

基于3DEC的岩质边坡安全系数影响因素敏感性研究

臧浩¹, 陈鹏², 赵盾³, 董玉芬¹

(1.山东省煤田地质局第一勘探队, 山东 青岛 266500; 2.日照市生态环境局莒县分局, 山东 日照 276800;
3.山东省煤田地质局, 山东 济南 250000)

摘要:为研究岩质边坡中结构面几何参数及力学参数对边坡安全稳定性的影响,文中采用离散元软件3DEC进行数值模拟试验;以安全系数为指标,结合响应面分析法,研究边坡结构面几何参数倾向、倾角及力学参数法向刚度(K_n)、切向刚度(K_s)、粘聚力(c)、内摩擦角(φ)对影响边坡稳定性敏感程度;结果显示,结构面的几何参数是边坡的稳定性的前提条件,在具备滑塌条件的情况下,结构面的力学参数,将进一步影响边坡的稳定性;其中结构面的切向刚度和内摩擦角对边坡稳定性有高敏感度,按照敏感度由大到小排序,为切向刚度>内摩擦角>粘聚力>法向刚度;同时发现内摩擦角和切向刚度与边坡安全性因素之间呈相互促进作用。

关键词:安全系数;岩质边坡;边坡结构;敏感性;响应面分析

中图分类号:P694,X43

文献标识码:A

doi:10.12128/j.issn.1672-6979.2021.08.010

引文格式:臧浩,陈鹏,赵盾,等.基于3DEC的岩质边坡安全系数影响因素敏感性研究[J].山东国土资源,2021,37(8):71-77.ZANG Hao, CHEN Peng, ZHAO Dun, et al. Sensitivity Study on Influencing Factors of Safety Coefficient of Rock Slope Based on 3DEC[J].Shandong Land and Resources,2021,37(8):71-77.

0 引言

岩质边坡的失稳常为块体失稳,一般表现由几组结构面组合和临空面切割的岩块发生失稳;1985年,石根华等首先提出关键块体理论,成为块体失稳分析的重要理论^[1-3],目前,岩质边坡稳定性分析有定性分析法和定量分析法;定性分析是充分考虑地质条件等各类影响因素,从而对其边坡的稳定性和其发展趋势进行评价,所应用的主要是极射赤平投影法;定量分析法主要有极限平衡法、数值分析法和模糊综合评判法;近年,随着计算机科学的发展,数值分析法(离散单元法、非连续变形分析法、有限差分法等)^[4-8]在边坡稳定性分析中得到了广泛应用。

离散元法是将岩体视为由裂隙切割的非连续介质,1971年,由Cundall P. A等^[9]最先提出将离散元法用于岩石力学研究,块体由岩体裂隙切割形成并相互镶嵌排列,在外力或边界条件变化时,块体间产生作用力,导致岩体空间状态发生变化;其考虑了

块体之间滑动、平移、转动和岩体断裂等复杂过程,可以较真实、动态地模拟边坡块体在开挖过程中应力、位移和变形状态的变化特征以及岩体破坏过程^[10-12]。因此,该方法用于边坡块体稳定性分析具有较好的适宜性。

把岩块之间具有一定方向、延展较大的地质界面称为结构面,在离散元分析中将结构面看做特殊的地质体,结构面的存在直接影响了岩体的变形和强度,一定程度上控制着边坡的稳定性^[13],因此,探索结构面对高陡岩质边坡稳定性的影响有着重要意义;文章通过对结构面的力学参数模拟分析,探索结构面参数对高陡岩质边坡稳定性影响的敏感性程度。

1 基本原理及方法

1.1 离散元计算原理与参数选择

三维的离散元模型是面-面接触离散元刚性的块体模型,岩体受不连续结构面控制,在接触面中上

收稿日期:2021-05-26;修订日期:2021-06-25;编辑:王敏

基金项目:山东省生态修复奖补基金(项目编号 SDGP371121201902000326)

