

# 考虑地震力方向的倾倒式危岩可靠度分析\*

唐红梅, 舒庆江, 王林峰

(重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

**摘要:** 侧向卸荷作用导致高陡边坡发育大量危岩体,危岩体在降雨、地震作用下易发生失稳破坏,判断其失稳的概率对危岩防治具有重要意义.该文以倾倒式危岩体为例,建立了考虑地震力作用方向下最危险方向的物理力学模型,利用函数极值理论建立了最危险地震力作用方向的表达式,结合可靠度理论建立了倾倒式危岩体可靠度指标、失稳概率表达式及判断标准.通过对重庆南川金佛山危岩体案例的分析表明:工况1的最危险地震力作用方向与水平方向的偏转角 $\theta$ 在 $5^\circ$ 范围内,工况2的最危险地震力作用方向与水平方向的偏转角 $\theta$ 在 $10^\circ$ 左右;危岩体最危险作用方向不是一个固定角,其值与危岩体形态、裂隙水作用力大小、岩腔深度等有关,当主控结构面裂隙长度较小时,最危险地震力作用方向与水平夹角很小,随主控结构面裂隙长度增大,最危险地震力作用方向与水平夹角显著增大;危岩体失稳概率随主控结构面裂隙长度增加而增大,工况2较工况1增大幅度更明显.该研究成果对危岩的防灾减灾具有重要意义.

**关键词:** 倾倒式危岩; 地震力方向; 可靠度; 失稳概率

**中图分类号:** O312; O317

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.21656/1000-0887.400057

## 引 言

陡倾斜坡中危岩体崩塌失稳破坏小至孤石,大至数千立方米危岩块体,是我国主要地质灾害类型之一.目前危岩失稳按形式分为滑塌式、倾倒式、坠落式3种类型<sup>[1]</sup>.危岩崩塌失稳具有突发性、偶然性、致灾严重性等特点.危岩体在降雨与地震力作用下易发生崩塌,因此综合考虑降雨与地震力作用分析危岩体稳定性是目前研究热门问题之一<sup>[2]</sup>.

陡倾斜坡岩层倾角常大于 $80^\circ$ ,边坡在卸荷作用下易产生近垂直陡倾结构面,当危岩体下部有较小岩腔时易在外力作用下产生倾倒式破坏.目前对倾倒式危岩体研究主要通过其受力特点,建立相应力学模型分析其稳定性.苏天明等<sup>[3]</sup>分析了边坡演化过程中风化岩腔形成对危岩体的影响,模拟分析了岩腔形成中的应力分布与特征并推导了拉裂型崩塌岩体失稳判据;王根龙等<sup>[4]</sup>根据悬臂梁最大弯曲应力计算理论,推导出岩腔极限深度计算公式,并根据最大拉应力-抗拉强度比值分析法,推导出悬臂梁危岩体稳定系数计算公式;陈健云等<sup>[5]</sup>根据透射系数的表达式分别探讨固体介质的弹性模量、密度、Poisson比以及入射角度对透射系数的影响

\* 收稿日期: 2019-02-25; 修订日期: 2019-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(51678097;51378521)

作者简介: 唐红梅(1968—),女,研究员,博士,博士生导师(通讯作者. E-mail: hmtang6778@sina.com).

引用格式: 唐红梅,舒庆江,王林峰.考虑地震力方向的倾倒式危岩可靠度分析[J].应用数学和力学,2020,41(3):319-328.

