

文章编号: 1673-5196(2017)06-0113-07

# Sarma 法的改进及在边坡稳定性研究中的应用

符贵军<sup>1,2</sup>, 任伟中<sup>2</sup>, 陈浩<sup>2</sup>, 李伯根<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 在传统 Sarma 法的基础上, 将水平地震加速度  $K_c$  以方位角的形式施加到块体之上, 推导改进 Sarma 法的理论公式. 从能量的观点出发, 通过标量化和矢量化两种处理手段, 研究条分角度、条分数和耗散能对安全系数  $F_s$  的影响. 结果表明, 改进 Sarma 法可以满足工程评价的需要; 当方位角取  $30^\circ \sim 100^\circ$  时, 计算收敛, 耗散能同裂隙角度呈线性关系, 不同的裂隙角度组合决定了安全系数  $F_s$  的变化曲线.

**关键词:** Sarma 法; 方位角; 耗散能; 裂隙角度

**中图分类号:** TU457 **文献标志码:** A

## Improvement of Sarma method and its application in investigation of slope stability

FU Gui-jun<sup>1,2</sup>, REN Wei-zhong<sup>2</sup>, CHEN Hao<sup>2</sup>, LI Bo-gen<sup>1,2</sup>

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock & Soil Mechanics, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Based on the traditional Sarma method, the seismic acceleration  $K_c$  was applied onto the blocks in the form of azimuth, and the theoretical formula for improving the Sarma method was deduced. Starting from the energy view point, and by means of two processing of scalarization and vectorization, the influence of slice division angle, number of slices division, and dissipated energy on the safety factor  $F_s$  was investigated. The result shows that the improved Sarma method will be able to meet the needs of the engineering project assessment. When the azimuth is taken as from  $30^\circ$  to  $100^\circ$ , the calculation will be convergent, the dissipated energy will be linearly dependent on crack angle, and different combinations of crack angles will determine the variation curve of safety factor  $F_s$ .

**Key words:** Sarma method; azimuth; dissipated energy; crack angle

边坡的稳定性问题是人类工程活动中所面临的挑战之一. 常用的评价方法分为刚体极限平衡法和有限元分析法两类, 二者主要的区别在于是否对岩土体的本构关系加以考虑. 自 1916 年瑞典条分法首次被提出以来, 近百年间, 极限平衡法已发展有十几种之多<sup>[1]</sup>, 其中以满足力矩平衡条件的 Bishop 法和满足所有平衡条件的 Janbu 法、Morgenstern-Price 法、Sarma 法应用最为广泛<sup>[2]</sup>.

Sarma 法<sup>[3]</sup>是基于斜条分的评价方法, 主要思想是强调滑面强度与裂隙强度同时达到极限, 即静力作用下, 假定初始坡体处于临界状态,  $C$ 、 $\varphi$  值完全

得到发挥没有发生折减, 安全系数  $F_s = 1$ , 然后对所有条分块体施加一个水平向的地震加速度  $K_c$ , 并将  $C$ 、 $\varphi$  值折减  $F_s$  倍, 从而由极限平衡推导得到  $K_c$  的公式表达. 通常情况下,  $K_c$  的施加值与公式值之间存在一个差值  $\Delta K_c$ , 改变  $F_s$  反复迭代使  $\Delta K_c$  趋于 0, 此时的  $F_s$  就是该边坡的安全系数, 这与 Zienkiewicz<sup>[4]</sup> 提出的强度折减法是一致的. 在应用过程中, 许多学者对 Sarma 法进行了完善, 朱大勇等<sup>[2-5]</sup> 给出了安全系数  $F_s$  的隐式表达, 并对其迭代过程给出了进一步的说明, 获得了良好的效果. 熊将等<sup>[6]</sup> 将块体完全浸没于水中, 评价了库区蓄水工况下, 改进 Sarma 法的适用性. 杨明成等<sup>[7]</sup> 针对 Sarma 法条间剪力方程不满足边坡稳定性分析的合理性要求和不能正确表示任意条块的条间剪力这一问题, 提出了

收稿日期: 2016-06-24

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51404239)

作者简介: 符贵军(1988-), 男, 山西忻州人, 博士生.

新的控制方程,确保了计算的收敛性.武雄等<sup>[8]</sup>加入各种工程因素的考虑,对 Sarma 法进行了改进,提出了 MSARMA 法.苏永华等<sup>[9]</sup>针对 Sarma 模式和经典响应面法的特点,发展了一种新的边坡稳定可靠性响应面分析方法.谭儒蛟等<sup>[10]</sup>利用遗传算法对 Sarma 法的滑面确定进行了全局优化.郑文等<sup>[11]</sup>将 Sarma 法同非饱和计算相结合,从基质吸力的角度分析了边坡的稳定性.

本次研究在前人成果的基础上,将地震加速度  $K_c$  以一定角度作为输入,分别在  $x$ 、 $y$  方向进行分解、叠加,由平衡条件重新导出了改进 Sarma 法的迭代公式,并从地震作用方位角的角度分析计算的收敛性.以此为基础,加入能量的观点,研究条块间滑动产生的耗散能以及条分角度、条分数对安全系数  $F_s$  的影响.