作者简介:臧浩(1989—),男,山东临沂人,工程师,主要从事地质环境及生态环境污染与修复研究工作;E-mail:zanghao77@126.com

的法向和切向力表示为：

$$F_n=-k_nA\Delta\mu_n\tag{1}$$

$$F_s=-k_sA\Delta\mu_s\tag{2}$$

其中, F_n 、 F_s 分别为接触面上的法向和切向作用力, $\Delta\mu_n$ 、 $\Delta\mu_s$ 分别为块体间相对法向和切向位移, k_n 、 k_s 分别为结构法向和切向刚度; A 为结构接触面面积;

离散元法求解是采用动态松弛法对运动方程进行求解^[12], 其本质是对临界阻尼震动方程进行逐步积分求解, 阻尼吸收系统的动能, 当阻尼取值为临界值时, 系统的动能消失, 相应函数收敛, 实现将静力学问题转化为动力学问题解决; 离散元的基本运动方程:

$$m\mu(t)+c\mu(t)+k\mu(t)=f(t)\tag{3}$$

式中 m 为单元的质量, μ 为位移; t 为时间; c 为阻尼系数, f 为单元所受的外荷载。

阻尼系数采用质量阻尼系数和刚度阻尼系数计算:

$$c=c_am+c_bk\tag{4}$$

其中, c_a 为质量阻尼比例系数, c_b 为刚度阻尼比例系数, k 为刚度系数。

在利用离散元进行边坡稳定性分析时, 主要是通过逐渐折减岩体及结构面的力学参数, 通过迭代计算, 直至收敛, 达到临界状态时的折算系数作为边坡的安全系数 F_k 。

$$c_k=c/F_k\tag{5}$$

$$\varphi_k=\arctan(\frac{\tan\varphi}{F_k})\tag{6}$$

式中, c_k 、 φ_k 分别为折减后的粘聚力和内摩擦角; c 、 φ 分别为岩体及结构面的粘聚力和内摩擦角。

1.2 敏感性分析计算方法

边坡敏感性分析是通过边坡稳定性系数的相对变化率与对应的因素相对变化率之间的比值来衡量的; 将边坡稳定性系数 F_k 看作是各影响因素的函数^[14-15], 敏感性分析通过如下计算: $F_k=f(X_1,X_2,\cdots,X_n)$; 影响因素 X_i 的敏感度 S_i 通过如下计算:

$$S_i=\frac{\Delta F_{si}}{F_{si}}/\frac{\Delta X_i}{X_i}\tag{7}$$

式中: $\Delta F_{si}/F_{si}$ 为稳定性系数相对变化率, $\Delta X_i/X_i$ 为影响因素相对变化率;

S_i 越大说明该条件下对 X_i 越敏感。

2 数值模拟计算

采用三维离散元软件 3DEC 进行边坡的稳定性数值模拟; 建立模型为花岗岩质边坡, 长 400 m, 宽 200 m, 高 110 m, 坡高 80 m, 坡向 0°, 坡角 70°的边坡几何体, 主要对结构面的几何特性和结构面的力学参数进行模拟; 选择结构面的几何特性为结构面倾向和倾角; 结构面的力学参数有法向刚度(K_n)、切向刚度(K_s)、粘聚力(c)、内摩擦角(φ)及抗拉强度(σ); 花岗岩质块体力学参数见表 1;

表 1 块体力学参数

岩石名称	密度/ (kg/m ³)	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	内摩擦角 /(°)	粘聚力 /MPa	张拉强度 /MPa
花岗岩	2500	27	2	42	2.4	1

2.1 结构面几何参数数值模拟

在以上边坡模型基础上, 设计一组结构面, 力学参数见表 2; 首先以结构面倾角为常量, 倾向为变量, 边坡安全系数为因变量, 其次以倾向为常量, 倾角为变量, 边坡安全系数为因变量; 模拟结构面几何参数中结构面倾向和倾角对边坡稳定性的影响; 结构面几何参数试验方案及计算结果见表 3; 模拟过程示意图见图 1。