规律,并定性分析其对倾倒式危岩体稳系数的影响;周云涛等<sup>[6]</sup>基于岩腔平行后退理论,提出了岩腔泥岩后退的剪切破坏和拉破坏力学机制,考虑岩腔后退参数提出了倾倒式危岩体稳定性计算方法;Liu等<sup>[7]</sup>基于极限平衡理论,提出了岩质边坡倾倒破坏分析的传递系数法,为边坡岩体块体倾倒提供了快速有效的计算方法;陈维等<sup>[8]</sup>利用岩石强度理论推导出研究区砂岩的二次抛物线型 Mohr 强度包络方程,建立了倾倒式危岩崩塌破坏判别式,并利用弯曲-拉裂模型研究其破坏模式;Wu<sup>[9]</sup>通过进行 DDA 地震荷载输入对比研究,发现在危岩崩塌时岩体在空中运动阶段不受地震荷载作用;何强等<sup>[10]</sup>分析了拉剪倾倒型危岩失稳影响因素研究.关于地震力作用对危岩失稳破坏的影响,刘海军等<sup>[11]</sup>考虑地震力作用方向对滑塌式危岩体受力分析,并推导地震最危险作用方向公式,发现地震动峰值加速度与水平面夹角成反比;薛新华等<sup>[12]</sup>考虑水平地震作用力下倾倒式危岩的动力响应规律与稳定性,将倾倒式危岩运动分为危岩启动、倾倒、翻滚、减速阶段;张海娜等<sup>[13]</sup>对块状-弯曲倾倒破坏的边坡进行在地震作用下的稳定性分析,研究表明在地震力作用下边坡相邻的部分岩体会在滑移破坏与倾倒破坏中相互转化,切坡角增加时,边坡岩体更易发生倾倒破坏;刘才华等<sup>[14]</sup>采用传递系数法分析了地震作用下边坡块体的受力解析式,并研究了地震作用力方向对边坡块体倾倒的影响.针对采用可靠度理论研究稳定性问题,刘俊卿等<sup>[15]</sup>运用模糊数学理论,将弯沉值作为控制指标获得了结构模糊可靠度计算模式,并结合相关验算发现模糊可靠度总是低于传统可靠度;Duzgun等<sup>[16]</sup>运用 Barton-Bandis 强度准则与统计学方法对挪威西海岸一岩质边坡进行稳定性概率分析评估;靳红华等<sup>[17]</sup>基于极限平衡原理,结合可靠度分析,建立了涂山湖覆盖型岩溶塌陷模型,定性分析其稳定性,并得出各崩塌因素对岩溶塌陷失稳影响规律;杜毅等<sup>[18]</sup>以滑塌式危岩为例进行断续结构面下危岩体稳定可靠度分析,得出危岩体的连通率与未贯通段黏聚力是影响危岩体可靠度的主导因素;杨智翔等<sup>[19]</sup>通过可靠度理论发现危岩体的稳定主导因素依次为主控结构面倾角、结构面等效抗剪强度.

目前对滑塌式破坏危岩已有较多研究,但针对倾倒式危岩在考虑地震作用力方向上的可靠度分析尚未见研究.地震作用本质上属于一系列地面加速度的输入,而加速度本身为一矢量,在考虑地震作用力时,地震作用力方向能更准确地评价危岩体稳定性.本文针对倾倒式危岩建立考虑地震作用力方向的力学模型,推导最危险地震作用方向计算式,并利用可靠度理论建立了其失稳概率表达式和稳定性评判标准,结合算例分析研究倾倒式危岩体获取地震力作用最危险方向、稳定性及失稳概率,为倾倒式危岩体预测提供理论依据.

## 1 考虑地震作用方向的理论计算模型

以危岩体重心在倾覆点内侧的倾倒式危岩体为例进行受力分析(图 1).其中地震作用力方向  $P$  与水平方向(指向坡外)夹角为  $\theta$ (按逆时针方向转动为正,即  $\theta$  取值范围为  $0^\circ \sim 360^\circ$ ).

图 1 中,  $l_b$  为主控结构面底端到岩腔边界距离, m;  $a$  为重心到岩腔边界水平距离, m;  $h_0$  为重心到基座距离, m;  $e$  为主控结构面长度, m;  $e_1$  为主控结构面充水高度, m;  $Q$  为危岩体裂隙水压力, kN;  $H$  为危岩体高度, m;  $\alpha$  为主控结构面倾角;  $W$  为危岩体重量, kN;  $\theta$  为地震力与水平方向夹角;  $P$  为作用于危岩体的地震力, kN.

在地震力作用下,作用于危岩体上的地震作用力对危岩体起倾覆作用,危岩体可能绕倾覆点  $T_0$  倾倒破坏失稳,倾覆力矩为

$$M_{\text{qt}} = Ph_0 \cos \theta + Q \left( \frac{e_1}{3 \sin \alpha} + \frac{H - e}{\sin \alpha} + l_b \cos \alpha \right), \quad (1)$$

抗倾覆力矩为

$$M_{kq} = (W - P \sin \theta) a + f_{lk} \frac{H - e}{\sin \alpha} \left( \frac{H - e}{2 \sin \alpha} + l_b \cos \alpha \right) + 0.5 l_b^2 f_{0k}, \quad (2)$$

