

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2015.02.09

考虑地震作用方向的危岩稳定性研究

刘海军^{1,2}, 赵建军², 巨能攀²

(1. 国核电力规划设计研究院重庆有限公司, 重庆 401121;
2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 在危岩稳定性评价中,地震作用方向是一个极为重要的因素。为解决目前危岩稳定性评价中仅把地震作用方向假定为水平向的问题,借助函数极值理论建立了地震最危险作用方向的计算公式,并结合统计方法进行分析验证。最后,利用该公式研究了某公路隧道出口不同类型危岩的最危险地震作用方向,计算结果表明:地震最危险作用方向在 $347.4^{\circ} \sim 359.8^{\circ}$,与水平面夹角随着地震动峰值加速度增大而减小,并且当地震动峰值加速度超过 $0.4g$,地震最危险作用方向与水平面夹角在 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$,此时危岩体可能产生抛射破坏。

关键词: 危岩;地震最危险作用方向;圆形分布;拟静力法

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2015)02-0059-05

A study of the stability of dangerous rocks considering the action direction of the seismic force

LIU Haijun^{1,2}, ZHAO Jianjun², JU Nengpan²

(1. State Nuclear Electric Power Planning Design & Research Institute Chongqing Co. Ltd, Chongqing 401121, China;
2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The direction of seismic force is an extremely important factor in the stability assessment of dangerous rocks. Currently in the stability assessment of dangerous rocks, the horizontal direction is taken as the action direction of the seismic force. To resolve this problem, the calculation method considering the critical direction of the seismic force is put forward with the theory of function extreme values, and is verified by circular distribution. Finally, we use the formula to study the different types of dangerous rocks' critical seismic force direction at a road exit zone. The analysis shows that the critical action direction of the seismic force is from 347.4° to 359.8° , the angle between the action direction and the horizontal plane decreases with the increase in the peak ground acceleration. When the peak ground acceleration is greater than $0.4g$, the angle between the critical action direction of the seismic force and the horizontal plane ranges from 0° to 30° . At this moment, the dangerous rock may failure in the mode of a trajectory.

Keywords: dangerous rock; critical action direction of seismic force; circular distribution; pseudo-static method

陡斜坡中上部已有变形迹象且具有失稳破坏征兆的岩块(体)称为危岩,危岩失稳破坏称为崩塌^[1]。小至孤石、大至数千立方米危岩块体发生崩塌坠落,造成交通中断和重大生命财产损失,是山区易发地质灾害

类型之一。特别是“5.12”汶川地震后,地震诱发了大量的危岩、崩塌、滚石等次生山地灾害,具有分布范围广、数量多、规模大、危害严重等特点。由于其具有突发性、偶然性,且危害对象广、危险性高,地震作用危

收稿日期: 2014-06-09; 修订日期: 2014-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41102190)

第一作者: 刘海军(1986-),男,工程师,硕士,主要从事岩土工程勘察设计工作。E-mail:lhjje@163.com

岩稳定性分析成为地质灾害研究领域热点问题之一^[2-4]。

目前考虑地震作用危岩稳定性分析方法主要有基于极限平衡理论的拟静力法和基于弹塑性理论的数值法。近年来学者在数值分析这方面做了许多有益的研究^[5-7],并且提出了数值分析地震岩体的基本方法和步骤。在工程上,拟静力法广泛使用在地震作用下危岩稳定性分析中,该方法通过地震系数把地震力等效为水平静荷载加载在岩体上。地震作用从根本上说是一系列的地面加速度的输入^[8-9],加速度本身的矢量属性决定了在危岩块(体)反应计算时必须考虑地震作用方向。基于上述认识,本文在拟静力法的基础上建立考虑地震作用方向危岩稳定性评价模型,并提出危岩地震力最危险作用方向的计算方法。

1 考虑地震作用方向理论计算模型

危岩失稳破坏包括滑塌式危岩(USR)、倾倒式危岩(UTR)和坠落式危岩(UFR)3种类型^[10],本文以USR为例,对可能发生崩滑的岩块(体)进行受力分析(图1)。其中地震力作用 P 与水平方向(指向坡外)夹角为 θ (规定顺时针转动为正,即 θ 在 $0^\circ \sim 360^\circ$)。