表 2 结构面力学参数

结构面类型	法向刚度 /(GPa/m)	切向刚度 /(GPa/m)	内摩擦角 /(°)	粘聚力 /MPa	张拉强度 /MPa
裂隙	5	0.5	15	0.2	0

表 3 结构面几何参数试验方案

试验编号	倾角 /(°)	倾向 /(°)	安全系数	试验编号	倾角 /(°)	倾向 /(°)	安全系数
1	45	0	0.27	14	0	30	5.77
2	45	30	0.83	15	15	30	1.4
3	45	45	1.31	16	30	30	0.56
4	45	60	1.82	17	45	30	0.83
5	45	90	5.06	18	60	30	1.68
6	45	120	6.04	19	90	30	6.1
7	45	180	6.04	20	135	30	6.1
8	45	240	6.04	21	180	30	6.04
9	45	270	5.06				
10	45	300	1.82				
11	45	315	1.31				
12	45	330	0.83				
13	45	360	0.27				

2.2 结构面力学参数数值模拟

根据殷跃平等^[16]、冯振等^[17]、刘传正等^[18]前人

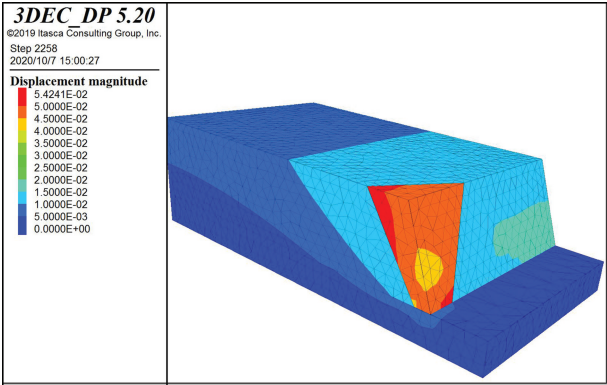


图 1 几何参数-位移量模拟示意图

对滑动面力学参数对滑坡稳定性的研究,并实地采取日照地区两处结构面岩石样品,结构面胶结类型分别为硅质胶结和泥质胶结,结果见表 4;通过对比分析,在自然界中不同成因的结构面在其力学参数方面存在明显的各向异性;基于结构面构造的相似性,对前人在结构面力学参数研究和本次样品实验值进行对比分析,综合确定本次模拟中结构面的力学参数取值范围。同时利用响应面分析法对岩土力学参数模拟已有研究^[19-21],本次设计结构面数量及几何特性见表 5,结构面力学参数响应面法试验方案及计算结果见表 6,模拟过程示意图见图 2。

表 4 结构面几何参数试验方案结构面力学因素水平

编号	法向刚度 /(GPa/m)	切向刚度 /(GPa/m)	内摩擦角 /(°)	粘聚力 /MPa	数据来源
1	2.00	0.05	20.00	0.20	殷跃平等 ^[16]
2	8.00	8.00	16.00	0.03	冯振等
3	—	—	7.00	0.04	刘传正等
4	3.00	1.50	25.00	0.30	硅质胶结
5	1.00	0.02	8.00	0.02	泥质胶结
模拟取	1	0	5	0	最小值
值范围	10	8	45	1	最大值

表 5 结构面几何设计方案

结构面	倾角/(°)	倾向/(°)
结构面 1	60	340
结构面 2	30	290
结构面 3	45	60

3 结果分析

3.1 几何参数影响分析

通过模拟分析,在结构面倾角 45°为常量,倾向作为自变量,模拟安全系数结果见表 3,变化曲线见

图 3;由图可见,安全系数随着倾向先增大后变缓不变,在倾向超过 240°后,逐渐减小;以倾向 180°呈轴对称;在倾向 0°~60°,安全系数与倾向呈线性正相关关系,倾向在 60°至 90°呈近指数关系,倾向 90°至 180°之间,安全系数增幅变缓,甚至不变。分析原因主要是,边坡坡向与节理面倾向相近或相同,产生近同向的顺层滑塌,即:结构面与边坡坡向产生夹角(0°~180°),夹角越大,安全系数越高,边坡越稳定。

