

基于 GIS 三维统计的石膏角砾岩断口 几何特性研究

陈 翔, 李尤嘉, 黄醒春, 杜守继

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 利用 3D 激光扫描系统精确测量石膏角砾岩单轴压缩破坏下岩石断口表面的粗糙形态, 结合地理信息系统 (GIS) 技术, 实现岩石断口表面的三维可视化。然后对岩石断口三维几何特性参数进行统计分析, 根据频率直方图的分布趋势研究各几何特性参数的分布规律及其随含水率增加的变化规律。最后, 研究石膏角砾岩断口在不同含水率条件下的分形特征, 得出岩石断口在不同加载方向上的分维值随含水率增加的变化规律。试验结果表明, 断口粗糙高度和坡度的分布近似于正态分布, 断口粗糙高度的平均值随着含水率的增加呈线性上升趋势, 而断口坡度的平均值随着含水率的增加呈线性下降趋势。通过岩石断口激光扫描试验分析发现, 岩石断口的几何特征及分维值与岩石的初始含水状态密切相关, 分维可以作为岩石断口几何形态定量描述的参数之一, 从而为进一步分析石膏角砾岩损伤演化过程及其破坏机制提供可靠的试验依据。

关键词: 岩石力学; 地理信息系统; 石膏角砾岩; 破裂断口; 表面几何特性; 分形; 分维

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 2 - 3541 - 06

STUDY ON GEOMETRICAL PROPERTIES OF FRACTURE APPEARANCE IN GYPSUM BRECCIA BASED ON 3D GIS STATISTIC

CHEN Xiang, LI Youjia, HUANG Xingchun, DU Shouji

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: By employing 3D laser scanning system, precise measurements of topography on fracture appearance in gypsum breccia under uniaxial compression are taken from which the fracture surface is visualized by using GIS technique. 3D parameters of the geometrical properties, such as asperity height and slope of rough surface are analyzed. The distribution of geometrical properties and its variation with increase of water content are analyzed according to frequency distribution of the histogram. At last, the fractal characteristics of fracture appearance under different water contents are studied. Therefore, the fracture dimensions of appearance under different loading directions and the variation with the increase of water contents are deduced. The test results show that the distributions of asperity height and slope match the normal distribution approximately, and the average of asperity height increases with the increase of water content linearly while the average of slope decreases with the increase of water content linearly. The fractal dimensions of appearance under different loading directions are correlative with water content; as a result, fractal dimension can be one of the important parameters to describe fracture appearance quantitatively. Based on the testing analysis of laser scanning of fracture appearance in gypsum breccia, there are close connections between fractal dimensions of the geometrical properties of fracture

收稿日期: 2007 - 07 - 18; **修回日期:** 2007 - 11 - 14

作者简介: 陈 翔(1983 -), 男, 2005 年毕业于石家庄铁道学院土木工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事岩石土力学试验及工程应用方面的研究工作。E-mail: chenxiang417@sjtu.edu.cn

appearance and water content under uniaxial compression. The process and mechanics of fracture appearance under uniaxial compression are given as reliable testing basis to further analyze the process of damage evolution and failure mechanism of gypsum breccia.

Key words: rock mechanics; geographic information system(GIS); gypsum breccia; fracture appearance; geometrical properties; fractal; fractal dimension

1 引言

膨胀岩是指与水发生物理化学反应,引起体积膨胀的一类岩石。膏溶角砾岩是一种特殊的膨胀岩,遇水容易发生大变形甚至坍塌,当今学术界对于该岩石的理论研究较少,在目前的工程应用中尚处于探索阶段。由于在坝基、边坡、围岩和采矿等众多岩体工程中,常常有水参与,岩石裂隙中或多或少有水的存在,岩石的力学性质也随之改变,所以研究膏溶角砾岩的力学特性尤其是破裂断口的描述显得非常重要。

