

# 锯齿结构面剪切数值模拟

吴仕鹏,唐海,罗世林,赵海龙

(湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**为探讨锯齿结构面的力学特性,利用FLAC<sup>3D</sup>建立岩体结构面的三维模型,分析结构面力学性质的影响因素。研究表明:剪切强度随起伏角的增大由线性关系演变到非线性关系,体现在结构面的破坏效应由爬坡效应逐渐演变成啃断效应,最后发展成复合破坏效应;低正应力条件下,强度较大的锯齿先受到破坏,而较高正应力条件下却不同,先受到破坏的则是强度较低的锯齿;随着加载速率的增大,峰值数目增多,峰值依次减小,且结构面残余剪应力逐渐降低。

**关键词:**锯齿结构面;FLAC<sup>3D</sup>;剪切强度;起伏角;加载速率

**中图分类号:**TD31      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2016)02-0007-04

## Shear numerical simulation of the sawtooth structure plane

WU Shipeng, TANG Hai, LUO Shilin, ZHAO Hailong

(Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Technology of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** To explore the mechanical characteristic of the sawtooth structure plane, this paper uses the 3D model of the rock mass structure established on the basis of FLAC<sup>3D</sup> and analyzes the impact factors of the structure and mechanical characteristic of the surface. It shows that the shear strength with the increase of rolling angle evolves from the linear relationship to the non-linear relationship, which is reflected in the structure of surface damage effects by climbing effect gradually turn into gnawed effect, and eventually develops into a composite damaging effects; under low normal stress conditions, the greater the intensity of sawtooth, the first being destroyed, whereas at higher normal stress condition is different, the first damaged is the lower intensity sawtooth. Along with the loading rate increases, the number of peaks increases, the peak gradually decreases, and the residual structure surface shear stress decreases.

**Key words:** the sawtooth structure plane; FLAC<sup>3D</sup>; the shear strength; rolling angle; loading rate

在一定条件下,岩体结构面对岩体稳定性起着决定性作用。由于天然岩体的结构面取样存在一定困难,多数学者以室内试验对岩体结构面的力学性质进行研究。沈明荣等<sup>[1,2]</sup>用规则齿形结构面的试验模型进行多角度多应力条件下的剪切试验表明,结构面的抗剪强度与爬坡角呈正增长关系,且结构面的破坏有爬坡效应和切齿效应;李海波等<sup>[3,4]</sup>以人工浇筑锯齿状节理面的混凝土试样进行不同剪切速率条件下岩石节理强度特征的试验表明,随着剪切速率的增大,节理面的峰值剪切强度减小,且减小幅度逐渐变小,起伏角较小时,节理面主要呈磨损破坏,起伏角较大时,节理面主要呈剪断破坏;张清照等<sup>[5]</sup>得出结构面的粗糙度系数JRC与结构面的角度呈线性关系;王刚等<sup>[6]</sup>研究表明结构面剪切强度的主要影响因素是粗糙度和剪切速率,且随粗糙度系数的增大呈线性增大的趋势;刘克辉等<sup>[7]</sup>认为如果节理面具有方向性,其抗剪强度也具有方向性;韩立军<sup>[8]</sup>通过结构面注浆剪切试验得出相同岩样破坏后其结构面粗糙度系数JRC

收稿日期:2015-10-20

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2013CB227904);湖南省科技厅计划资助项目(2014FJ3105)

通信作者:唐海(1970-),男,湖南祁阳人,博士,副教授,研究方向:采矿工程。E-mail: tanghai707298@163.com

相近,注浆后剪切强度峰值以及残余强度明显增大;陈世江等<sup>[9]</sup>基于多重分形理论得出粗糙度系数 JRC 分别与多重分形参数  $\Delta D(q)$  和  $\Delta a(q)$  的关系式.除此之外,还有很多学者对结构面的研究做了大量工作<sup>[10-13]</sup>,但是,仅仅采用理论方法来分析结构面的力学性质是远远不够的,主要是因为分析之前对岩体的性质和形状作了许多假设,不能较为准确地体现结构面的力学性质,存在局限性.室内试验的方法虽然能较好地反映试样的特性,但由于现场取样或者制样需要花费大量的人力物力,而且有些试样是无法现场取样或者室内制样,这就需要寻找新的研究方法.本文利用 FLAC<sup>3D</sup> 模拟软件建立含结构面的三维试样模型,研究锯齿结构面的强度和变形特点.