表 6 结构面力学参数设计方案

试验 编号	法向刚度 /(GPa/m)	切向刚度 /(GPa/m)	内摩擦角 /(°)	粘聚力 /MPa	安全 系数
1	5.5	0	25	0	0.01
2	10	4	25	0	1.24
3	5.5	4	25	0.5	1.23
4	1	4	25	0	1.28
5	5.5	8	5	0.5	0.24
6	5.5	0	45	0.5	0.02
7	5.5	0	25	1	0.2
8	5.5	4	25	0.5	1.29
9	1	4	45	0.5	2.3
10	5.5	4	5	1	1.35
11	5.5	4	5	0	0.24
12	1	8	25	0.5	1.19
13	5.5	4	25	0.5	1.27
14	5.5	4	25	0.5	1.26
15	1	4	5	0.5	0.24
16	10	4	25	1	1.75
17	1	4	25	1	1.84
18	10	4	45	0.5	2.34
19	5.5	4	45	0	2.29
20	10	8	25	0.5	1.29
21	5.5	4	45	1	2.53
22	5.5	8	25	0	1.28
23	5.5	8	25	1	1.87
24	10	4	5	0.5	0.23
25	5.5	0	5	0.5	0.03
26	10	0	25	0.5	0.03
27	5.5	8	45	0.5	2.26
28	1	0	25	0.5	0.001
29	5.5	4	25	0.5	1.34
30	5.5	0	25	0.5	0.03

同理,当结构面倾向为 30°保持不变,结构面倾角作为自变量,与安全系数关系如图 4,由图可见,安全系数整体呈先减小后增大至不变的变化规律,节理面倾角小于边坡倾角时,呈顺向滑塌,边坡处于不稳定状态;当结构面倾角 90°至 180°形成逆向,安全系数基本无变化,边坡处于稳定状态。

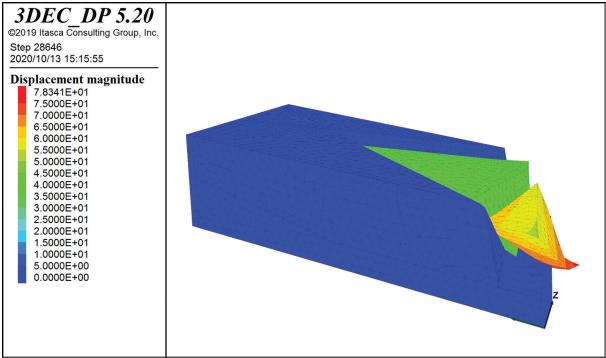


图 2 力学参数—位移量模拟示意图

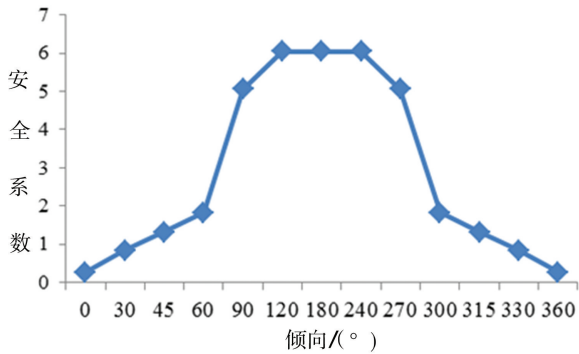


图 3 节理面倾向与安全系数的关系

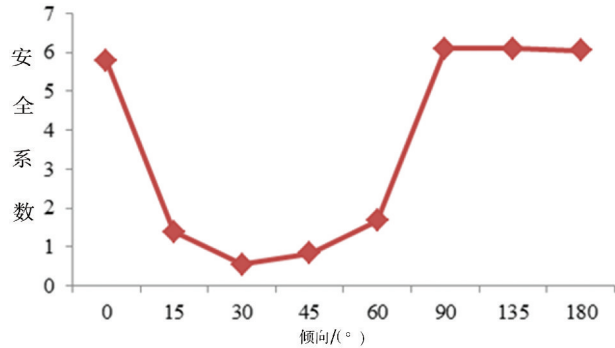


图 4 节理面倾向与安全系数的关系图

3.2 力学参数结果分析

通过模拟,结合响应面法分析结构面力学参数与安全系数之间的关系,其中切向刚度、法向刚度与安全系数的关系见图 5,由图可见,法向刚度增大,安全系数基本未变化,切向刚度增大时,安全系数随之增大,当切向刚度达到 4 GPa/m 后安全系数基本保持稳定,同时,两因素之间的影响关系弱。