岩石断口分析是一门研究岩石破坏断裂表面的科学。断裂表面是岩石断裂后留下的关于断裂过程的记录,断口蕴藏着关于断裂机制的各种信息,通过研究断裂表面可以追溯断裂产生的原因及其机制,并观察和发现岩石微结构的组成和缺陷^[1]。岩石类材料断裂表面的定量分析方法之一就是利用分形来表征断裂表面,它是一种描述岩石断裂表面粗糙度的度量。此类方法可通过岩石断口的分形分析,研究断口几何特性参数与岩石含水率的关系,揭示岩石损伤直至断裂破坏的形成过程及其机制,为在细观力学尺度上进一步探索岩石损伤演化规律提供理论依据,为研究岩石微观破坏机制与宏观断裂机制建立起桥梁,具有深远的理论意义和工程价值。近年来,国内外许多学者应用分形理论来研究岩石类材料断口的形貌特征^[2~12],并取得了一定的进展。如王金安等^[6]运用分形理论分析岩石断裂表面的尺度效应,谢和平等^[7]进行岩石断裂和破碎的分形研究,易顺民等^[8]对岩石脆性破裂断口的分形特征进行研究。但现有的研究工作多以硬岩为研究对象,尚未见有对不同初始含水率情况下,膨胀软岩断口分形几何特性的相关研究报道。

本文利用专门的3D激光扫描系统,通过精确测定岩石断口表面粗糙形态,将实测得到的断口粗糙面三维数据进行数字化表达后导入GIS软件,对原始数据重新换算整合,并进行三维可视化分析,

对不同初始含水率下岩石断口的三维几何特性参数进行统计并计算频数分布,再根据频率直方图的分布和频数分布的变化趋势,研究各几何特性参数和含水率变化之间的关系,得到不同含水率下岩石断口的分形特征。

2 试验过程

2.1 试样的选取和制备

试验岩样采自石家庄—太原铁路客运专线太行山隧道工程6[#]斜井施工现场,为膏溶角砾岩。膏溶角砾岩是国内工程领域首次遇到的一种非常特殊的岩石,属于软岩硬土,遇水则强度迅速降低,极易崩解软化,具有极其特殊的物理力学性质。

岩样从施工现场封装运回后,采用干法加工成 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的标准圆柱体试件。加工完好的试件置于 $105\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中干燥24 h后,采用溴化钠饱和溶液进行增湿。本试验分别制备了烘干状态,初始含水率为3%,6%,9%以及天然状态(初始含水率为4.05%)共5组试件,每组4件,样品共计20件。对试件进行单轴压缩试验,然后对其断口进行3D激光扫描。图1所示为单轴压缩破坏后试样断口的立面图,从图中可以看出,试样断口的破坏形式为剪裂断口。



图1 膏溶角砾岩断口的立面图
Fig.1 Elevation drawing of fracture in gypsum breccia

2.2 试验设备

岩石断口表面的测量仪器采用的是 LSV654 型 3D 激光扫描系统, 该系统是由精密设定的 X-Y 平面移动平台和激光光带组成。将试样固定在台面上, 由计算机控制平台沿 X 和 Y 方向移动, 断口表面凹凸形状通过激光变位计转换为光信号, 再经模拟转换器转换为电信号, 由应变仪存入计算机中。该系统工作台面尺寸为 600 mm×500 mm×400 mm, 扫描宽度为 50 mm, 测点间距取为 0.5 mm, 测量精度为 ±0.05 mm, 扫描时沿 X 方向移动, 获得断口表面的离散化高度数据。

2.3 ArcView 空间分析

地理信息系统(GIS)是对空间分布数据进行采集、存储、运算、分析、显示的技术系统^[13]。ArcView 是美国环境系统研究所(ESRI)的 GIS 产品。ArcView 的空间分析模块和三维分析模块为用户提供了三维表面模型以及交互式的三维透视功能, 提高了 ArcView 在分析、建模、可视化、提取断面方面的能力^[14, 15]。因此, 本文植入 GIS 技术来模拟岩石断口表面的空间几何特性, 并进一步分析岩石断口的分维特征。

3 断口几何特性分布规律的研究

3.1 岩石断口表面的三维可视化

图 2 给出膏溶角砾岩断口表面的三维可视化图。 x_{max} , y_{max} 分别表示平面 x 和 y 方向上的扫描范围; Δx_1 为扫描间距; z_{max} , z_{min} 分别为断口表面粗糙高度的最大、最小值; z_{mean} 为断口粗糙高度的平均值; Std 为粗糙高度的标准偏差。



图 2 膏溶角砾岩断口表面的三维视图(单位: mm)
Fig.2 3D view for fracture surface in gypsum breccia (unit: mm)

3.2 断口粗糙高度的分布规律

利用 ArcView 中的 Histogram 工具, 可以得出断口粗糙高度的频率直方图^[16]。

图 3 为膏溶角砾岩断口表面粗糙高度的频率直方图。 h_{max} 和 h_{min} 分别为断口粗糙高度的最大、最小值, mean 为断口粗糙高度的平均值, Δx_2 为频数统计的组间宽度。