### 1 Sarma 法的改进

控制岩质边坡整体稳定性的关键因素往往是坡体内存在的各种裂隙和软弱结构面.针对这一特点,萨尔玛博士于 1979 年提出了 Sarma<sup>[12-13]</sup> 条分法,考虑了非垂直块体间相互剪切错动和界面上材料的破坏准则,对滑面没有严格要求,特别适合有陡倾节理面的岩质边坡分析.已有的 Sarma 法只考虑了水平的地震作用力,而实际坡体中受到的地震作用往往是具有一定角度的,故令地震作用方向同垂直方向的夹角为  $\theta$ ,得到条块分析模型,如图 1 所示.其中,  $F_i$  为第  $i$  条块坡面所受荷载;  $\gamma_i$  为第  $i$  条块坡面所受荷载与水平的夹角;  $W_i$  为第  $i$  条块的自重;  $K_c$  为临界地震加速度系数;  $\theta$  为地震作用方位与垂面的夹角;  $E_i$ 、 $E_{i+1}$  为作用在第  $i$  条块两侧的正压力;  $X_i$ 、 $X_{i+1}$  为作用在第  $i$  条块两侧的剪切力;  $N_i$  为作用在第  $i$  条块底面的正压力;  $T_i$  为作用在第  $i$  条块底面的剪切力;  $U_i$  为作用在第  $i$  条块底面的静水压力;  $Pw_i$ 、 $Pw_{i+1}$  为作用在第  $i$  条块两侧的静水压力;  $\alpha_i$  为第  $i$  条块底面与水平面的夹角;  $\delta_i$ 、 $\delta_{i+1}$  为第  $i$  条块两侧面与垂直方向的夹角;  $XT_i$ 、 $XT_{i+1}$ 、 $YT_i$ 、 $YT_{i+1}$  为第  $i$  条块顶面与前后侧交点的坐标;  $XB_i$ 、 $XB_{i+1}$ 、 $YB_i$ 、 $YB_{i+1}$  为第  $i$  条块底面与前后侧交点的坐标;  $XW_i$ 、 $XW_{i+1}$ 、 $YW_i$ 、 $YW_{i+1}$  为第  $i$  条块水位线与前后侧交点的坐标.

当坡体较为完整,为不透水介质时,将临界地震加速度  $K_c$  在  $x$ 、 $y$  方向上进行分解.假定岩土体均满足摩尔库仑准则,并记  $ZW_i$ 、 $ZW_{i+1}$  为第  $i$  条块前后侧水位线与底滑面的垂直高度,  $d_i$ 、 $d_{i+1}$  为第  $i$  条块前后侧面的长度,  $b_i$  为第  $i$  条块底面水平面上的投

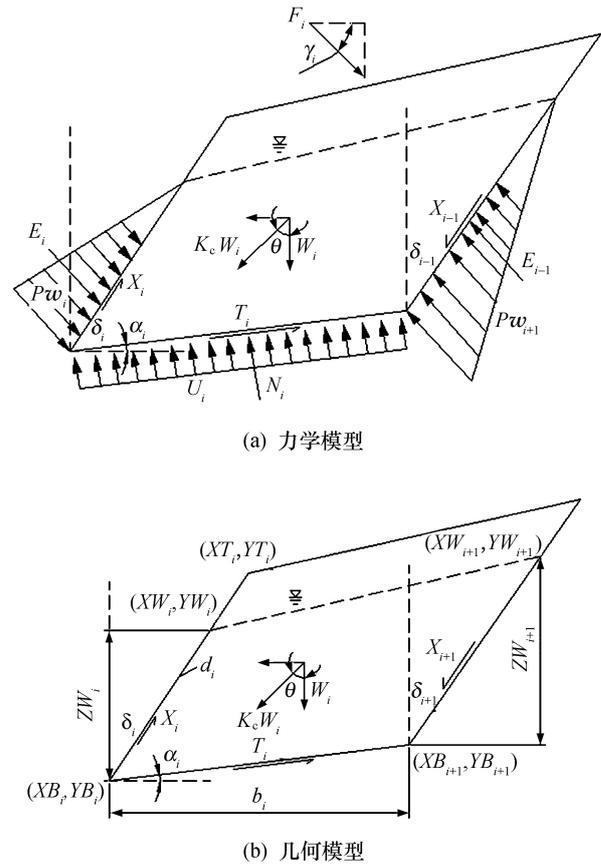


图 1 Sarma 法分析模型

Fig. 1 Analysis model in Sarma method

影长度,  $C_{bi}$ 、 $\varphi_{bi}$  为底滑面上的强度参数,  $C_{si}$ 、 $\varphi_{si}$  为裂隙面上的强度参数,  $R_w$  为水体容重, 根据极限平衡方程  $\sum F_x = 0$  和  $\sum F_y = 0$  可知:

$$N_i \cos \alpha_i + T_i \sin \alpha_i = K_c W_i (1 + \cos \theta) + X_{i+1} \cos \delta_{i+1} - X_i \cos \delta_i - E_{i+1} \sin \delta_{i+1} + E_i \sin \delta_i + F_i \sin \gamma_i \quad (1)$$

$$T_i \cos \alpha_i - N_i \sin \alpha_i = K_c \sin \theta W_i + X_{i+1} \sin \delta_{i+1} - X_i \sin \delta_i + E_{i+1} \cos \delta_{i+1} - E_i \cos \delta_i - F_i \cos \gamma_i \quad (2)$$

$$T_i = (N_i - U_i) \tan \varphi_{bi} + C_{bi} b_i \sec \alpha_i \quad (3)$$

$$X_i = (E_i - Pw_i) \tan \varphi_{si} + C_{si} d_i \quad (4)$$

$$X_{i+1} = (E_{i+1} - Pw_{i+1}) \tan \varphi_{s_{i+1}} + C_{s_{i+1}} d_{i+1} \quad (5)$$