### 1 数值模型

由于 FLAC<sup>3D</sup> 模拟软件的前处理较为简单,不便于建立较复杂的模型,本文用 AutoCAD 画出模型平面图,导入 ANSYS 建立三维模型并划分网格,再导入 FLAC<sup>3D</sup> 进行运算<sup>[14-16]</sup>,尺寸为 6 m × 6 m × 6 m(如图 1 所示).为了研究锯齿结构面的力学性质,设置结构面的起伏次数为 2,4,6,8,10,12,得到节理面的起伏角  $\alpha$  为 8°,15°,22°,28°,34°,39°,结构面平面图如图 2 所示.

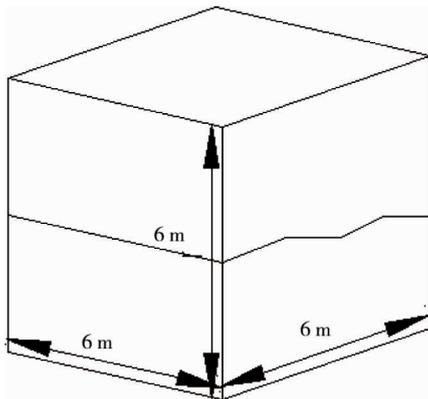


图 1 三维模型

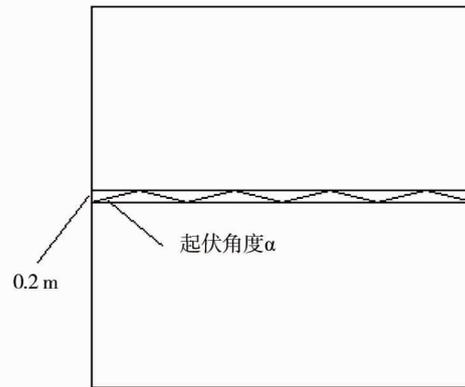


图 2 节理面

数值计算过程中,模型顶部施加正应力  $\sigma_n$ ,节理面上部岩体左面施加速度荷载  $v$ ,其他面为自由边界;模型底部为固定边界,节理面下部岩体前后、左右为位移约束.采用 Mohr - Coulomb 应变软化模型为此次模拟破坏模型,计算参数由实验室测得,岩石:容重 23 kN/m<sup>3</sup>,泊松比 0.20,粘结力 0.3 MPa,内摩擦角 37°,膨胀角 10°,抗拉强度 0.4 MPa;节理面:法向刚度 10.0 MPa/m,切向刚度 10.0 MPa/m,粘结力 10.0 kPa,内摩擦角 20°,膨胀角 6°.

### 2 模拟结果与分析

#### 2.1 正应力与起伏角的影响

模拟采集了不同起伏角条件下正应力  $\sigma_n$  与剪切强度  $\tau_c$  的关系如图 3 所示,分析可知,当起伏角  $\alpha < 15^\circ$  时,  $\tau_c$  与  $\sigma_n$  呈线性关系,且曲线的倾斜度增大,说明内摩擦角受到起伏角的影响较大,结构面的破坏效应主要为爬坡效应;随着起伏角  $\alpha$  的增大,  $\tau_c$  与  $\sigma_n$  呈非线性关系,这是由于结构面的破坏效应不仅有爬坡效应,还出现了啃断效应,用二次曲线对其进行拟合,可得到较高的相关性,如表 1 所示.