危岩体稳定系数为

$$F_s = \frac{(W - P \sin \theta) a + f_{lk} \frac{H - e}{\sin \alpha} \left( \frac{H - e}{2 \sin \alpha} + l_b \cos \alpha \right) + 0.5 l_b^2 f_{0k}}{P h_0 \cos \theta + Q \left( \frac{e_1}{3 \sin \alpha} + \frac{H - e}{\sin \alpha} + l_b \cos \alpha \right)}, \quad (3)$$

其中  $P = \beta_H(T) \xi_e W$ ,  $\beta_H(T)$  为地震放大系数值 (取值参见文献[2]),  $\xi_e$  为地震系数;  $f_{lk}$  为危岩体抗拉强度标准值, kPa;  $f_{0k}$  为危岩体与基座间的抗拉强度标准值, kPa, 当基座与危岩体为同种岩石时, 取  $f_{lk} = f_{0k}$ , 当基座为软弱岩层时, 取软弱岩石的抗拉强度标准值。

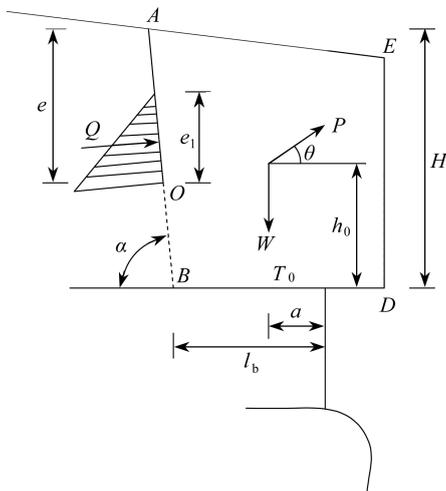


图1 危岩体受力计算模型

Fig. 1 The stress calculation model for a dangerous rock mass

## 2 最危险地震作用方向理论计算

式(3)中危岩体稳定系数  $F_s$  会随着地震作用力方向改变而改变, 在考虑危岩体其他参数不变的情况下, 将  $F_s$  看成关于  $\theta$  的函数, 即  $F_s(\theta)$ , 该函数关于  $\theta$  ( $0^\circ \sim 360^\circ$ ) 为初等函数. 对其求导存在一极值点  $F'_s(\theta) = 0$ , 令

$$\begin{cases} A = W a + f_{lk} \frac{H - e}{\sin \alpha} \left( \frac{H - e}{2 \sin \alpha} + l_b \cos \alpha \right) + 0.5 l_b^2 f_{0k}, \\ B = Q \left( \frac{e_1}{3 \sin \alpha} + \frac{H - e}{\sin \alpha} + l_b \cos \alpha \right). \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3), 并令  $F'_s(\theta) = 0$ , 整理则有

$$A h_0 \sin \theta - B a \cos \theta = P a h_0. \quad (5)$$

式(5)中令  $A h_0 = C$ ,  $-B a = D$ ,  $P a h_0 = E$ , 则有

$$\sqrt{C^2 + D^2} \sin(\theta + \omega) = E. \quad (6)$$

最危险地震力作用方向为

$$\theta = \arcsin \frac{E}{\sqrt{C^2 + D^2}} - \omega, \quad (7)$$

式中  $\tan \omega = \frac{D}{C}$ .

### 3 考虑地震力方向的可靠度计算

可靠度计算分析是用于衡量结构可靠与否,其目的在于得到结构可靠度或失效概率,目前可靠度分析方法主要包括3大类:随机抽样法(Monte-Carlo)、解析式法(一次二阶矩阵、二次二阶矩阵、响应面法等)、随机有限元法,这些方法已运用到工程实践中,并取得了良好的效果.一次二阶矩阵解析式法分为验算点法和中心点法,其中验算点法是目前常用的方法,其功能函数包括线性函数和非线性函数<sup>[20]</sup>.