图 6 显示内摩擦角和法向刚度与边坡安全系数的关系,随着内摩擦的角度的增加,边坡安全系数呈线性增加,两因素之间的影响关系弱。

图 7 显示结构面粘聚力和法向刚度与边坡安全系数的关系,随着粘聚力增加,边坡安全系数小幅

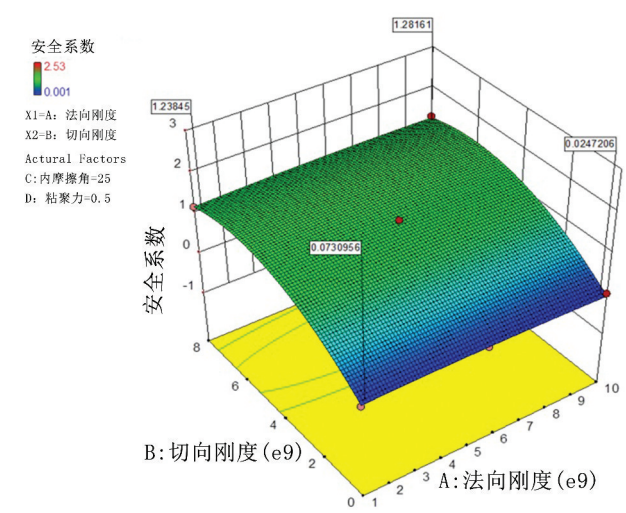


图 5 节理面倾向与安全系数的关系

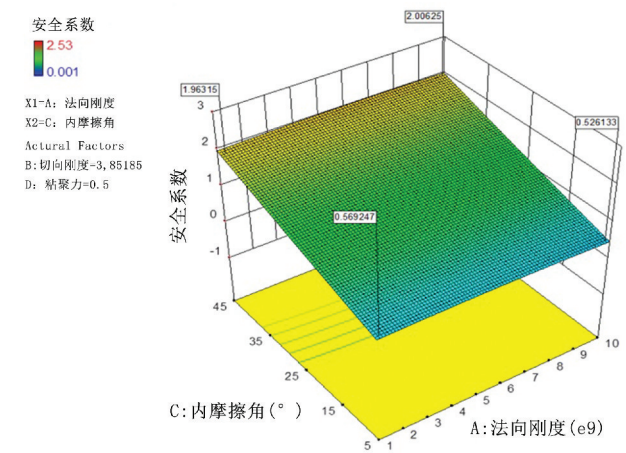


图 6 内摩擦角—法向刚度与安全系数的关系图
增加,两因素之间的影响关系弱。

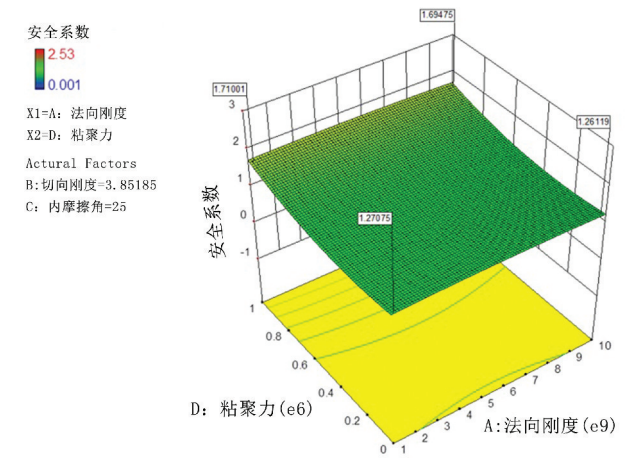


图 7 粘聚力—法向刚度与安全系数的关系图

图 8 显示内摩擦角和切向刚度与边坡安全系

数的关系,随着切向刚度的增大,内摩擦角与边坡安全系数斜率由 6.7×10^{-3} 至 5.6×10^{-2} ,说明切向刚度越大,内摩擦角对边坡稳定性影响越大,反之亦然;内摩擦角和切向刚度与边坡安全性呈相互促进关系。