经过一系列复杂的三角变换,可以推导得到  $K_c$  的公式表达:

$$K_c = \frac{a_n + e_n + e_n e_{n-1} a_{n-2} + \dots + e_n e_{n-1} e_{n-2} \dots e_2 a_1 + F_q - F_w}{p_n + e_n + e_n e_{n-1} p_{n-2} + \dots + e_n e_{n-1} e_{n-2} \dots e_2 p_1} \quad (6)$$

$$F_q = e_n e_{n-1} e_{n-2} \dots e_2 e_1 E_q \quad (7)$$

$$F_w = \frac{1}{2} R_w Z_w^2 \quad (8)$$

式中:  $E_q$  代表坡体前缘处的阻滑力, 当存在挡土结构时非 0;  $F_w$  代表坡体后缘拉裂缝充水时, 受到的静水压力作用;  $a_i, p_i, e_i$  为计算系数, 取值如下:

$$a_i = [W_i \sin(\varphi_{bi} - \alpha_i) + R_i \cos \varphi_{bi} + S_{i+1} \sin(\varphi_{bi} - \alpha_i - \delta_{i+1}) - S_i \sin(\varphi_{bi} - \alpha_i - \delta_i) + F_i \cos(\varphi_{bi} - \gamma_i - \alpha_i)] / [\cos(\varphi_{si+1} - \alpha_i - \delta_{i+1} + \varphi_{bi}) \sec \varphi_{si+1}]$$

$$p_i = W_i [\sin \varphi_{bi} \sin \theta_i - \sin(\theta_i + \alpha_i) \sin(\varphi_{bi} - \alpha_i)] / [\cos(\varphi_{si+1} - \alpha_i - \delta_{i+1} + \varphi_{bi}) \sec \varphi_{si+1} \sin \alpha_i]$$

$$e_i = \cos(\varphi_{si} - \alpha_i - \delta_i + \varphi_{bi}) \sec \varphi_{si} / [\cos(\varphi_{si+1} - \alpha_i - \delta_{i+1} + \varphi_{bi}) \sec \varphi_{si+1}]$$

$$R_i = C_{bi} b_i \sec \alpha_i - U_i \tan \varphi_{bi}$$

$$S_i = C_{si} d_i - P W_i \tan \varphi_{si}$$

当坡体较为破碎, 可以概化为透水介质时, 水体的作用以动水压力的形式表现. 计  $F_{di}$  为第  $i$  条块的动水压力,  $\beta_i$  为第  $i$  条块的动水压力与水平面的夹角, 按照之前的思路可以推导得到相同的  $K_c$  公式表达, 但以下计算系数发生变化:

$$a_i = [W_i \sin(\varphi_{bi} - \alpha_i) + R_i \cos \varphi_{bi} + S_{i+1} \sin(\varphi_{bi} - \alpha_i - \delta_{i+1}) - S_i \sin(\varphi_{bi} - \alpha_i - \delta_i) - F_{di} \cos(\varphi_{bi} + \beta_i - \alpha_i) + F_i \cos(\varphi_{bi} - \gamma_i - \alpha_i)] / [\cos(\varphi_{si+1} - \alpha_i - \delta_{i+1} + \varphi_{bi}) \sec \varphi_{si+1}]$$

$$R_i = C_{bi} b_i \sec \alpha_i$$

$$S_i = C_{si} d_i$$

至此, 地震作用方位角的影响在 Sarma 法中得到反映, 其迭代求解过程与传统 Sarma 法相同. 令  $\Delta K_c < 10^{-5}$ , 则有计算流程图如图 2 所示.

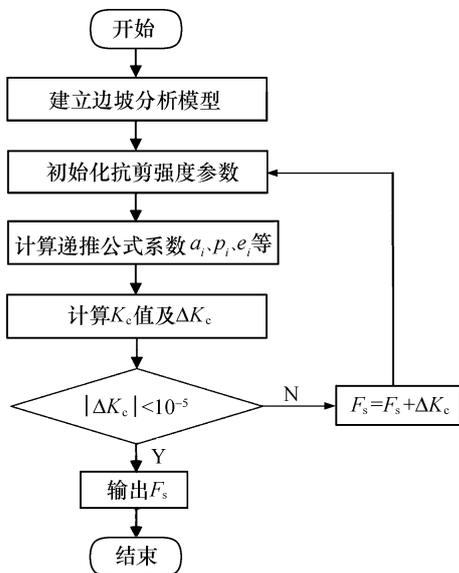


图 2 计算流程图

Fig. 2 Computation flow-chart

## 2 地震作用方位角影响

选取一概化的边坡, 指定相应的滑裂面. 其几何模型如图 3 所示, 共划分 12 个条块. 边坡高度 105.8 m, 岩石容重为 24 kN/m<sup>3</sup>, 水的容重为 10 kN/m<sup>3</sup>. 滑面  $C$  值为 70 kPa, 摩擦角为 28°; 裂隙面  $C$  值为 100 kPa, 摩擦角为 30°. 统一采用垂直条分, 各裂隙由坡脚向上依次标号, 仅考虑简单充水情况. 模型关键点坐标列于表 1.