在危岩体稳定性可靠度评价时,利用一次二阶矩阵验算点法获得稳定性系数  $F_s$  来定量反映其稳定状况.影响危岩稳定性的随机变量较多,假设包含有  $n$  个相互独立的正态随机变量  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , 其均值为  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ , 标准差为  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ , 则功能函数  $Z$  为

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i, \quad (8)$$

式中  $a_0, a_i$  为常数,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

引入基本的参数变量,即倾倒式危岩的抗倾覆力矩  $R$ , 倾覆力矩  $T$ , 建立功能函数为

$$Z = g(T, R) = F_s - 1. \quad (9)$$

当  $Z < 0$  时,倾倒式危岩失效;当  $Z > 0$  时,倾倒式危岩满足正常功能要求;当  $Z = 0$  时,倾倒式危岩为极限状态.功能函数平均值  $\mu_z$ 、标准差  $\sigma_z$ 、可靠度指标  $\beta$  和失效概率  $P_f$  由以下公式计算:

$$\mu_z = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \mu_i, \quad (10)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i \sigma_i)^2}, \quad (11)$$

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \mu_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i \sigma_i)^2}}, \quad (12)$$

$$P_f = P(Z < 0) = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta). \quad (13)$$

通过可靠度指标  $\beta$  与失稳概率指标  $P_f$  来分析稳定性情况,建立倾倒式危岩功能函数为

$$Z = \frac{(W - P \sin \theta) a + f_{lk} \frac{H - e}{\sin \alpha} \left( \frac{H - e}{2 \sin \alpha} + l_b \cos \alpha \right) + 0.5 l_b^2 f_{0k}}{Ph_0 \cos \theta + Q \left( \frac{e_1}{3 \sin \alpha} + \frac{H - e}{\sin \alpha} + l_b \cos \alpha \right)} - 1. \quad (14)$$

在通过式(7)获得倾倒式危岩地震力作用最危险方向后,功能函数  $Z$  中的随机变量  $f_{lk}$  和  $f_{0k}$  满足正态分布,即  $f_{lk} \sim N(\mu_{x_1}, \sigma_{x_1})$ ,  $f_{0k} \sim N(\mu_{x_2}, \sigma_{x_2})$ , 将其他值视为常量,令  $X_1 = f_{lk}$ ,  $X_2 = f_{0k}$ , 对功能函数  $Z$  简化为

$$Z = g(X_1, X_2) = FX_1 + GX_2 + H - 1, \quad (15)$$

式中

$$F = \frac{\frac{H-e}{\sin \alpha} \left( \frac{H-e}{2\sin \alpha} + l_b \cos \alpha \right)}{Ph_0 \cos \theta + Q \left( \frac{e_1}{3\sin \alpha} + \frac{H-e}{\sin \alpha} + l_b \cos \alpha \right)},$$

$$G = \frac{0.5l_b^2}{Ph_0 \cos \theta + Q \left( \frac{e_1}{3\sin \alpha} + \frac{H-e}{\sin \alpha} + l_b \cos \alpha \right)},$$

$$H = \frac{(W - P \sin \theta) a}{Ph_0 \cos \theta + Q \left( \frac{e_1}{3\sin \alpha} + \frac{H-e}{\sin \alpha} + l_b \cos \alpha \right)}.$$

根据式(15)和式(12)得出倾倒式危岩可靠指标和失稳概率为

$$\beta_1 = \frac{FX_1 + GX_2 + H - 1}{\sqrt{(F\sigma_{x_1})^2 + (G\sigma_{x_2})^2}}, \quad (16)$$

$$P_{f_1} = \phi(-\beta_1). \quad (17)$$

危岩稳定性分析目前主要通过计算出稳定系数与规范的安全系数比较来判断危岩体稳定状态.根据本方法通过计算获得的危岩失稳概率,还未有相应的规范评价标准,目前借用张倬元等的研究将边坡的失稳概率分为5个等级<sup>[21]</sup>(表1),其失稳概率分为稳定(I)、基本稳定(II)、稳定性低(III)、欠稳定(IV)及不稳定(V).

表1 边坡失稳概率分级与评价

Table 1 The classification and assessment of slope instability probabilities

classification	instability probability $\varepsilon$ /%	assessment
I	[0,5]	stability
II	(5,30]	basic stability
III	(30,60]	low stability
IV	(60,90)	poor stability
V	[90,100]	instability