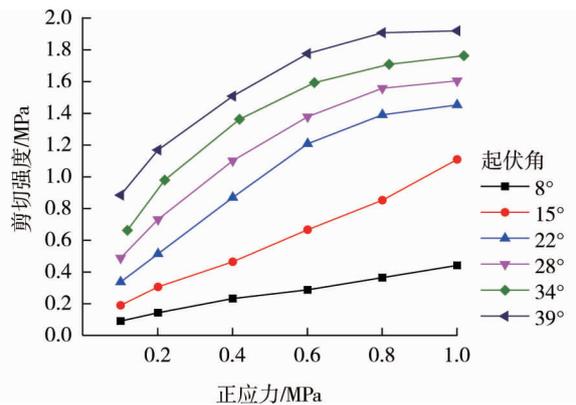


图 3 不同起伏角条件下正应力和剪切强度之间的关系

表 1 正应力和剪切强度关系的拟合

拟合方程	起伏角/(°)	$a_1$	$a_2$	$a_3$	相关系数 R
$\tau_c = a_1 + a_2\sigma_n$	8	0.064 50	0.378 13		0.993 76
	15	0.086 03	0.990 72		0.994 20
	22	0.289 28	1.301 46		0.938 43
$\tau_c = a_1 + a_2\sigma_n + a_3\sigma_n^2$	22	0.070 16	2.541 28	-1.144 21	0.994 88
	28	0.231 98	2.728 24	-1.352 54	0.999 67
	34	0.417 92	2.962 33	-1.635 86	0.992 42
	39	0.634 71	2.832 76	-1.550 45	0.997 49

模拟计算过程中还记录了不同正应力  $\sigma_n$  条件下结构面的剪位移和剪应力之间的关系(篇幅有限,只绘出  $\sigma_n = 0.1$  MPa 和  $\sigma_n = 1.0$  MPa 时剪位移 - 剪应力关系图),如图 4 所示。

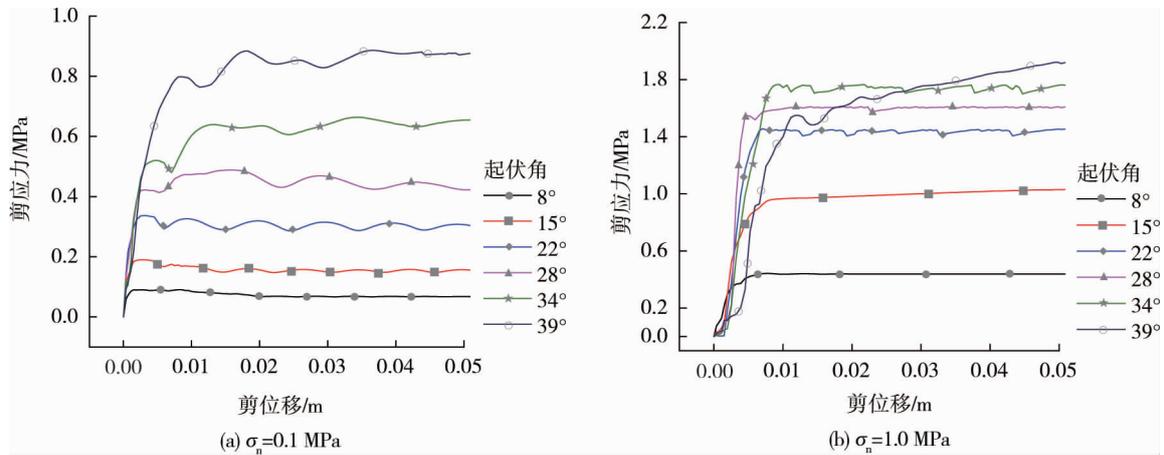


图 4 不同正应力条件下剪位移 - 剪应力之间的关系

从图 2 可以看出,不同起伏角  $\alpha$  不同正应力对应的曲线形态也不同,正应力  $\sigma_n = 0.1$  MPa 时,  $\alpha$  较小时其剪位移 - 剪应力曲线为单峰值曲线,此时结构面主要发生滑动破坏;当  $\alpha > 15^\circ$  时,曲线呈现出多个峰值,这是由于结构面发生复合破坏,随着剪位移的增大,剪应力也增大,迅速达到第一个峰值,剪断强度较大的锯齿,发生应力下降,随着剪位移的继续增大,依次剪断强度由大到小的锯齿,呈现峰值降低现象,随着锯齿的减少,剪应力最终趋于一个稳定值;正应力  $\sigma_n = 1.0$  MPa 时,结构面呈现的力学性质有所变化,第一个峰值不是最大,且达到最大应力后就趋于稳定,分析认为,主要是因为正应力的增大导致结构面的爬坡效应降低,发生啃断破坏时先是把强度较低的锯齿剪断,出现较小的应力波动,而后再剪断强度较大的锯齿,最后趋于稳定。