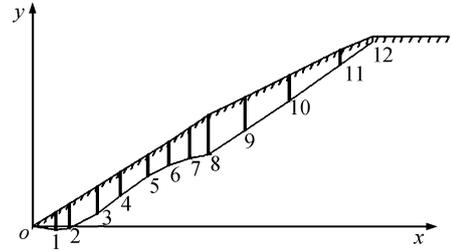


图 3 分析模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of analysis model

表 1 模型点坐标

Tab. 1 Point coordinates of model

点号	$x$ 向坐标	坡面 $y$ 坐标	滑面 $y$ 坐标	水面 $y$ 坐标
0	0	0	0	0
1	10.00	8.00	-2.00	7.00
2	16.00	12.80	-1.00	11.50
3	28.00	22.40	7.00	20.50
4	38.00	30.40	17.00	27.90
5	50.00	40.00	28.00	36.90
6	59.00	47.20	34.00	44.20
7	68.00	55.00	38.00	51.50
8	76.00	62.00	40.00	57.90
9	92.00	72.00	53.50	68.70
10	111.00	84.20	69.80	81.60
11	133.00	98.30	90.00	96.60
12	147.00	105.80	102.80	103.80

实际工程中, 经常会遇到人工爆破和地震对边坡施加随机的瞬时荷载, 降低坡体稳定性. 在不透水介质情况下, 选取临界地震加速度  $K_c$  的一系列值, 通过迭代求得作用方向为水平时  $K_c$  和  $F_s$  的关系曲线, 如图 4 所示. 可以看出, 随着  $K_c$  的增大,  $F_s$  逐渐减小, 整个关系呈二次曲线关系. 需要指出, 在计算过程中, 当取  $|\Delta K_c| < 10^{-5}$ ,  $K_c > 0.3$  时, 迭代计算发生不收敛现象, 已经得不到正确解答, 故放宽迭代限制至  $|\Delta K_c| < 10^{-2}$ . 进行  $K_c > 0.3$  时的计算, 分析曲线发展的趋势可知, 此时的结果已严重失真, 不能用于工程应用. 参照 DL 5073—2000 《水工建筑物抗震设计规范》中设防烈度 9 度时, 水平向设计地震加速度代表值为 0.4g 的规定, 认为改进后的 Sarma 法可以满足工程实践的需要. 当遇到极罕见地震时,

由于坡体可能的破坏模式已发生改变,本文的方法得不到合理的结果.

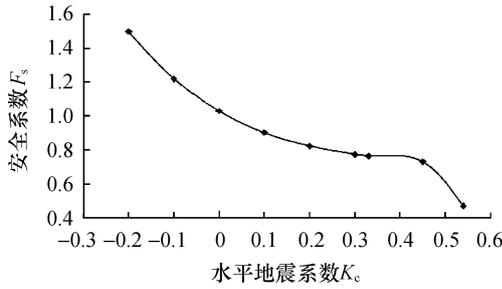


图 4 水平地震系数影响

Fig. 4 Influence of horizontal seismic coefficient

在自然条件下,地震力的作用不可能仅出现在水平方向上,必然会有作用方位角度差异的影响,固定一系列  $K_c$  值,变化其与垂直方向的夹角,可以得到角度与安全系数的关系曲线,如图 5 所示. 由图 5a 可以知道,当  $K_c$  值不变时,随着  $\theta$  角的增大,安全系数  $F_s$  先减小后增大;当达到  $90^\circ$  左右时,即通常意义上的水平方向时,达到最小. 二者的关系是非线性的,在极坐标图 5b 中可以明显看到,随  $K_c$  的增大,整个迭代收敛区域呈明显的减小趋势,超出这一范围,计算将会发生死循环或不合理现象. 这意味着改进后的 Sarma 法对于地震作用方位角的考虑应该加入一定的限制条件,尤其是考虑双向作用时不能任意选取. 一般情况下,选取  $30^\circ$  到  $100^\circ$  较为

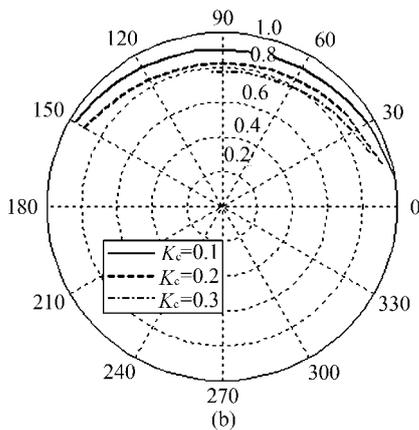
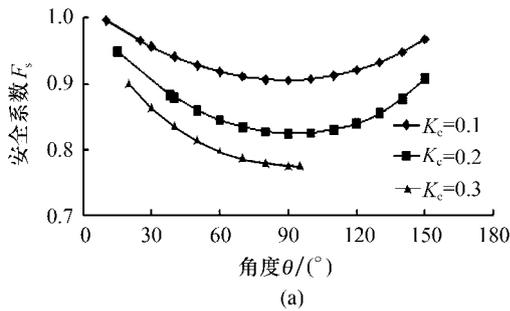


图 5 地震作用方位角影响

Fig. 5 Influence of azimuth of earthquake action

合适. 研究结果也表明,地震的作用方向对坡体的稳定性有着很大影响. 在特定地震波作用下,存在优势破坏方向的现象. 可以通过二维地震波的绝对作用方向与大小的资料,结合本文的结论过滤数据,进而计算边坡的时程安全系数  $F_s$  曲线.