## 4 算例分析

以重庆南川金佛山危岩体进行分析与预测,该区域属于侵蚀中山地貌区.危岩体主要集中于金山镇玉泉村金佛山向斜中段偏东翼的近轴部,岩层倾向在 $106^\circ \sim 115^\circ$ ,倾角较缓,近于水平.区内发育主要发育三组近直立陡倾裂隙,裂隙发育走向依次为 $1^\circ \sim 10^\circ$ , $30^\circ \sim 10^\circ$ 及 $320^\circ \sim 330^\circ$ .该区域出露地层一级陡崖灰岩部分主要由二叠系下统茅口组一段、栖霞组组成,基二级陡崖灰岩部分主要由二叠系下统茅口组三、四、五段组成,基座主要由梁山组碳质页岩组成,易发生遇水软化、崩解,属于软质岩体.陡崖下斜坡地形主要由二叠系下统茅口组二段页岩组成,一级陡崖下斜坡主要由志留系中统韩家店组粉质页岩夹砂岩及第四系崩塌残坡积层组成.根据该区域岩性组合得知硬岩石灰岩构成危岩体,基座出露页岩夹灰岩、泥灰岩等软质岩体,呈现上硬、下软的地质结构特征(图2),灰岩与软质岩层力学性质相差很大,差异性风化作用、岩溶作用下易形成较小的岩腔,在暴雨或地震等外力作用下易发生倾倒破坏(图3).

该区域发育了57个危岩体,主控结构面倾角为 $83^\circ \sim 89^\circ$ ,据统计危岩发生倾倒式破坏占76.7%,根据地勘资料对部分危岩体的统计,岩体强度参数服从正态分布曲线,即 $f_{ik} \sim N(508,$

67),  $f_{ok} \sim N(512,87)$ .

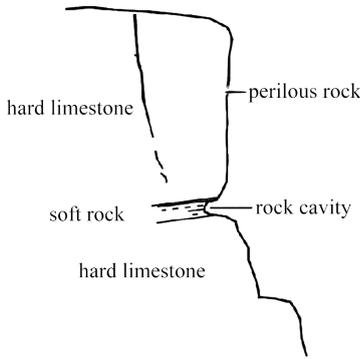


图2 倾倒式危岩概化模型

Fig. 2 The perilous toppling rock generalization model

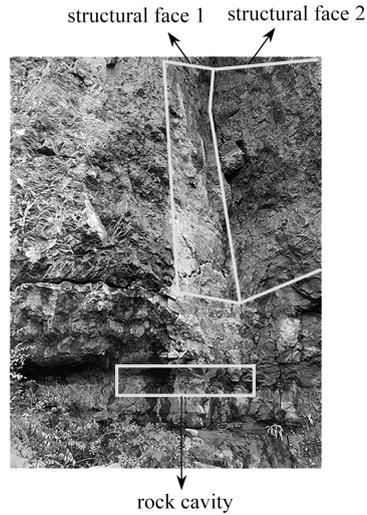


图3 倾倒式危岩破坏实例图

Fig. 3 An example of perilous toppling rock failure

表2 危岩体的几何特征与地震作用方向角

Table 2 Geometric features and direction angles of seismic action of the perilous rock masses

perilous rock mass	geometric feature					case 1		case 2	
	height	length	thickness	crack length	cavity	$\omega / (^\circ)$	$\theta / (^\circ)$	$\omega / (^\circ)$	$\theta / (^\circ)$
	$H/m$	$l/m$	$b/m$	$e/m$	$c/m$				
A	22	14	7.2	11.2	0.9	-1.84	4.17	-7.99	10.30
B	17	12.5	6.2	8.2	0.8	-1.70	3.98	-6.36	8.64
C	21	18	7.9	12.2	1.2	-2.04	4.65	-7.65	10.25
D	16.7	16	6.8	10	1.1	-2.16	4.73	-8.39	10.94

从南川金佛山危岩体中选取 A、B、C、D 共 4 个倾倒式破坏危岩体(表 2),表中的  $\theta$  角为地震力作用方向与水平方向的夹角,按照工况 1,自重+裂隙水压力(天然状态)+地震力;工况 2,自重+裂隙水压力(暴雨状态)+地震力,进行最危险地震作用方向(表 2)与失稳概率计算(表 3).该区域地震烈度属于 VI 度,地震力扩大系数  $\beta_H(T)$  取 1,地震影响力系数  $\xi_e$  取 0.05,根据式(7)计算获得最危险地震作用方向,计算结果见表 2,倾倒式危岩体 A、B、C、及 D 的最危险地震力作用方向与水平线存在夹角  $\theta$ ,工况 1 的最危险地震力作用方向偏转角  $\theta$  在  $5^\circ$  范围内,工况 2 的最危险地震力作用方向偏转角  $\theta$  在  $10^\circ$  左右.在暴雨状态下,随裂隙水压力的增加使危岩体失稳概率增加,最危险地震力作用方向偏转角增大.可见现有规范对危岩体取地震作用力为水平方向偏于安全考虑.