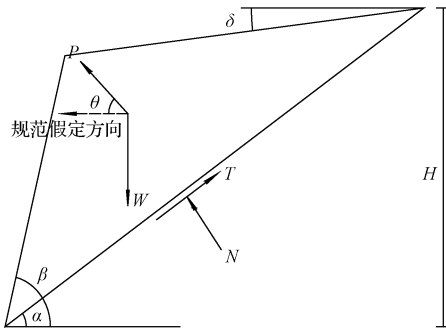


图1 危岩块(体)地震作用下受力模式
Fig.1 The force mode of dangerous rocks under seismic actions

- α —岩体结构面倾角; β —临空面倾角; θ —地震力与水平方向的夹角;
- δ —顶面结构面倾角; H —危岩块(体)高度/m;
- W —危岩块(体)自重力/kN; N —危岩块(体)滑塌面法向力/kN;
- T —危岩块(体)滑塌面切向力/kN; P —地震力/kN。

在地震作用下,危岩块(体)下滑力增加,并且导致滑塌面法向力减小,从而降低了抗剪强度,增大了岩块(体)破坏的概率。危岩体破坏准则采用摩尔-库伦准则,其稳定性系数 K 计算公式:

$$K = \frac{[W \cos \alpha - p \sin(\alpha + \theta)] \tan \varphi + cl}{W \sin \alpha + p \cos(\alpha + \theta)} \quad (1)$$

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\sin(\beta - \alpha) \sin(\alpha - \delta)}{\sin(\beta - \delta) \sin \alpha}$$

$$l = \frac{H}{\sin \alpha}, p = \beta_H(T) \xi_e W, \xi_e = a/g$$

式中: γ ——岩块(体)重度/(kN/m³);

$\beta_H(T)$ ——地震放大系数谱(取值参考文献[3]);

T ——地震振动周期;

ξ_e ——地震系数;

a ——坡体实际所受地震动峰值加速度;

φ ——滑塌面内摩擦角/(°);

c ——滑塌面内聚力/kPa。

1.1 理论分析

式(1)中危岩的稳定性系数 K 随地震作用方向 θ 变化而变化,函数 $K(\theta)$ 在 $\theta(0^\circ \sim 360^\circ)$ 为初等函数,故存在某一极值,令 $K'(\theta) = 0$,则有:

$$-P \tan \varphi + cl \sin(\alpha + \theta) + W \tan \varphi \sin \theta = 0 \quad (2)$$

$$(cl \cos \alpha + W \tan \varphi) \sin \theta + cl \sin \alpha \cos \theta = P \tan \varphi \quad (3)$$

(5)式中令 $A = cl \cos \alpha + W \tan \varphi, B = cl \sin \alpha, C = P \tan \varphi$,有:

$$\sqrt{A^2 + B^2} \sin(\theta + \omega) = C \quad (4)$$

最危险地震作用方向即为:

$$\theta = 360 + \arcsin \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2}} - \omega \quad (5)$$

式中, $\tan \omega = B/A$ 。

1.2 统计分析

圆形分布统计方法是用于处理角度资料的一类常用分析方法^[11]。假设拟静力法中地震力与水平方向夹角 $\theta_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$,地震力在此方向作用下危岩块体的稳定性系数为 K_i ,利用圆形分布统计对求得结果进行分析,获得稳定性系数的均值所在方位,最后确定地震力最危险的作用方向。其算法如下:

(1)地震力方向角 θ_i 为 n 组方向数据, $\bar{\theta}$ 为样本数据的平均角度,即地震力作用方向。 K_i 为在方向角 θ_i 作用下危岩的稳定性系数,则利用圆形分布统计原理 θ_i 与 K_i 存在如下关系:

$$\theta_i \sim op(K_i \cos \theta_i, K_i \sin \theta_i) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

此时 n 组不同地震力作用方向 θ_i 的平均角度 $\bar{\theta}$ 由向量 op 的和向量 $\sum_{i=1}^n op$ 表示,该向量分解在水平轴 X 和垂直轴 Y 求解,即:

$$\bar{x} = \sum x/n = \sum K_i \cos \theta_i / n \quad (7)$$

$$\bar{y} = \sum y/n = \sum K_i \sin \theta_i / n \quad (8)$$

(2) 最危险(安全)地震方向角 θ 求解公式:

$$\bar{\theta} = \begin{cases} \arctg(\bar{y}/\bar{x}) & \text{当 } \bar{x} > 0 \\ 360 + \arctg(\bar{y}/\bar{x}) & \text{当 } \bar{x} < 0 \\ 90 & \text{当 } \bar{x} = 0, \text{且 } \bar{y} > 0 \\ 270 & \text{当 } \bar{x} = 0, \text{且 } \bar{y} < 0 \\ \text{不定} & \text{当 } \bar{x} = 0, \text{且 } \bar{y} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