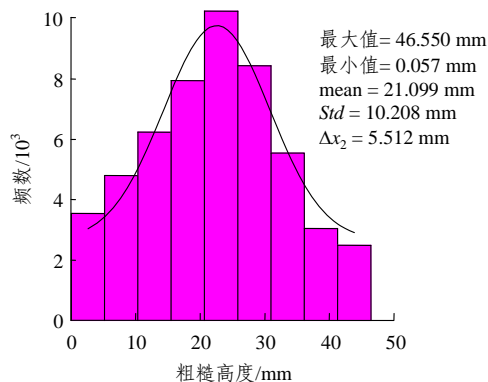


图 3 膏溶角砾岩断口粗糙高度频率直方图
Fig.3 Histogram plot for asperity height of fracture surface in gypsum breccia

从图 3 可以看出, 断口粗糙高度的频率直方图近似地符合正态分布规律。膏溶角砾岩断口粗糙高度的最大值为 46.550 mm, 最小值为 0.057 mm, 平均值为 21.099 mm, 方差为 10.208 mm, 大都集中在 5~42 mm。

图 4 为不同含水率下断口粗糙高度平均值的变化图。由图 4 可知, 断口粗糙高度平均值随含水率变化呈线性函数变化趋势。因此, 在研究膏溶角砾岩单轴压缩破坏下破裂断口的形态分析时必须要考虑水的重要影响, 才能更全面地反映膏溶角砾岩断口表面的实际变化规律。

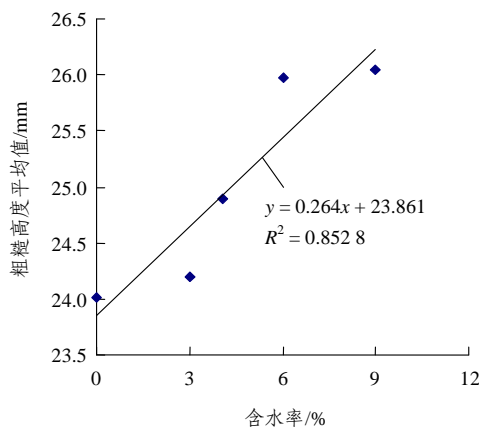


图 4 膏溶角砾岩断口粗糙高度平均值随含水率变化关系
Fig.4 Relationship between mean of asperity height of fracture surface and water content in gypsum breccia

3.3 断口坡度的分布规律

图 5 为膏溶角砾岩断口坡度的频率直方图，图中 Δx_3 为频数统计的间隔坡度。

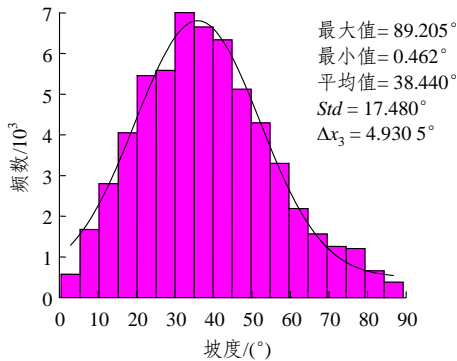


图 5 膏溶角砾岩断口坡度频率直方图

Fig.5 Histogram plot for slope of fracture surface in gypsum breccia

从图 5 中可以看出，坡度的频率直方图呈现出明显的正态分布规律。膏溶角砾岩断口坡度的最大值为 89.205°，最小值为 0.462°，坡度大都集中在 10°~80°。

图 6 为不同含水率下断口坡度平均值的变化图。由图 6 中可知，断口坡度平均值随含水率变化呈线性函数变化趋势，拟合程度很高，充分说明膏溶角砾岩的含水率越高，断口坡度的平均值越小，进一步表明在分析膏溶角砾岩断口几何特性时必须考虑水的影响。

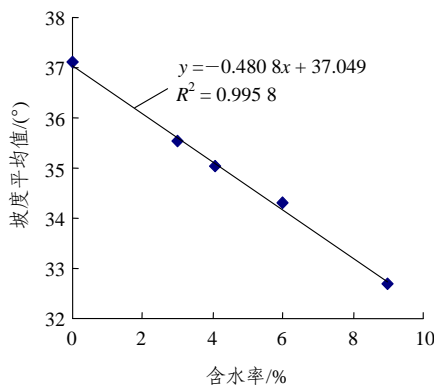


图 6 膏溶角砾岩断口坡度平均值随含水率变化关系

Fig.6 Relationship between mean of slope of fracture surface and water content in gypsum breccia