### 3 能量角度分析

热现象是人类最早广泛接触到的自然现象之一. 熵增原理从理论的角度解释了热过程的方向性,即非理想状态下,系统总是向着总熵增大的方向进行<sup>[14]</sup>. 对于边坡工程,在短时期内,可以看做一个封闭系统,即热力系统和环境之间只有能量交换而无物质交换(亦称为质量控制). 在外力的作用下,边坡稳定状态的劣化,可以看作是坡体内裂隙的发展和滑面的蠕动对整个系统能量的耗散. 1992 年中国学者陈祖煜<sup>[15]</sup>同 Donald 教授合作,以速度矢量为桥梁,考虑了塑性法则与位移协调场,由虚功原理得到了坡体的最大安全系数,属于坡体的上限解. 已有研究成果表明,这种方法与 Sarma 法是等效的,具有严格的理论基础.

对于一个边坡,当采用 Sarma 方法进行稳定性分析时,可以将整个破坏看作是外力向量场作用的结果,因为能量耗散是由条块间摩擦和滑面滑动而产生的,故以矢量形式的  $E_{\theta_i}$  与  $E_i$  分别表达两者,可以得到安全系数同耗散能的对应关系. Sarma 法对  $F_s$  的计算,是假定底滑面与条间抗力同时发挥了作用,故在发生微小虚位移  $\Delta S$  的情况下,底滑面的能量耗散  $E_i$  是不变的. 随着条间裂隙角的变化,块体之间的能量耗散  $E_{\theta_i}$  随角度发生变化,当强度条件都不变时,可以得到:

$$F_s = f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n-1}) \quad (8)$$

说明安全系数是所取裂隙角的函数. 下面通过能量标量化和矢量化两种处理方式,对改进 Sarma 法中耗散能、条分角度和条分数对安全系数的影响作出分析.

#### 3.1 标量化

将耗散能作为一个标量处理. 沿用之前的分析模型,以垂直条分为基准,顺时针方向转动为正,逆时针方向转动为负,分别对各条间长度以 22 m 为标准进行归一化处理. 不考虑水位线的影响,  $K_c = 0$ , 进行裂隙角度的变换,耗散能的大小为条间摩擦力所做的功,即  $E_{\theta_i} = X_i \cdot \Delta S_i$ , 由于各条裂隙的实际错动值  $\Delta S_i$  十分微小,这里假设  $\Delta S_i$  均正比于各裂隙长度. 在此基础上叠加计算,得到边坡整体由裂隙产生的耗散能. 考虑到实际工程中,随着坡体稳定

性的下降, 裂隙角度的变化是有限的, 故以  $-10^{\circ}$  到  $10^{\circ}$  作为本次研究的考虑范围.

试验组以全部垂直条分情况为基准. 一类方案为各裂隙均转过相同的角度, 每条裂隙均由  $-10^{\circ}$  起, 每次增加  $2^{\circ}$ , 直至  $10^{\circ}$  为止进行试验, 合计试验 10 次. 二类方案以旋转角度均为正数时, 各裂隙依次转过  $2^{\circ}$ 、 $4^{\circ}$ 、 $6^{\circ}$ 、 $8^{\circ}$ 、 $10^{\circ}$  并循环至最后一条裂隙为首次试验; 之后试验, 首裂隙起始变化角依次取  $4^{\circ}$ 、 $6^{\circ}$ 、 $8^{\circ}$ , 其后的条块以等差数列的形式循环进行, 变化范围为首裂隙变化角与  $10^{\circ}$  之间; 最后一次试验, 以  $1^{\circ}$ 、 $3^{\circ}$ 、 $5^{\circ}$ 、 $7^{\circ}$ 、 $9^{\circ}$  的形式进行循环转动以区分总的变化角度, 合计试验 5 次; 当旋转角度为负数时, 采用相同的方法试验 5 次. 3 类方案以各裂隙转过  $2^{\circ}$ 、 $-4^{\circ}$ 、 $6^{\circ}$ 、 $-8^{\circ}$ 、 $10^{\circ}$  并循环至最后一条裂隙为首次试验, 依照方案二的方法进行, 合计试验 10 次.