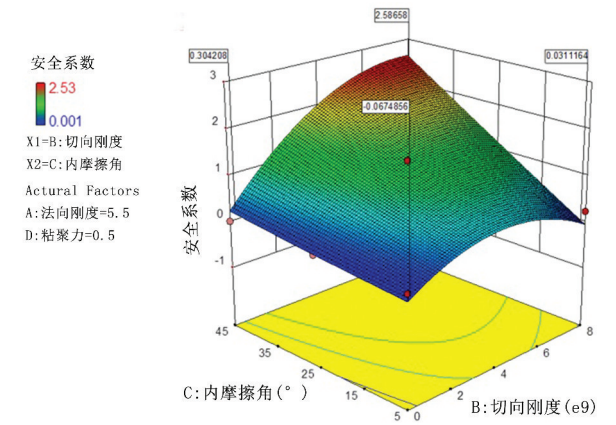


图 8 内摩擦角一切向刚度与安全系数的关系图

图 9 显示粘聚力一切向刚度与安全系数的关系,随着切向刚度的增大,粘聚力与边坡安全系数斜率稍有增加,说明切向刚度越大,内摩擦角对边坡稳定影响越大,反之亦然。

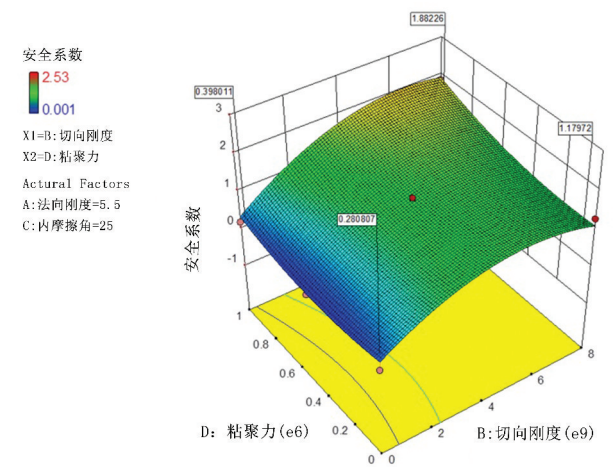


图 9 粘聚力一切向刚度与安全系数的关系图

图 10 显示粘聚力—内摩擦角与边坡安全系数的关系,随着内摩擦角的增大,粘聚力与边坡安全系数斜率逐渐减小,即内摩擦角的增大,粘聚力对边坡安全系数影响降低;随着粘聚力的增大,内摩擦角对边坡稳定性影响基本保持不变。

4 敏感性分析

在模拟分析中发现,在结构面与边坡形成逆向

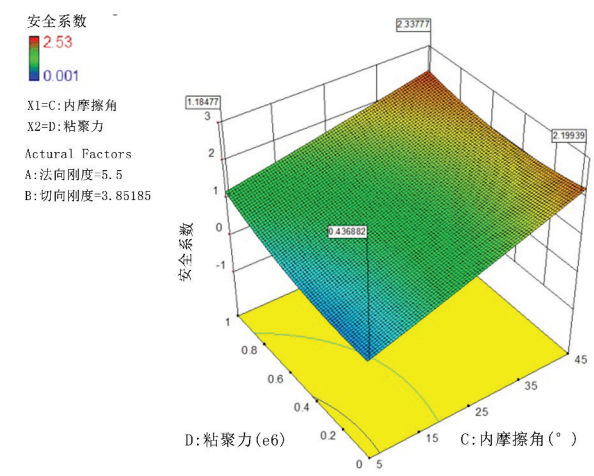


图 10 粘聚力—内摩擦角与安全系数的关系图

时,改变结构面的力学参数,边坡处于稳定状态,安全系数基本无变化,如结构面的倾向为 120° ,安全系数为 6.04,边坡处于稳定状态时,改变任意结构面力学参数,边坡处于稳定状态,说明结构面的几何参数是边坡的稳定性的前提条件,在具备前提条件的情况下,结构面的力学参数,将进一步影响边坡的稳定性。