### 2.2 加载速率的影响

以起伏角  $8^\circ$  的模型为例,正应力  $\sigma_n = 0.1$  MPa,记录不同加载速率下剪位移 - 剪应力曲线如图 5 所示。

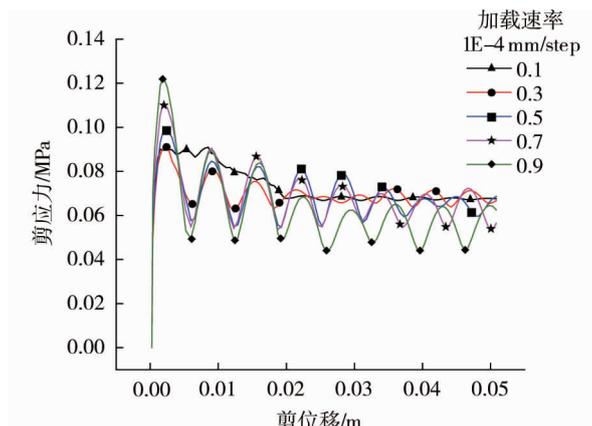


图 5 剪位移 - 剪应力曲线

从图5可以看出,刚开始剪应力随剪位移的增加很快达到峰值,且最大峰值随加载速率的增大而增大;随着加载速率的增大,剪应力出现多个峰值,即起伏波段明显,但峰值逐渐减小。

### 3 结论

1) 剪切强度  $\tau_c$  随起伏角  $\alpha$  的增大由线性关系演变到非线性关系;结构面的破坏效应由爬坡效应逐渐演变成啃断效应,最后发展成复合破坏效应。

2) 低正应力条件下,强度较大的锯齿先受到破坏,呈现峰值剪力逐渐降低的起伏曲线,而较高正应力条件下却不同,先受到破坏的则是强度较低的锯齿,剪应力呈现逐渐增大再趋于稳定。

3) 随着加载速率的增大,峰值数目增多,峰值依次减小,且结构面残余剪应力逐渐降低。

4) 结构面不仅在加载过程中会发生破坏,在卸载过程中也会,本文只对结构面在加载过程中的破坏机理作出分析,对于卸载过程中的破坏机理,还需进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 沈明荣,张清照. 规则齿型结构面剪切特性的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(4):713-719.
- [2] 沈明荣,张清照. 岩体结构面的剪切试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(1):38-43.
- [3] 李海波,冯海鹏,刘博. 不同剪切速率下岩石节理的强度特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(12):2435-2440.
- [4] 李海波,刘博,冯海鹏,等. 模拟岩石节理试样剪切变形特征和破坏机制研究[J]. 岩土力学,2008,29(7):1741-1746.
- [5] 张清照,沈明荣,丁文其. 结构面在剪切状态下的力学特性研究[J]. 水文地质工程地质,2012,39(2):37-42.
- [6] 王刚,张学朋,蒋宇静,等. 一种考虑剪切速率的粗糙结构面剪切强度准则[J]. 岩土工程学报,2015,37(8):1399-1404.
- [7] 刘克辉,陆文,田加亨,等. 岩体结构面不同剪切方向的抗剪强度模拟试验研究[J]. 矿业研究与开发,2009,29(2):5-7.
- [8] 韩立军,宗义江,韩贵雷,等. 岩石结构面注浆加固抗剪特性试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(9):2570-2676.
- [9] 陈世江,朱万成,于庆磊,等. 基于多重分形特征的岩体结构面剪切强度研究[J]. 岩土力学,2015,36(3):703-710.
- [10] 杜守继,朱建栋,职洪涛. 岩石节理经历不同变形历史的剪切试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(1):56-60.
- [11] 许万忠,彭振斌,胡毅夫,等. 岩体边坡锚注加固模拟试验研究[J]. 中国铁道科学,2006,27(4):6-10.
- [12] 白世伟,任伟中,丰定祥,等. 共面闭合断续节理岩体强度特性直剪试验研究[J]. 岩土力学,1999,20(2):10-16.
- [13] 黄达,黄润秋,雷鹏. 贯通型锯齿状岩体结构面剪切变形及强度特征[J]. 煤炭学报,2014,39(7):1229-1237.
- [14] 王中文,方建勤. 岩体结构面锚固剪切特性的数值分析[J]. 煤炭学报,2010,35(5):729-733.
- [15] 胡毅方,彭振斌,柳群义. 规则锯齿型软弱结构面剪切特性的数值分析[J]. 沈阳工业大学学报,2012,34(6):710-714.
- [16] 周莲君,彭振斌,何忠明,等. 结构面剪切特性的试验与数值模拟分析[J]. 科技导报,2009,27(4):31-35.