4 岩石断口的分形特征

4.1 岩石断口的分形几何模型

通过对岩石断口形貌和几何形态的观察、测量

和分析发现：分形维数能定量刻画断口剖面的弯曲程度以及断裂表面的粗糙度。考虑单变量函数 $Z(x)$ 。对断裂剖面， h 表示 2 个相邻点之间的距离， N 为数据采样点数目， j 为对 r 的迭代数变量， $Z(x_i)$ 为在点 x_i 的粗糙高度^[17]。根据地质统计学，用平均方差增量法，可定义方差 $V(h)$ ：

$$V(h) = \frac{1}{N-j} \sum_{i=1}^{N-j} [Z(x_i+h) - Z(x_i)]^2 \quad (1)$$

分形几何理论中的变量图法认为方差可用如下形式表示：

$$V(h) = Ah^{2(2-D)} \quad (2)$$

式中： A 为 $V(h)$ 轴的截距， $2(2-D)$ 为 $V(h)$ 轴的斜率， D 为分形维数。

假设一个岩石断口粗糙高度变量 $Z(x)$ 的单值函数 $U(h)$ ， $U(h)$ 被定义为由间距 h 分割的两测点高差的根均方量：

$$U(h) = \left\{ \frac{1}{N-j} \sum_{i=1}^{N-j} [Z(x_i+h) - Z(x_i)]^2 / h \right\}^{1/2} \quad (3)$$

从 $U(h)$ 和 $V(h)$ 的定义可以看出，两者之间存在如下关系：

$$U(h) = \sqrt{V(h)} / h \quad (4)$$

将式(2)代入式(4)可得

$$U(h) = \sqrt{Ah^{(1-D)}} = Bh^{(1-D)} \quad (5)$$

式(5)表明，在平均粗糙角 $U(h)$ 和 h 的对数坐标系中，振幅 B 为 $U(h)$ 轴的截距； $1-D$ 为 $U(h)$ 轴的斜率。

图 7 为应用 GIS 的提取断面功能得出的一条垂直于断口剖面的迹线。图 8 为对应于图 7 迹线的

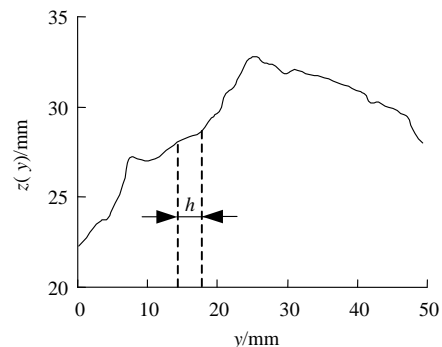


图 7 膏溶角砾岩横断口剖面的一条迹线

Fig.7 Fracture profile in gypsum breccia

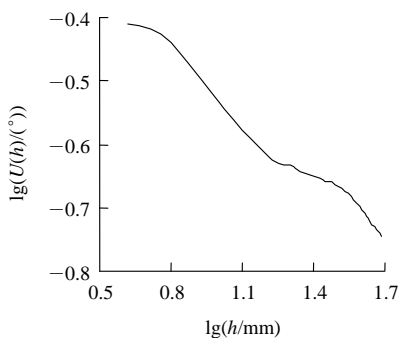


图 8 对应于图 7 迹线的 $U(h)$ 和 h 的双对数曲线

Fig.8 lg-lg plot of $U(h)$ and h for the profile of Fig.7

$U(h)$ 和 h 的双对数曲线。由图 8 可知, 平均粗糙角 $U(h)$ 随测点间距 h 的增加而减少。在 h 小于某一值时, $U(h)$ 值随 h 呈线性下降关系, 而后呈非线性变化。这说明岩石单轴压缩破坏下的断口表面一般是无规则的, 不是严格自相关的, 只是统计意义上的自相似性。

传统的分形理论用分形维数 D 来描述岩石断裂表面的几何粗糙特性, 即分形维数 D 越大, 粗糙线的起伏越厉害, 分形维数 D 表示小尺寸范围内断裂表面的起伏程度。

4.2 岩石断口的分形描述

由式(5)中知, 分形维数 D 可以根据 $U(h)$ 和 h 的双对数曲线线性部分的斜率来计算。

表 1 是膏溶角砾岩在不同含水率下断口在不同方向上的分维统计。从表中可以看出, 膏溶角砾岩断口的分维同岩石破裂的受力方向密切相关, 平行于加载方向的分维值较小, 垂直于加载方向的分维值较大。从定性的角度看, 这为确定现场软岩断裂的应力方向提供一种新的依据。图 9, 10 分别为膏溶角砾岩断口剖面在平行于加载方向和垂直于加载方向上分维值随含水率的变化图。