至此,通过公式(5)和(9)求出危岩块(体)地震最危险方向,并通过圆形分布研究危岩稳定性与地震方向角的关系,以便合理评价危岩稳定性状况以及为设计提供支持。

2 工程应用

2.1 工程概况

老虎嘴隧道出口危岩体位于四川省安县境内雎水河左侧,在龙门山前山断裂北侧约 1.0 km。该危岩体发育斜坡坡脚高程 710 m,坡顶高程 860 m,相对高差 150 m,整体坡表具有上陡下缓地形,危岩发育部位坡度基本在 70°左右。坡脚崩塌堆积体宽 143 m,长 121 m,坡度 15°~30°,崩塌堆积形态呈扇形,垂向上大体上可划分出 3 个堆积平台,每一个平台宽度 1~2 m。根据斜坡岩体结构面组合特征以及崩塌堆积体的形状特征,该危岩主要受一组倾坡外结构面控制,起滑移面作用,其产状为 N45°W/NE \angle 46°,其中与产状为 N20°E/NW \angle 77°结构面组合成 I 型危岩块体,与产状 N30°W/SW \angle 81°结构面组合 II 型危岩块体(图 2)。

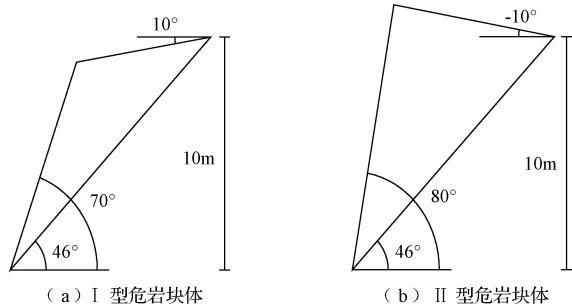


图 2 老虎嘴隧道出口危岩块体组合模式

Fig. 2 Composite mode of dangerous rocks at the exit zone in the Laohuzui tunnel

危岩体部位的山体发育大量的拉裂缝,其中 lx1、lx2 裂隙张开度在 20 cm 左右,延伸长度大于 2 m。坡体中出现大量的较平直的光板面,该组结构面即为老虎嘴隧道出口危岩破坏的控制性结构面。

老虎嘴隧道出口处于龙门山前山断裂(江油—灌县断裂)北侧 1.0 km,而该断裂亦是“5.12”汶川地震发震断裂的侧边界,因而其地震动力响应极其复杂。

汶川地震时程曲线^[12]表明,地震加速度在一个范围内变化,最大接近 1.0g。王秀英^[13]等根据超过 2 万个地震诱发崩塌、滑坡等地质灾害数据,并利用地震台实测地震加速度值,确定汶川地震岩体破坏的临界加速度值为 0.3g。老虎嘴危岩稳定性计算以此为依据,分别计算 0.1g、0.2g、0.3g、0.4g 时危岩体最危险作用方向及其稳定性,计算参数见表 1。

表 1 老虎嘴隧道出口危岩计算参数

Table 1 Calculated parameters of dangerous rocks at the exit zone in the Laohuzui tunnel

岩性	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	结构面参数	
		内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	内聚力 c/kPa
灰岩	26.7	30	40

2.2 地震力最危险作用方向计算

表 2 为老虎嘴隧道出口 I、II 型危岩块体最危险地震作用方向理论公式的计算结果,从表中可知: I 型危岩块体的最危险地震作用方向在 343.8°~354.6°之间变化,地震作用危险方向与水平面的夹角从 16.2°逐渐减小到 5.4°。II 型危岩块体的最危险地震作用方向在 347.7°~359.8°范围变化,当地震峰值加速度达到 0.4g 时,最危险地震作用方向与规范假定地震作用方向相同。并且随着地震峰值加速度的增大,最危险地震力作用方向在 340°~360°之间变化,并且与水平面夹角(360°)逐步减小。当危岩块体的地震动峰值加速度超过 0.4g 时,最危险方向逐渐指向坡顶方向($\theta > 0^\circ$),危岩块体的破坏模式可能从滑塌破坏转为向临空面上方抛射破坏。