将结果绘于图 6. 由图 6a、图 6d、图 6g 可以看到, 随着整体角度的增大, 坡体内耗散能也随之增大, 基本呈线性关系. 这是由于标量条件下, 耗散能的大小主要取决于裂隙长度, 进而同裂隙角度成正相关性. 方案一中, 图 6b、图 6c 安全系数的关系具有明显的波峰波谷的情况, 即有局部的极值存在. 在

图中  $-90^{\circ}$  左右达到最大,  $20^{\circ}$  左右达到最小, 最小值与垂直条分的情况差别不大, 之后坡体的安全性同角度的增大一起提高. 方案二中, 图 6e、图 6f 安全系数的关系由存在明显的极值转变为相对不规则. 在  $-50^{\circ}$  左右取得最小值, 之后随角度的增大, 坡体的安全性得以提高. 方案三中, 图 6h、图 6i 中数据点因标量表示的原因, 无法分辨, 变得杂乱无章, 不再具有可讨论性. 综上所述, 条间裂隙角的变化和耗散能具有一定的相关性. 裂隙发展存在优势方向时, 随着裂隙角度向坡体倾向的偏转, 耗散能逐渐减小, 可以用裂隙偏转角来间接表明耗散能同安全系数的关系; 当坡体裂隙同方向转动时, 其安全系数的曲线可以用一条平滑的曲线来表示, 并伴随有局部的极大、极小值点. 而当裂隙间随机转动时, 这种关系被打破, 标量情况下很难说明问题, 需要进行矢量条件下的分析. 同时由图 6b、图 6c 可以看到, 从能量的角度考虑裂隙对坡体安全性的影响是有条件的, 不是一般意义上的裂隙越多, 坡体风化越严重; 相反, 一定程度上讲更多的裂隙考虑意味着更大的阻滑力发挥, 安全系数将增大. 故对于一个实际的工程边坡, 对于实际调查部位的裂隙或结构面应赋以结构面参

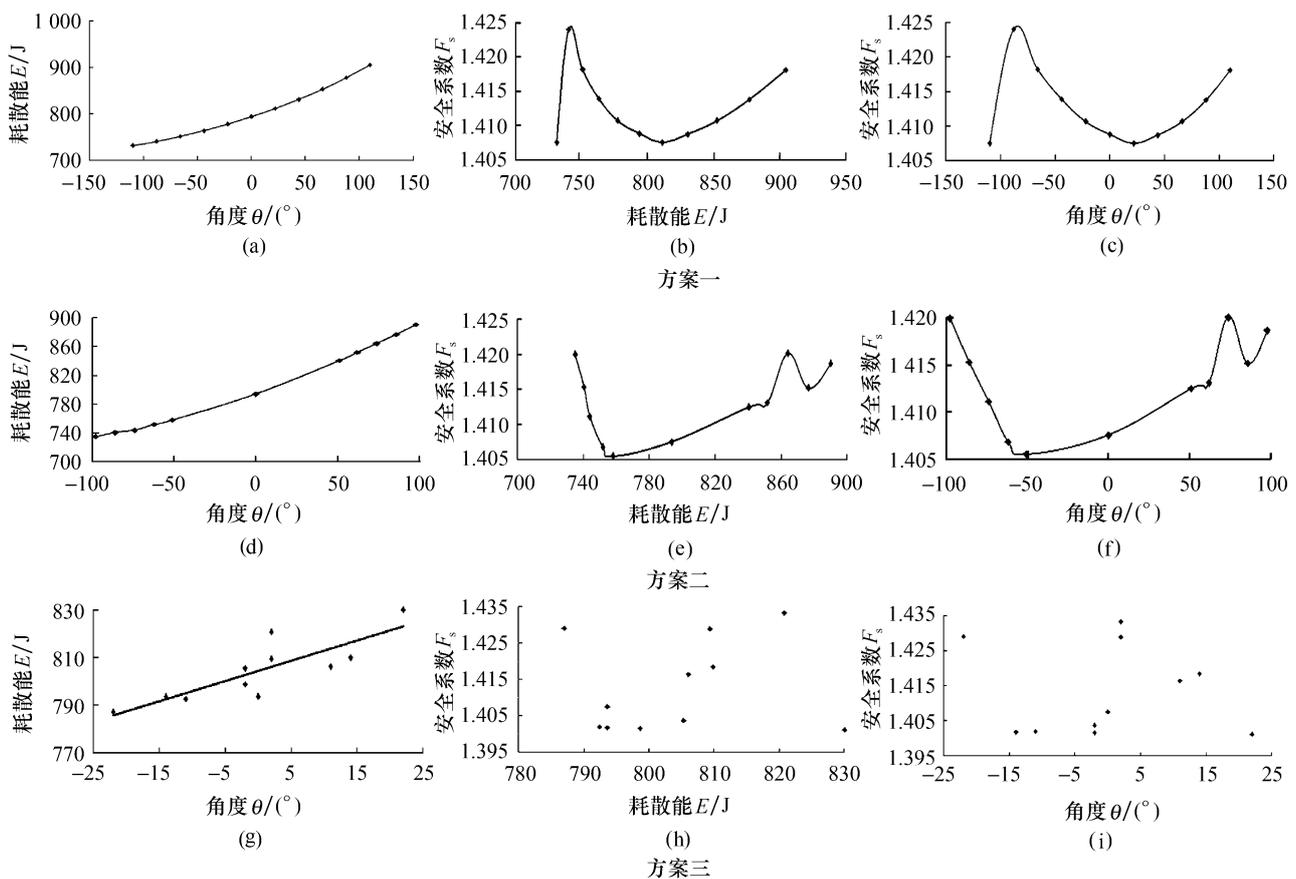


图 6 成果分析图

Fig. 6 Analysis diagram of experimental result

数,而其他条分的强度参数应取为底滑面参数,以降低这种安全系数扩大现象,使之更为合理.

