

楔块滑落试验分析及其判别方法

王述红, 钟山, 高轩麟, 王一然

(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 利用自行开发研制的试验平台, 基于大量实验室岩石楔块滑落试验结果, 提出了极限平衡状态时楔块滑落与否的判别新准则. 通过对楔块滑落过程及其极限平衡状态的研究, 得到不同条件下描述楔块滑落状态的 $\beta-\alpha$ (倾斜角-旋转角)关系曲线的函数方程. 定量分析了岩体结构面参数(产状、粗糙度系数JRC)对所提函数方程中相关系数取值的影响, 给出了利用楔块粗糙度系数JRC与结构面交角 ω 求 $\beta-\alpha$ 函数方程的方法.

关键词: 岩体结构; 滑落; 极限平衡; 试验分析; 判别方法

中图分类号: TU 413.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2015)04-0557-04

Experimental Analysis of Wedges Sliding and Its Discriminant Method

WANG Shu-hong, ZHONG Shan, GAO Xuan-lin, WANG Yi-ran

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WANG Shu-hong, professor, E-mail: wangshuhong@mail.neu.edu.cn)

Abstract: A self-developed test platform was used to conduct a large number of rock wedge sliding experiments, based on which a distinguishing criterion of limit equilibrium state to judge whether the wedges slide or not was put forward. The wedges sliding process and its limit equilibrium state were studied to get the beta-alpha equation (relation between inclination and rotation angle) under different condition. The effects of rock structural plane parameters (occurrence, roughness coefficient JRC) on the correlation coefficient of the proposed function equation were quantitatively analyzed, with the beta-alpha equation given by using the known slider roughness coefficient JRC and structural plane angle ω .

Key words: rock mass structure; sliding; limit equilibrium; experimental analysis; discrimination method

在地下洞室、边坡和地基等岩体开挖工程中, 岩体稳定性分析是一项极为重要的内容, 特别是碎裂岩体的稳定性, 目前还没有实用易行的方法供岩土工程师使用.

通常对于边坡岩体稳定性分析理论主要有极限平衡法、差分法、有限元、离散元、边界元、块体理论、非连续变形分析和数值流形法等, 其中块体理论得到广泛的应用, 且是非连续变形分析和数值流形方法等非连续介质力学方法发展的基础^[1-3].

基于块体理论, 岩质边坡稳定性分析方法有单滑块和多滑块分析法、楔体滑动的仿平面分析法、楔体分割法、霍克分析法及《岩土工程勘察规范》(GB50021—94)推荐法等^[4-8]. 在计算岩体边坡安全或稳定性系数时, 通常需要知道滑块所处的结构面或多个结构面交线的地质产状(倾向、倾角与粗糙度等). 其中产状的数据可以通过现场测量获取, 除此之外的几何参数, 基本上都通过计算求得^[9-11]. 但它们的计算公式复杂、计算过程繁琐, 也很容易出错, 需要较多的理论知识.

收稿日期: 2014-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474050, 51179031); 国家自然科学基金外国青年学者研究基金资助项目(51250110531, 51350110534); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LN2014006); 国家高端外国专家资助项目(GDT20142100008; GDW20142100050); 东北大学第七批国家级大学生创新实验项目(130045).

作者简介: 王述红(1969-), 男, 江苏泰州人, 东北大学教授.

本文提出现场采集不同岩体试样,利用第一作者团队开发研制的块体分析平台,基于实验室大量试验结果,采用极限平衡方法求解边坡楔体的滑动临界判别方程,避免了繁琐的计算过程.首先模拟楔体滑落过程,测定和分析不同粗糙度及断面角条件下楔体的极限平衡状态,得出各条件参数对极限平衡状态的影响,最后利用两个角度之间的函数关系来表征结构面即楔体的极限平衡状态,为判断结构面是否稳定、楔块是否滑落提供一种新的简单易行的判断方法.

1 试验材料和方法

本文的试验平台采用文献[1]中的变角度空间块体滑落模型(图 1a),该试验平台可以通过装置角度的两次改变模拟结构面倾向及其变化,实现对不同产状的结构面的模拟.试验材料选择现场采集的花岗岩和黄砂岩(图 1b),岩体结构面角度选择典型的楔块.