以危岩体 A 为例,主控结构面裂隙扩展过程对最危险地震力作用方向与水平方向偏转角的影响如图 4,结果表明随着主控结构面裂隙贯通长度扩展,两种工况下最危险地震力作用方向与水平方向偏转角显著增大,工况 2 较工况 1 增大幅度更明显;在主控裂隙长度小于 6 m 时,最危险地震力作用方向偏转角增长慢,工况 2 在主控结构面长度扩展大于 6 m 时迅速增长,在主控面裂隙长度达 12 m 时,最危险地震力作用方向偏转角达到  $12^\circ$ .可见暴雨状态下主控裂隙扩展到一定程度时,最危险地震力作用方向偏转角增长更明显.

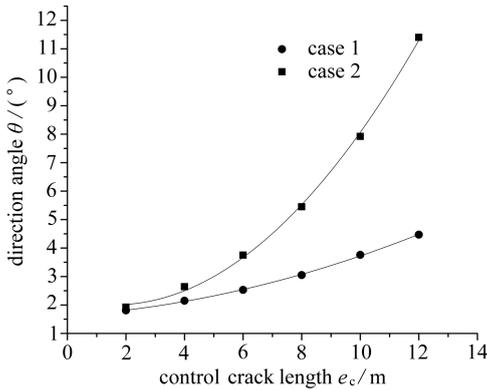


图4 主控结构面长度与最危险地震力作用方向图

Fig. 4 The most dangerous directions of the earthquake and control crack lengths

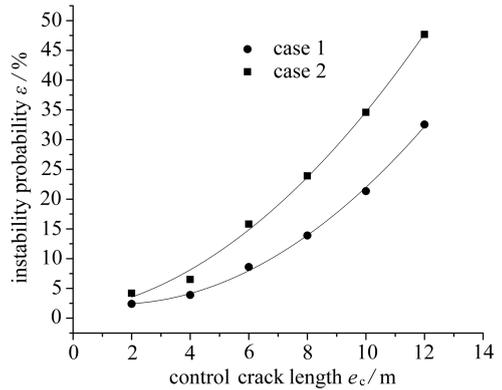


图5 主控结构面长度与失稳概率图

Fig. 5 Control crack lengths and instability probabilities

表3 失稳概率与评价

Table 3 Instability probabilities and assessments

perilous rock mass	case 1		case 2	
	instability probability $\epsilon/\%$	assessment	instability probability $\epsilon/\%$	assessment
A	22.35	basic stability	36.7	low stability
B	1.45	stability	3.84	stability
C	26.7	basic stability	37.5	low stability
D	63.7	poor stability	92.2	instability

危岩体失稳概率与评价见表3,通过计算得出:4个危岩体在工况1时,危岩体A和C处于基本稳定状态,属于Ⅱ级;危岩体B在工况1和工况2的情况下均是稳定的,失稳概率属于Ⅰ级;在暴雨影响下,随裂隙水压力的增加使危岩体失稳概率增加,最危险地震力作用方向偏转角增大,危岩体A和C的失稳概率上升到Ⅲ级;而危岩体D在工况1时属于Ⅳ级,在工况2时上升到Ⅴ级,处于失稳状态。

将危岩体A的最危险地震力作用方向代入可靠度理论计算公式(17)获得了危岩体失稳概率与主控结构面裂隙长度关系如图5。结果表明,危岩体失稳概率随主控结构面裂隙贯通长度增加而增加,危岩体从基本稳定逐步发展为低稳定状态,工况2较工况1增大幅度更明显,工况1在主导裂隙为10m时,其失稳概率为22.5%,属于基本稳定阶段,而工况2的失稳概率已经达到35%,属于稳定性低阶段。

## 5 结 论

针对倾倒式危岩模型采用函数极值理论与可靠度理论分析建立了最危险地震力作用方向下的可靠度计算方法,其研究成果如下:

1) 考虑地震作用方向下建立了底部发育较小岩腔倾倒式危岩体物理受力模型,运用函数极值理论获得了最危险地震力作用方向表达式,最危险地震作用力方向与危岩体的几何形态、岩体力学参数及主控结构面贯通度相关。

