岩体的危害程度高于同一地震系数下的垂直地震力,水平地震力是造成危岩边坡破坏的主要因素。

4.3 水平地震力对危岩体安全系数的影响

为研究水平地震力对危岩体安全系数的影响规律,按照表3计算方案,分别计算不同工况下的安全系数。得到安全系数-水平地震系数关系曲线如图6所示。



(a) $\beta=45^\circ$



(b) $\beta=75^\circ$

图6 水平地震系数与安全系数关系曲线

由图6可知,在工况三和工况四两种条件下,危岩体安全系数均随水平地震系数的增大而减小,且为线性减小趋势;在工况四条件下危岩体安全系数小于工况三条件下安全系数。水平地震力以横波的形式进行传播,使岩体左右摇晃,其中指向坡外的水平地震力易使岩体失稳破坏。图6(a)和图6(b)分别表示危岩体在

裂缝倾角为 45° 和 75° 两种情况下安全系数随垂直地震力的变化规律,将两图进行对比可知,在相同大小的水平地震力影响下,裂缝倾角为 75° 条件下的安全系数小于裂缝倾角为 45° 条件下的安全系数,说明安全系数随着裂缝倾角的增大而减小,结论和上文的研究规律相吻合。

5 讨论

前文对最大周向应力准则进行了介绍,并将不同影响因素对安全系数的影响进行了计算分析。对危岩进行稳定性分析的方法除了本文介绍的最大周向应力准则之外,最大剪应力准则也是属于断裂力学范畴的一种判断危岩稳定性的方法,这种方法主要是考虑了剪应力的影响^[4]。极限平衡法作为一种传统的判定危岩稳定性的方法也被广泛运用,为了进一步对比这几种计算方法,分别运用这3种方法对裂缝角度为 55° 以及水平地震系数和垂直地震系数均为0.05的4种工况进行计算,计算结果如表4所示。

表4 计算结果

计算工况	最大周向应力准则 稳定性系数	最大剪应力准则 稳定性系数	极限平衡法 稳定性系数
工况一	2.18	2.34	2.41
工况二	1.74	2.04	2.13
工况三	1.19	1.32	1.45
工况四	1.16	1.36	1.40

从表4结果可以看出,无论是哪种工况,几种方法所得出的危岩安全系数相差不大,说明本文所介绍的危岩稳定性判定方法较为合理。同时可以看出运用最大周向应力准则所计算出的稳定性系数均小于最大剪应力准则和极限平衡法计算出的稳定性系数,即本文介绍的方法计算出的稳定性系数更加保守,保守的稳定性系数有利于实际工程中对危岩进行及时的维护和治理。也反映了运用最大周向应力准则的方法与其他两种方法相比具有更为客观、敏感,易于判断的优点。

6 结论

通过采用最大周向应力准则对贵州高原与四川盆

地交接地带的赤水河深切“V”型河谷的某危岩体分别在裂缝角度、垂直地震力、水平地震力不同影响因素下的安全系数进行计算,得出如下结论:

(1) 危岩体安全系数随着裂缝角度的增大而减小,在裂缝角度小于 55° 时,危岩体安全系数减小速度较快;裂缝角度大于 55° 时,安全系数减小速度较为缓慢。

(2) 危岩体安全系数随水平地震系数或垂直地震系数的增大而减小,且为线性减小趋势。

(3) 水平地震力对危岩体的危害程度高于同一地震系数下的垂直地震力,水平地震力是造成危岩边坡破坏的主要因素。

(4) 最大周向应力准则的方法与其他方法相比具有更为客观、敏感,易于判断的优点,有利于实际工程中对危岩进行及时的维护和治理。

参考文献:

- [1] 范秋雁, 陆明, 吴福. 危岩研究新进展 [J]. 西部探矿工程, 2017, 29(12): 4-7.
- [2] 梁炯, 许蛟, 谢忠胜, 等. 平推滑坡式危岩崩塌诱因机制及防治措施[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(07): 36-40.
- [3] 姚国专, 蔡德钧, 闫宏业, 等. 危岩稳定状态评价方法[J]. 铁道建筑, 2015(10): 126-131.
- [4] 刘卫华, 黄润秋. 危岩稳定性定量评价研究 [J]. 路基工程, 2014(6): 51-57.
- [5] 陈洪凯, 鲜学福, 唐红梅. 危岩稳定性分析方法[J]. 应用力学学报, 2009, 26(2): 278-282.
- [6] CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei. Calculation method of stability efficient of perilous rock based on the limit equilibrium theory [J]. Information Computing and Applications, 2010, 106(2): 88-95.
- [7] 刘明星, 刘恩龙, 张世殊. 地震荷载下危岩体边坡动力响应及失稳机理探讨[J]. 工程地质学报, 2016, 24(2): 187-196.
- [8] 王林峰, 陈洪凯, 唐红梅. 基于断裂力学与最优化理论的危岩稳定可靠性时效计算方法 [J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(4): 68-72.
- [9] 吴永, 何思明, 李新坡. 裂缝冰胀力作用下高寒危岩体失稳破坏机理[J]. 四川大学学报, 2015, 47(6): 32-39.
- [10] 袁建新. 岩体损伤问题[J]. 岩土力学, 1993, 14(1): 1-31.
- [11] 周云涛. 三峡库区危岩稳定性断裂力学计算方法 [J]. 岩土力学, 2016(s1): 495-499.

编辑: 张绍付

(下转第390页)