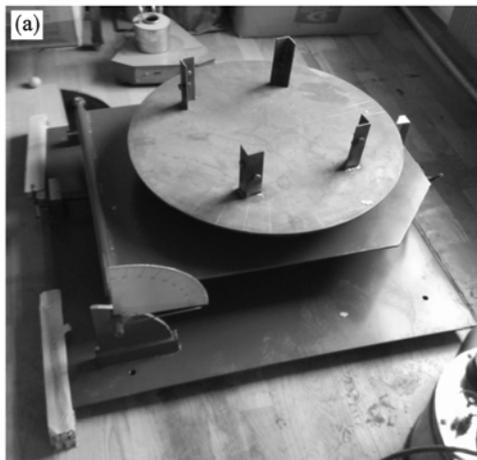


图 1 试验平台与模型图片

Fig. 1 Pictures of experimental platform and model

试验方法,通过制作不同的试件,角度选择 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ 等典型旋转角.结构

面粗糙度选择不同粗糙度的砂纸打磨制作.

2 试验结果与讨论

通过对试验结果的初步分析,可以拟合出结构面与楔块处于极限平衡状态时,旋转台的旋转角 α 与倾斜台的倾斜角 β 之间存在明显的函数关系,在此假设

$$\beta = A\alpha^2 + b. \quad (1)$$

式中,系数 A 与 b 的值与结构面粗糙度 JRC 及结构面交角(楔块模型中的楔块断面角 ω)有关.

2.1 断面角 ω 对 A 与 b 的影响

相同粗糙度下,制成 3 个不同断面角的花岗岩结构面与楔块模型,经过砂纸打磨之后进行试验.试验结果如图 2 所示.

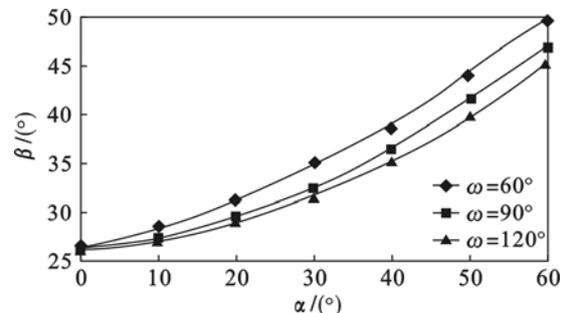


图 2 不同断面角的滑落曲线

Fig. 2 Sliding curves of different sections angle

由图 2 可知,在 α 相同时,断面角小的结构面与楔块模型的倾斜角 β 值大,且随着旋转角 α 的增大,同一旋转角 α 值时倾斜角 β 之间的差值也在增大.可以说,断面角小的结构面与楔块模型更加稳定.断面角 ω 对二次式中 A 值有影响,且 ω 与 A 负相关.

2.2 粗糙度 JRC 对 A 与 b 的影响

选用质地较软的黄砂岩,分别用砂纸打磨、平行划线与十字刻花模拟 3 种不同粗糙度,选用 90° 断面角的结构面与楔块模型进行模拟,试验结果如图 3 所示.

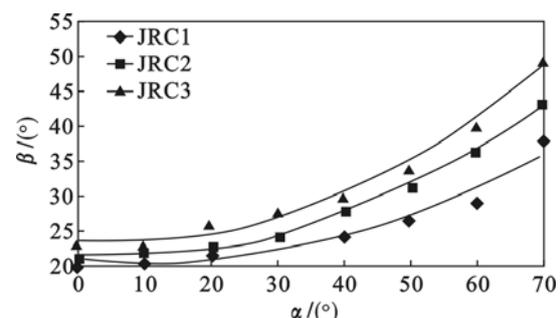


图 3 不同粗糙度滑落曲线

Fig. 3 Sliding curve of different JRC

从滑落曲线可以看出 JRC 值越大,旋转角 α 值相同时倾斜角 β 值越大,即 JRC 值大的结构面与楔块模型更加稳定.从曲线趋势可以看出 JRC 与系数 A 与 b 正相关.

3 试验数据分析

基于 2.2 节中的试验数据,对滑块进行受力分析,在滑落时,滑块与模具满足莫尔库伦定律:

$$\tau = \sigma \tan \varphi. \quad (2)$$

将摩擦系数 $\tan \varphi$ 与其他因素综合考虑后,以粗糙度系数 JRC 来表示,在本文中, $JRC = \tan \varphi$, 取任一极限平衡状态,此时有旋转角为 α , 倾斜角 β_0 , 由于结构面模型本身有 10° 的坡度,故此结构面倾角为 $\beta (\beta = \beta_0 + 10^\circ)$, 两结构面之间角度为 ω .

如图 4 所示,以模型上平面为 $x-y$ 平面建立空间直角坐标系.重力 G 在 $x-z$ 平面内.

压应力

$$S\sigma = G. \quad (3)$$

式中, S 为两结构面的接触面积,本次分析中结构面面积 S 按定值处理,数值等于块体与平台的初始接触面积.