2) 基于可靠度理论,建立了倾倒式危岩体在考虑地震作用力方向下的可靠度指标与失稳概率的计算表达式与判断标准。以重庆南川金佛山倾倒式危岩体为例,计算结果表明危岩体最

危险地震作用方向与水平面的夹角在工况 1 下,最危险地震力方向偏转角在  $5^\circ$  范围,在工况 2 下最危险地震力方向偏转角在  $10^\circ$  左右.现有地灾规范对于地震工况时对危岩体取地震作用力为水平方向偏于安全考虑.

3) 以危岩体 A 为例,通过计算发现主控结构面长度较小时,最危险地震作用方向与水平方向偏转角较小,随主控结构面长度的增大,最危险地震作用方向与水平方向偏转角显著增大.发现危岩体失稳概率随主控结构面长度增加而增加,工况 2 影响更加明显.本方法可对地震频发区进行崩塌灾害预测,为政府部门对突发性崩塌灾害提供科学依据.

### 参考文献(References):

- [1] 陈洪凯,唐红梅,王蓉. 三峡库区危岩稳定性计算方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(4): 614-619.(CHEN Hongkai, TANG Hongmei, WANG Rong. Calculation method of stability for unstable rock and application to the three gorges reservoir[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(4): 614-619.(in Chinese))
- [2] 黄润秋. 汶川地震地质灾害研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.(HUANG Runqiu. *Geohazard Assessment of the Wenchuan Earthquake*[M]. Beijing: Science Press, 2009.(in Chinese))
- [3] 苏天明,张艳鸽. 风化岩腔边坡的演化与应力场分析[J]. 公路交通科技, 2013, **30**(7): 30-34. (SU Tianming, ZHANG Yange. Evolution of weathered slope above rock cavity and analysis of its stress field[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, **30**(7): 30-34.(in Chinese))
- [4] 王根龙,伍法权,祁生文. 悬臂-拉裂式崩塌破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(S2): 269-274.(WANG Genlong, WU Faquan, QI Shengwen. Research on failure mechanisms for cantilever and tension crack-type collapse[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(S2): 269-274.(in Chinese))
- [5] 陈健云,岳红原,徐强. 复杂环境下倾倒式危岩体的动力稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(10): 1965-1974.(CHEN Jianyun, YUE Hongyuan, XU Qiang. Dynamic stability analysis of perilous toppling rock in complex environment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, **35**(10): 1965-1974.(in Chinese))
- [6] 周云涛,石胜伟,张勇,等. 岩腔后退近水平砂-泥岩互层危岩稳定性研究[J]. 工程地质学报, 2017, **25**(5): 1220-1229.(ZHOU Yuntao, SHI Shengwei, ZHANG Yong, et al. Stability of unstable rock in nearly-horizontal sandstone-mudstone stratum due to enlarged rock-cell[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, **25**(5): 1220-1229.(in Chinese))
- [7] LIU C H, JAKSA M B, MEYERS A G. A transfer coefficient method for rock slope toppling [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, **46**(1): 1-9.
- [8] 陈维,徐则民,刘文连. 差异风化型危岩力学模型及破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(1): 195-204.(CHEN Wei, XU Zeming, LIU Wenlian. Mechanical model and failure mechanism of unstable cantilevered rock blocks due to differential weathering[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(1): 195-204.(in Chinese))
- [9] WU J H. Seismic landslide simulations in discontinuous deformation analysis[J]. *Computers and Geotechnics*, 2010, **37**(5): 594-601.
- [10] 何强,吴礼舟,李部,等. 拉剪倾倒型危岩失稳影响因素研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, **45**(3): 235-242.(HE Qiang, WU Lizhou, LI Bu, et al. Factors of instability of toppling unstable rocks subjected to tensile and shear stresses[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2017, **45**(3): 235-242.(in Chinese))