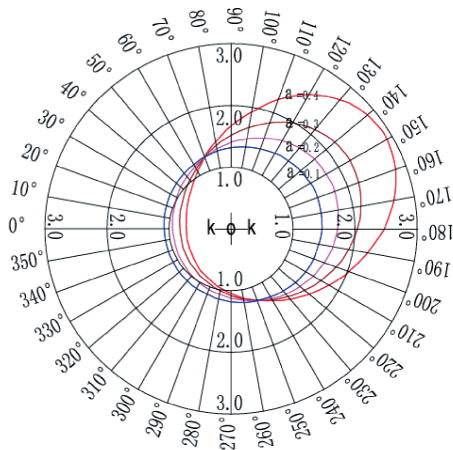
表 2 典型危岩块体地震作用方向角计算结果

Table 2 Calculation results of typical dangerous rock's seismic direction angle

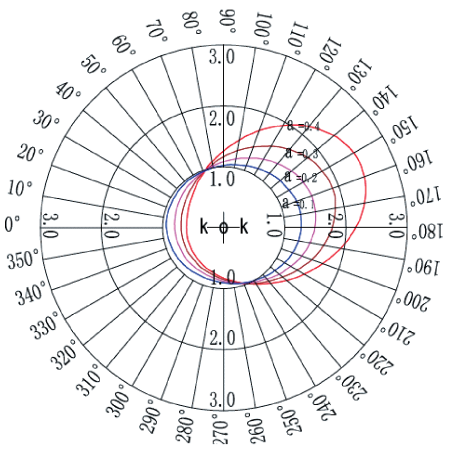
地震动峰值加速度 $\alpha/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	I 型危岩块体			II 型危岩块体		
	$\theta + \omega$	ω	θ	$\theta + \omega$	ω	θ
1.0	3.5	19.7	343.8	4.0	16.3	347.7
2.0	7.1	19.7	347.4	7.9	16.3	351.7
3.0	10.7	19.7	351.0	11.9	16.3	355.7
4.0	14.3	19.7	354.6	16.0	16.3	359.8

由式(9)计算危岩地震作用方向与危岩稳定性系数 K 的关系如图 3。由计算结果可知,整体最危险地震作用方向在 340°~360°之间。在地震动加速度为 0.1g 时,不同方向地震作用下 I 型危岩块体稳定性系数 $K > 1.1$,处于稳定状况。当 $\alpha = 0.2g$ 时, I 型危岩块体稳定性系数 $K < 1.0$,且地震最危险作用方向为 346.5°,与式(5)计算结果一致,此时危岩稳定性系数 $K = 0.912$,按规范计算 $K = 0.942$,稳定性系数降低了

4%。随着地震动峰值加速度的逐渐增大,危岩稳定性系数 $K < 1.0$ 的方向范围逐步扩大,当 $\alpha = 0.4g$ 时,不稳定危岩块体的地震作用方向大于 0° 。因此,地震作用使危岩块(体)的稳定性降低,而且随着地震动峰值加速度的增大,其稳定性降低越快。



(a) I型危岩块(体)



(b) II型危岩块(体)

图3 危岩块(体)稳定性系数 K 随地震力方向 θ 变化

Fig. 3 Changes in stability factor K of dangerous rocks with the seismic direction θ

当地震力从最危险方向作用在危岩块体中时,危岩块体稳定性系数比规范评价结果小(图4),变化误差最大可达5.1%,因此假定水平方向为最危险的地震力作用方向,会造成对危岩块体稳定性系数过高的计算和评价,可能造成严重的安全事故和经济损失。

3 结论

(1)运用函数极值理论建立了地震最危险作用方向计算公式,并发现地震最危险作用方向不是一个固定的角度,它与危岩块(体)几何形状、滑塌面力学参数以及地震动峰值加速度有关系,并通过统计方法进

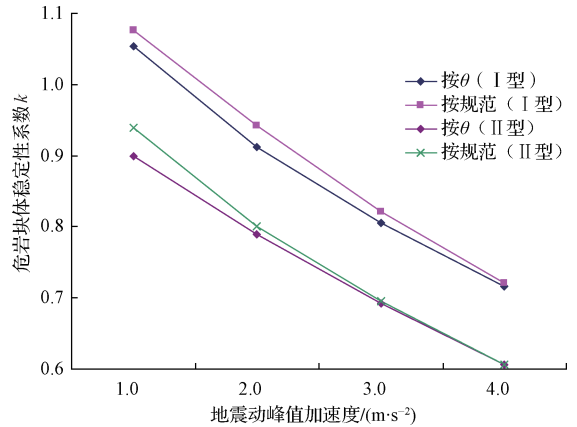


图4 危岩最危险地震作用方向与稳定性结果

Fig. 4 Critical seismic direction angles of dangerous rocks and the stability results

行验证。

(2)通过老虎嘴隧道出口危岩块(体)稳定性计算,最危险地震作用方向角在 $340^\circ \sim 360^\circ$ 之间变化。当危岩块体的地震动峰值加速度超过 $0.4g$ 时,最危险方向角逐渐指向坡顶方向 ($\theta > 0^\circ$),危岩块体的破坏模式从滑塌破坏可能变为向临空面向上抛射破坏。