本次采用各因素的相对变化率与边坡稳定安全系数之间的关系曲线,分析各因素与边坡稳定性之间的敏感度,见图 11,在本次结构面力学参数研究范围内,法向刚度和内摩擦角与安全系数呈线性关系,切向刚度和粘聚力与边坡的安全系数呈非线性关系。法向刚度变化不引起安全系数的变化;内摩擦角增加 10%,边坡安全系数增加 0.19;切向刚度值在 $0 \sim 4$ GPa/m 之间,边坡安全系数随着切向刚度增大而增加,切向刚度增加 10%,边坡稳定性系数增加 0.262;当切向刚度在 $4 \sim 8$ GPa/m,边坡安全系数未有明显变化;粘聚力值在 $0 \sim 0.5$ MPa 边坡安全系数未有明显变化;当粘聚力值在 $0.5 \sim 1$ MPa 边坡稳定性系数随着粘聚力增大而增加,粘聚力增加 10%,边坡稳定性系数增加 0.096;按照单因素敏感分析法,由公式(7)计算敏感系数,见下表 7;敏感性由大到小为切向刚度>内摩擦角>粘聚力>法向刚度;结论与葛云峰等^[11]研究结果相一致,并应用在边坡稳定性分析实例。

表 7 单因素变化条件下的敏感系数

影响因素	法向刚度	切向刚度	内摩擦角	粘聚力
敏感系数	0	0.98	0.78	0.28

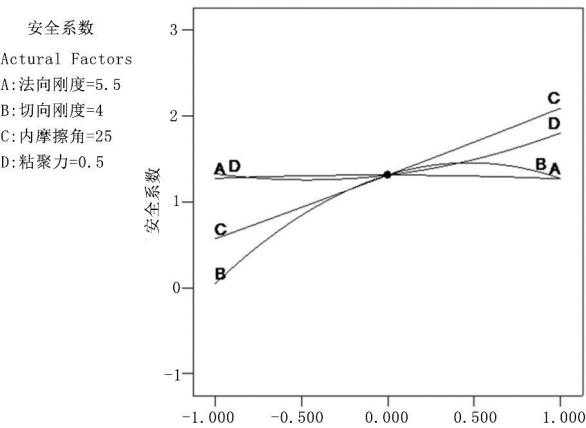


图 11 力学参数与安全系数敏感性关系

5 结论

以结构面几何参数中 2 项参数和力学参数 4 项参数为研究对象进行边坡稳定性研究,以边坡安全系数为试验指标,进行离散元响应面试验法数值模拟,形成结果如下:

(1)结构面几何参数中,结构面倾向与边坡坡向产生夹角($0^{\circ}\sim 180^{\circ}$),夹角越大,安全系数越高,边坡越稳定;结构面倾角小于边坡倾角时具备边坡不稳定的条件,当结构面倾角大于边坡倾角时,边坡处于稳定状态。

(2)结构面的力学参数中,根据响应面法分析,法向刚度对边坡稳定性基本无影响,切向刚度与边坡稳定性呈正相关关系,当刚度达到 4GPa/m 后边坡稳定性趋于稳定;内摩擦角和粘聚力与边坡稳定性均呈正相关关系,内摩擦角呈线性关系,粘聚力呈非线性关系;同时显示仅内摩擦角和切向刚度与边坡安全性因素之间呈相互促进作用,其他参数间无相互作用。

(3)敏感性分析中,结构面几何参数为影响边坡稳定性的前提条件,力学参数中,按照敏感度由大到小排序,为切向刚度>内摩擦角>粘聚力>法向刚度。

(4)在判别边坡稳定性影响因子的敏感性大小上,利用响应面法可以更直观的反应边坡安全系数的变化关系曲线,反应各参数间的相互作用。然而需要注意的是影响边坡稳定性的因素很多,结构面的数量、间距及连通率等对边坡稳定的敏感性以及各因素之间的关系,尚需进一步的分析研究。

参考文献:

[1] 石根华, Goodman R.E., 块体理论及其在岩石工程中的应用, [M]. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1985.

[2] 任青文, 余天堂. 边坡稳定的块体单元法分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 20-22.

[3] 巨能攀, 赵建军, 黄润秋, 等. 基于 3DEC 的边坡块体稳定性分析[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版) 2009(6): 925-928.

[4] 王博, 陈国栋, 赵晓玲, 安徽省枞阳县高峰村同咀崩塌稳定性分析与评价[J]. 山东国土资源, 2019, 35(4): 56-61.