以垂直条分时的安全系数作为分析对象,依次去掉图 3 中的 1 号、11 号裂隙,5 号、7 号裂隙,3 号、9 号裂隙,2 号、10 号裂隙,4 号、8 号裂隙,使得原条分块体的数量  $N$  由 12 降为 10,8,6,4,2,进而形成新模型并计算.除条块为 2 时  $F_s=1.7$  明显不合理外,其余结果如图 7 所示.可以看到,安全系数随条分数的增加呈曲线变化,在  $N=10$  时达到局部极大值;数据点集中在  $[1.40, 1.42]$  区间之内,说明当条分数划分适中时, Sarma 法可以较好地评价实际工况.当  $N=2$  时,可以看到由程序计算得出的  $F_s$  发生异常,这是由于条分数过少,模拟出的滑面已经严重变形.说明当面对具体工程边坡时,块体的条分应在充分调查的基础上,合理反映推测滑面的位置,尤其是变坡度和转角位置,才能收到满意的效果.

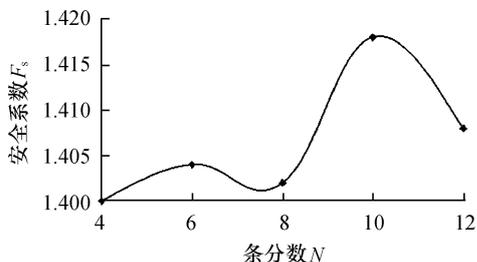


图 7 条分数影响

Fig. 7 Influence of slice division number

### 3.2 矢量化

由量化的结果可知,安全系数与能量的映射关系很难完全通过二维平面展现出来,为此,对能量进行矢量化处理.将每条裂隙计算得到的耗散能在  $x$ 、 $y$  方向上进行分解,规定投影值沿图 3 中  $x$  轴负向与  $y$  轴正向为正值,沿  $x$  轴正向为负值,即以坡面为界,指向坡外的能量为流失,指向坡内的能量得到保留.计算耗散能  $E_x$  和  $E_y$ ,组成  $E_x-E_y$  平面.再构建一条  $F_s$  轴垂直于该平面,反映安全系数的取值,从而得到 3 者的维度空间.对于具体边坡,不同的试验最终会构成一状态面,其最小值即为要寻找的最危险工况点.因为试算工作量太大,这里仅利用已有的试验数据,以矢量化耗散能的大小  $E$ 、 $E_x$  到  $E$  的夹角(符号同  $E_x$ )和安全系数  $F_s$  为研究对象进行平面展布,得到 3 者之间的关系曲线,绘于图 8.

可以看到 3 种方案的能量同转角的关系均基本呈线性关系,而安全系数与能量的关系随转角方式的不同有明显的差异,有极值存在.方案三经矢量化处理后,数据由杂乱无章转化为可以定性分析.对于本文的边坡算例,当裂隙转角为同向时,耗散能与安

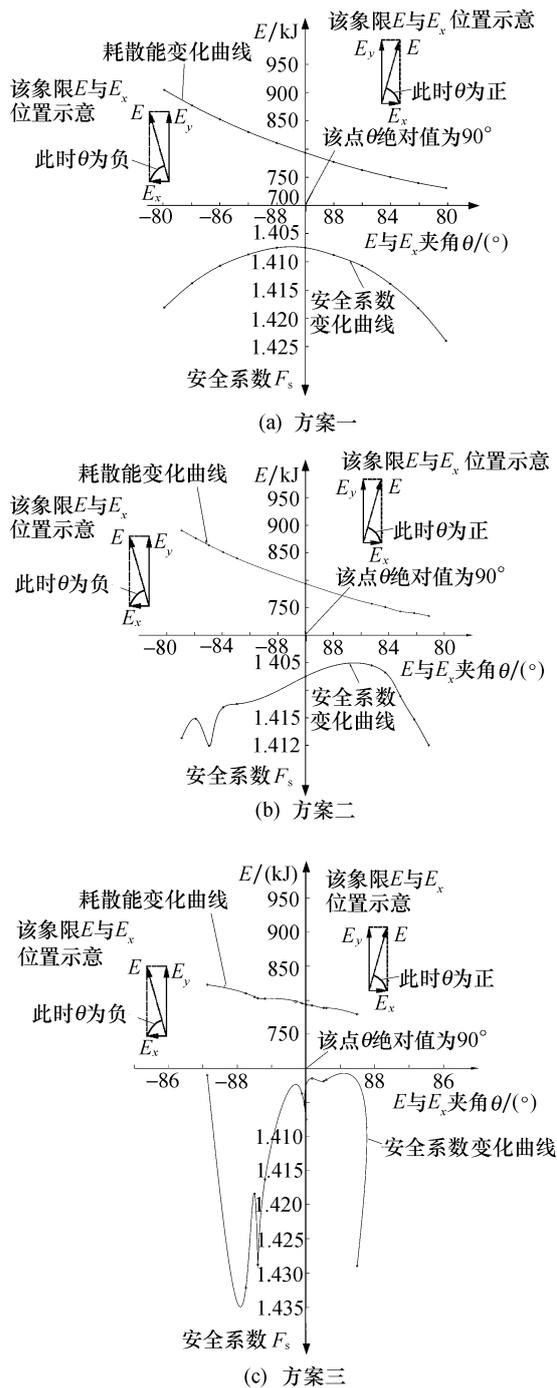


图 8 矢量化曲线

Fig. 8 Curve of vectorization

全系数的关系总体为曲线的形式;转角相同条件下,曲线严格平滑,在垂直条分时取得最小值;转角不同条件下,曲线发生畸化变形,有局部极值,但最小值的变化范围不大,可以近似取垂直条分时的  $F_s$  作为边坡的安全系数.当裂隙随机转动,特别是以正负向交错的“八”字型裂隙作用时,耗散能与安全系数的关系很难用数学公式来表述,局部极值普遍存在且呈跳跃性.此时垂直条分时的  $F_s$  代表性变差,需要