- [11] 刘海军, 赵建军, 巨能攀. 考虑地震作用方向的危岩稳定性研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, **42**(2): 59-63. (LIU Haijun, ZHAO Jianjun, JU Nengpan. A study of the stability of dangerous rocks considering the action direction of the seismic force[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, **42**(2): 59-63. (in Chinese))
- [12] 薛新华, 樊旭, 郭志元, 等. 地震荷载作用下倾倒式危岩体动力失稳机理研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, **33**(2): 73-79. (XUE Xinhua, FAN Xu, GUO Zhiyuan, et al. Dynamic stability analysis of toppling unstable rock under seismic loading[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science)*, 2017, **33**(2): 73-79. (in Chinese))
- [13] 张海娜, 陈从新, 郑允, 等. 地震作用下的层状岩质边坡块状-弯曲倾倒解析分析[J]. 中国公路学报, 2018, **31**(2): 75-86. (ZHANG Haina, CHEN Congxin, ZHENG Yun, et al. Analytical study on block-flexure toppling failure of rock slopes subjected to seismic loads[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, **31**(2): 75-86. (in Chinese))
- [14] 刘才华, 陈从新. 地震作用下岩质边坡块体倾倒破坏分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(S1): 3194-3198. (LIU Caihua, CHEN Congxin. Analysis of toppling failure of rock slopes due to earthquakes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(S1): 3194-3198. (in Chinese))
- [15] 刘俊卿, 韩晶. 基于模糊数学理论的沥青路面结构可靠度分析[J]. 应用数学和力学, 2018, **39**(9): 97-106. (LIU Junqing, HAN Jing. Reliability analysis of asphalt pavement structure based on fuzzy mathematics theory[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2018, **39**(9): 97-106. (in Chinese))
- [16] DUZGUN H S B, BHASIN R K. Probabilistic stability evaluation of opstadhornet rock slope, Norway[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2009, **42**(5): 729-749.
- [17] 靳红华, 王林峰, 杨培丰. 覆盖型岩溶塌陷的可靠性分析[J]. 铁道建筑, 2018, **58**(11): 112-117. (JIN Honghua, WANG Linfeng, YANG Peifeng. Reliability analysis of covered karst cave collapse[J]. *Railway Engineering*, 2018, **58**(11): 112-117. (in Chinese))
- [18] 杜毅, 晏鄂川, 蔡静森, 等. 断续结构面控制的危岩稳定可靠度分析方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, **51**(8): 120-127. (DU Yi, YAN Echuan, CAI Jingsen, et al. Reliability analysis method on unstable rock mass controlled by discontinuous structure[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, **51**(8): 120-127. (in Chinese))
- [19] 杨智翔, 裴向军, 袁进科. 基于可靠度理论对滑移式落石的稳定性及敏感性分析[J]. 科学技术与工程, 2017, **17**(1): 285-290. (YANG Zhixiang, PEI Xiangjun, YUAN Jinke. The reliability theory to slippage of rockfall stability and sensitivity analysis[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, **17**(1): 285-290. (in Chinese))
- [20] 贡金鑫, 魏巍巍. 工程结构可靠性设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. (GONG Jinxin, WEI Weiwei. *Principle of Reliability Design of Engineering Structure*[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2007. (in Chinese))
- [21] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 2005. (ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng. *Principle of Engineering Geological Analysis*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005. (in Chinese))

# Reliability Analysis of Perilous Toppling Rock Considering Seismic Force Directions

TANG Hongmei, SHU Qingjiang, WANG Linfeng

(*Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University,  
Chongqing 400074, P.R.China*)

**Abstract:** Lateral unloading leads to development of many perilous rock masses on high and steep slopes. It is significant to judge the probability of instability under the action of rainfall and earthquake. For the perilous toppling rock, the physical and mechanical model with the most dangerous seismic force directions was established. Based on the extreme value theory for functions, the expression of the most dangerous seismic force direction was given. Combined with the reliability theory, the reliability index, the expression of the probability of instability and the judgment criterion for the perilous toppling rock were built. The proposed method was applied to analyze the stability of perilous toppling rock masses in the Jinfoshan district in Chongqing. The calculation results show that, the most dangerous seismic force direction in case 1 is within  $5^\circ$ , and in case 2 is about  $10^\circ$ ; the most dangerous direction angle is not a fixed value, but related to the shape, the fracture water pressure and the depth of rock cavity, etc. When the control crack length is small, the most dangerous direction angle is small under other conditions but will increase significantly with the crack length. The probability of instability increases with the control crack length in case 2 more than in case 1. The research work is applicable to disaster prevention and mitigation of perilous rocks.

**Key words:** perilous toppling rock; seismic force direction; reliability; probability of instability

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China(51678097;51378521)