[5] 李军. 极限平衡方法在夏日哈木镍钴矿山拟建露天采场边坡角优化中的应用[J]. 山东国土资源, 2020, 36(11): 59-64.

[6] 宋义亮, 罗延婷, 井培登, 等. 赤平极射投影法在岩质边坡稳定性分析中的应用[J]. 安全与环境工程, 2011(1): 103-105.

[7] 张紫杉, 王述红, 王斐笠. 基于空间块体表证的岩质边坡稳定性综合评价[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2018, 39(6): 896-901.

[8] 杜明玉, 黄生根, 姜氏江, 等. 考虑滑面贯通和退化的岩质边坡动力稳定性分析[J]. 安全与环境工程, 2012, 19(5): 118-122.

[9] Cundall P A . A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems[C]. Proceedings of the symposium of the International Society for rock Mechanics, Fracture. 1971.

[10] 倪勇, 王述红. 基于 3DEC 对岩质高边坡的稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6): 206-210.

[11] 葛云峰, 唐辉明, 熊承仁, 等. 滑动面力学参数对滑坡稳定性影响研究: 以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(02): 3873-3884.

[12] 李世海, 汪远年. 三维离散元计算参数选取方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(21): 3642-3651.

[13] 王卫华, 李夕兵, 胡盛斌. 模型参数对 3DEC 动态建模的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(Z1): 4790-4797.

[14] 梅岭, 季佩祥, 张太玥. 基于 FLAC-3D 强度折减法的边坡稳定性影响因素敏感性分析[J]. 江苏科技大学学报: 自然科学版, 2014, 28(3): 220-224.

[15] 史俊涛, 孔思丽, 任琪. 基于强度折减有限元法的边坡稳定性影响因素敏感性研究[J]. 武汉科技大学学报: 自然科学版, 2013(4): 316-320.

[16] 殷跃平. 斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究: 以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 217-226.

[17] 冯振, 殷跃平, 李滨, 等. 重庆武隆鸡尾山滑坡视向滑动机制分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2704-2712.

[18] 刘传正. 重庆武隆鸡尾山危岩体形成与崩塌成因分析[J]. 工程地质学报, 2010(3): 297-304.

[19] 王宇, 王春磊, 汪灿, 等. 边坡可靠性评价的向量投影影响面研究及应用[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1434-1439.

[20] 黄靓, 易伟建, 汪优. 基于 ANSYS 和响应面法的抗滑桩结构

可靠性分析[J].岩土力学, 2008, 29(2):370-374.

靠度分析[J].岩土工程学报, 2019, 41(z1):209-212.

[21] 朱彬,裴华富,杨庆. 基于高斯过程回归的响应面法与边坡可

Sensitivity Study on Influencing Factors of Safety Coefficient of Rock Slope Based on 3DEC

ZANG Hao¹, CHEN Peng², ZHAO Dun³, DONG Yufen¹

(1. No.1 Exploration Team of Shandong Bureau of Coal Geology, Shandong Qingdao 266500, China; 2. Juxian Branch Bureau of Rizhao Ecological Environment Bureau, Shandong Rizhao 276800, China; 3. Shandong Bureau of Coal Geology, Shandong Jinan 250000, China)

Abstract: In order to study the influence of geometrical and mechanical parameters of structural surface on the safety and stability of rock slope, discrete element software 3DEC is used to carry out numerical simulation test. Taking safety factor as index and response surface analysis (RSM), the sensitivity of geometrical parameters (inclination, inclination) and mechanical parameters (normal stiffness (Kn), tangential stiffness (Ks), cohesion (c) and internal friction Angle (φ) of slope structural plane to slope stability has been studied. It is showed that geometrical parameters of the structural plane are the prerequisite for the stability of the slope. At the same time, the mechanical parameters of the structural plane will further affect the stability of the slope under the condition of collapse. In addition, the tangential stiffness of the sliding surface and the internal friction angle for the slope stability are highly sensitive to the slope stability, and the order of sensitivity is from large to small, tangential stiffness>internal friction angle>cohesion>method Directional stiffness. It is also found that the internal friction angle and tangential stiffness promote each other with the safety factors of the slope.

Key words: Safety coefficient; rock slope; slope structure; sensitivity; response surface analysis