对其进行一定的降低以提高边坡的设计安全储备。结果也表明, Sarma 法所计算结果的波动区间为  $10^{-2} \sim 10^{-2}$ , 足以满足一般的工程应用。将能量、裂隙角同安全系数  $F_s$  的关系三维化, 探索发展以裂隙角为损伤变量的评价体系, 会极大地拓展 Sarma 法的应用范围, 达到通过监测裂隙变化而动态监控坡体安全的目的。更为普适性的规律需要进一步研究。

#### 4 结论

1) 在传统 Sarma 法的基础上, 将水平地震加速度  $K_c$  以作用方位角的形式加以考虑, 即定义  $K_c$  与垂直方向的夹角为变量, 并分解为  $x$  向、 $y$  向作用施加到块体之上, 推导了改进 Sarma 法的理论公式。

2) 结合一边坡算例, 对改进 Sarma 法的应用性进行了研究。结果表明, 虽然该方法满足一般工程的需要, 但随着所遇震级的增大, 因方位角的影响, 安全系数  $F_s$  的计算结果存在不收敛的现象。建议方位角取为  $30^\circ \sim 100^\circ$ 。

3) 从 Sarma 法考虑条间抗力的基本思路出发, 假定抵抗力同时发挥, 分 3 种方案以标量和矢量 2 种方式, 就条间裂隙错动时形成的耗散能对安全系数的影响进行讨论。由成果曲线可知, 耗散能同裂隙角度基本呈线性关系, 而  $F_s$  的变化随裂隙角度组合的不同会产生差异, 有极值存在。以垂直条分情况为基准, 同向转动时, 曲线基本为二次曲线形式; 当裂隙为“八”字型时, 曲线变为跳跃性变化, 整体波动区间  $10^{-2} \sim 10^{-2}$ 。

4) 工程应用中, Sarma 法条分数的划定需要合理地反映推测滑动面位置, 尤其是考虑在变坡度和转角处适当加密。在参数赋值时, 应将主要的调查裂隙或结构面强度参数取为结构面强度, 其他底滑面强度参数取为滑面强度, 才能得到合理的结果。同时, 降低因条间抗力作用而产生的安全系数  $F_s$  的放

大效应, 能起到增加坡体的安全储备的效果。

#### 参考文献:

- [1] 朱大勇, 李焯芬, 姜弘道, 等. 基于滑面正应力修正的边坡安全系数解答 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2788-2791.
- [2] 朱大勇, 李焯芬, 黄茂松, 等. 对 3 种著名边坡稳定性计算方法的改进 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 183-194.
- [3] 袁继国, 符贵军. 边坡开挖松弛区划分及参数敏感度分析 [J]. 西安理工大学学报, 2013, 29(3): 301-306.
- [4] ZIENKIEWICZ O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and non-associated visco-plasticity in soil mechanics [J]. Geotechnique, 1975, 25(4): 671-685.
- [5] 朱大勇, 范鹏贤, 郭志昆. 关于 Sarma 法改进算法的补充 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2343-2345.
- [6] 熊将, 王涛, 盛谦. 库区边坡稳定性计算的改进 Sarma 法 [J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 323-326.
- [7] 杨明成, 郑颖人. 关于 Sarma 法中条间剪力方向的研讨 [J]. 地下空间, 2002, 22(2): 142-144.
- [8] 武雄, 姚爱军, 衡朝阳, 等. 边坡稳定性评价 MSARMA 法及最佳加固力研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(2): 107-110.
- [9] 苏永华, 赵明华, 邹志鹏, 等. 边坡稳定性分析的 Sarma 模式及其可靠度计算方法 [J]. 水利学报, 2006, 31(4): 457-463.
- [10] 谭儒蛟, 李明生, 张建根, 等. 岩质边坡最危险滑裂面的 GA-Sarma 算法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊): 2866-2871.
- [11] 郑文, 艾熙昭. Sarma 法中非饱和计算功能的实现探讨及应用评价 [J]. 价值工程, 2014, 33(28): 74-76.
- [12] SARMA S K. Stability analysis of embankments and slopes [J]. Geotechnique, 1979, 23(3): 423-433.
- [13] SARMA S K. A note on the stability of slopes [J]. Geotechnique, 1988, 37(1): 107-111.
- [14] 周家伍, 刘元雪, 陆新, 等. 土体耗散势的不存在与不可解耦 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 607-617.
- [15] 吴超, 陈祖煜, 王玉杰, 等. 遗传算法在斜条分上限法中的应用探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 835-841.