(3)当地震以最危险方向作用在危岩块体中时,危岩块体稳定性系数比规范评价结果小。因此,认为水平方向为最危险的地震作用方向,特别是强震地区,可能会造成对危岩块体稳定性系数过高的计算,从而使危岩评估结果偏于不安全。

参考文献:

[1] 陈洪凯,唐红梅,唐荣. 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 H K, TANG H M, TANG R. 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] 黄波林,陈小婷,彭轩明,等. 三峡库区巫山县廖家坪危岩体倾倒机制数值模拟分析[J]. 水文地质工程地质,2008,35(5): 24 - 32. [HUANG B L, CHEN X T, PENG XM, et al. Lijiaping dangerous rockmass toppling numerical analysis in Wushan County in the Three Gorges Reservoir Region [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(5): 24 - 32. (in Chinese)]

[3] 黄润秋. 汶川地震地质灾害研究[M]. 北京:科学出版社,2009. [HUANG R Q. Geohazard Assessment of the Wenchuan Earthquake [M]. Beijing: Science

- Press,2009. (in Chinese)]
- [4] 冉涛,文宝萍,苏昌,等. 湖北五峰赵家岩崩形成机理分析[J]. 水文地质工程地质,2012,39(6):114-118. [RAN T, WEN B P, SU C, *et al.* Analysis of the formation mechanism of the Zhaojiayan rock fall in Wufeng County, Hubei Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2012,39(6):114-118. (in Chinese)]
- [5] 苏生瑞,张永双,李松,等. 汶川地震引发高速远程滑坡运动机理数值模拟研究[J]. 地球科学与环境学报,2010,32(3):277-287. [SUN S R, ZHANG Y S, LI S, *et al.* Numerical Analysis on Motion Mechanism of Highspeed and Long Runout Landslide by Wenchuan Earthquake [J]. Chinese Journal of Earth Sciences and Environment,2010,32(3):277-287. (in Chinese)]
- [6] 杜晓丽,周维新,负永峰,等. 岩质边坡稳定性分析中地震波理论的应用[J]. 西部探矿工程,2008(6):6-9. [DU X L, ZHOU W X, YUN Y F, *et al.* Application of the Theory of Earthquake Wave in the Analysis of Stability of Rock Slope [J]. West-China Exploration Engineering, 2008(6):6-9. (in Chinese)]
- [7] 刘春玲,祁生文,童立强,等. 利用 FLAC3D 分析某边坡地震稳定性[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(16):2730-2733. [LIU C L, QI S W, DONG L Q, *et al.* Stability Analysis of Slope Under Earthquake with FLAC3D [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(16):2730-2733. (in Chinese)]
- [8] Seed H B, Martin G R. The Seismic Coefficient in Earth Dam Design[J]. J. Geotech. Engrg., ASCE, 92,SM3, 1966:25-58.
- [9] 祁生文,伍法权,严福章,等. 岩质边坡动力反应分析[M]. 北京:科学出版社,2007. [QI S W, WU F Q, YAN F Z, *et al.* Analyze Dynamic Stability of Rock Slope[M]. Beijing: Science Press,2007. (in Chinese)]
- [10] 陈洪凯,唐红梅,胡明,等. 危岩锚固计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(8):1321-1327. [CHEN H K, TANG H M, HU M, *et al.* Research on Anchorage Calculation Method for Unstable Rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 24(8):1321-1327. (in Chinese)]
- [11] 祝高峰,潘发明,魏跃红,等. 卡方检验、圆形分布、同质分析三种统计方法在周期性数据中的比较应用[J]. 安徽医科大学学报,2005,40(2):150-152. [ZHU G F, PAN F M, WEI Y H, *et al.* Chisquare Test, Round Distribution and Homals' s Comparison in Cyclist Data [J]. Acta Universitatis Medicinalis Anhui, 2005, 40(2):150-152. (in Chinese)]
- [12] 徐文杰,周玉县. 唐家山滑坡高速于东及堵江机制研究[J]. 工程地质学报,2010,18(增刊1):374-383. [XU W J, ZHOU Y X. Research on High Speed Moving and River-blocking Mechanism of Tangjiashan Landslide[J]. Engineering Geology, 2010, 18(Sup 1):374-383. (in Chinese)]
- [13] 王秀英,聂高众,王登伟. 汶川地震诱发滑坡与地震动峰值加速度对应关系研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(1):82-89. [WANG X Y, NIE G Z, WANG D W. Research on Relationship Between Landslides and Peak Ground Accelerations Induced by Wenchuan Earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1):82-89. (in Chinese)]

责任编辑:张明霞