总切应力

$$\tau = \sigma \cdot \sin \beta \cos \alpha \cos 10^\circ. \quad (4)$$

单个结构面上的正应力:

$$\sigma_{n1} = \left(\frac{\sin \beta \cos \alpha \sin 10^\circ}{2 \cos \omega} + \frac{\sin \beta \sin \alpha}{\sin \omega} \right) \cdot \sigma, \quad (5)$$

$$\sigma_{n2} = \left(\frac{\sin \beta \cos \alpha \sin 10^\circ}{2 \cos \omega} - \frac{\sin \beta \sin \alpha}{\sin \omega} \right) \cdot \sigma. \quad (6)$$

单个结构面上的切应力 τ_1, τ_2 :

$$JRC = \frac{\tau_1}{\sigma_{n1}} = \frac{\tau_2}{\sigma_{n2}}, \quad (7)$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2. \quad (8)$$

联立可解得

$$\tau_1 = \frac{\sin \beta \cos \alpha \sin 10^\circ + \sin \beta \sin \alpha}{\cos \beta \cos 10^\circ + \sin \beta \cos \alpha \sin 10^\circ} \sin \beta \cos \alpha \cdot \sigma, \quad (9)$$

$$\tau_2 = \frac{\sin \beta \cos \alpha \sin 10^\circ - \sin \beta \sin \alpha}{\cos \beta \cos 10^\circ + \sin \beta \cos \alpha \sin 10^\circ} \sin \beta \cos \alpha \cdot \sigma, \quad (10)$$

$$JRC = \frac{\sin \beta \cos 10^\circ \cos \alpha \cos \omega}{\cos \beta \cos 10^\circ + \sin \beta \cos \alpha \sin 10^\circ}. \quad (11)$$

利用试验平台(图 1),测得粗糙度系数 JRC 与旋转角之间的关系,求得

$$JRC_1 \approx 0.227587,$$

$$JRC_2 \approx 0.256705,$$

$$JRC_3 \approx 0.288836.$$

把图 3 的试验数据代入式(1),求出滑落曲线的函数方程为

$$\beta_1 = 0.003673\alpha_1^2 + 20, \quad (12)$$

$$\beta_2 = 0.004\alpha_2^2 + 21, \quad (13)$$

$$\beta_3 = 0.004375\alpha_3^2 + 23. \quad (14)$$

当 $\alpha = 0$ 时,

$$JRC = \tan(b + 10) \cdot \cos \omega.$$

在图 2 所示试验中 $\omega = 45^\circ$, 所以有

$$b = \tan^{-1}(JRC / \cos \omega) - 10.$$

设

$$A = JRC \cdot x + \cos \omega \cdot y,$$

将 $JRC_1 \approx 0.227587, \omega = 45^\circ, A = 0.003673;$ $JRC_2 \approx 0.256705, \omega = 45^\circ, A = 0.004$ 代入联立可解得

$$A = 0.01123JRC + 0.00158 \cos \omega.$$

初步可以确定

$$\beta = (0.01123JRC + 0.00158 \cos \omega) \alpha^2 + \tan^{-1}(JRC / \cos \omega) - 10.$$

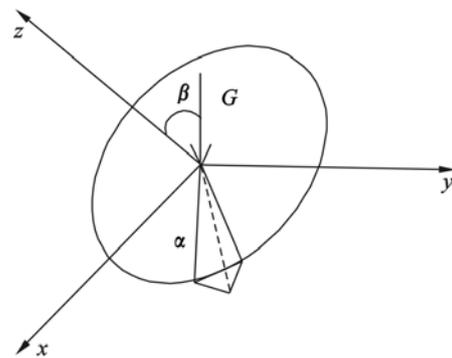


图 4 极限平衡状态受力分析图

Fig. 4 Limit equilibrium state of stress analysis

4 结 论

1) 结构面的断面角与楔块稳定性关系密切,结构面的断面角越小,楔块模型更稳定,断面角 ω 对二次式中 A 值和 b 值影响较大,且 ω 与 A 和 b 都负相关.

2) 结构面粗糙度系数越大,楔块越稳定,且结构面粗糙度系数 JRC 对函数式中的系数 A 与 b 都有影响,且为正相关.

3) 倾斜角 α 与旋转角 β 之间的关系式为

$$\beta = (0.01123JRC + 0.00158 \cos \omega) \alpha^2 + \tan^{-1}(JRC / \cos \omega) - 10.$$

当表示滑块空间姿态的点落在曲线上方区域内时,该滑块属于危险滑块,需要进行加固或支护;当点落在曲线下方区域内,该滑块较为安全.

(下转第 570 页)