表 1 膏溶角砾岩断口剖面在不同方向上的分维统计

Table 1 Statistics of fractal dimensions of fracture profile in different directions

含水率/%	平行于加载方向分维	垂直于加载方向分维
0.00	1.415	1.441
3.00	1.379	1.442
4.05	1.367	1.415
6.00	1.314	1.390
9.00	1.314	1.390

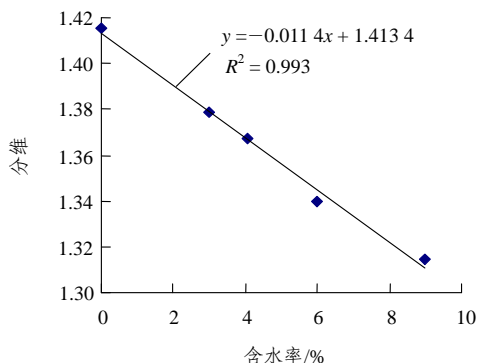


图 9 膏溶角砾岩断口剖面在平行于加载方向上的分维值随含水率的变化关系

Fig.9 Relationship between the fractal dimensions of surface profile parallel to loading and water content in gypsum breccia

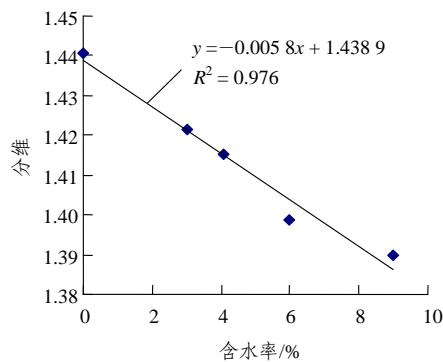


图 10 膏溶角砾岩断口剖面在垂直于加载方向上的分维值随含水率的变化关系

Fig.10 Relationship between the fractal dimensions of surface profile vertical to loading and water content in gypsum breccia

由图 9, 10 中可知, 膏溶角砾岩断口剖面在平行于加载方向和垂直于加载方向上的分维值均呈线性下降趋势, 拟合程度相当高, 相关系数均达到 0.97 以上。这说明可以用统计意义上的自相似分形来准确描述软岩断口表面, 软岩断口表面可以看成统计自相似分形, 可以用分形来定量地刻画断口表面的粗糙性。

5 结 论

利用 3D 激光扫描系统获得膏溶角砾岩断口粗糙形状的精确测量数据, 结合 GIS 技术, 实现软岩断口表面的三维可视化, 通过分析得到了表面粗糙高度和坡度的几何统计值, 得出软岩断口表面几何特性随含水率变化的分布规律以及不同含水率下软

岩断口分形维数的变化规律,为在细观力学尺度上进一步分析研究岩石损伤演化过程提供了理论依据。本研究的主要结论如下:

(1) 膏溶角砾岩断口粗糙高度的分布符合正态分布规律,断口粗糙高度的平均值随含水率的增大而增大,呈线性上升趋势。

(2) 膏溶角砾岩断口表面坡度的分布符合正态分布规律,断口表面坡度的平均值随含水率的增加而减小,呈线性下降趋势。

(3) 膏溶角砾岩断口的分维与岩石破坏的受力方向有关。断口剖面在平行于加载方向的分维值小于垂直于加载方向的分维值。断口剖面在平行于加载方向和垂直于加载方向的分维值均随含水率的增加而减小,并呈线性下降趋势。

参考文献(References):

- [1] 谢和平. 分形——岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996. (XIE Heping. Introduction to fractal in rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1996.(in Chinese))
- [2] JU Y, SUDAK L, XIE H P. Study on stress wave propagation in fractured rocks with fractal joint surface[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(13): 4 256 - 4 271.
- [3] GUARRACINO L. A fractal constitutive model for unsaturated flow in fractured hard rocks[J]. Journal of Hydrology, 2006, 324(1/4): 154 - 162.
- [4] XU Y F, SUN D A, YAO Y P. Surface fractal dimension of bentonite and its application to determination of swelling properties[J]. Chaos Solitons and Fractals, 2004, 19(2): 347 - 356.
- [5] MURALHA J. Fractal dimension of joint roughness surface[C]// Proceedings of Int. Symp. for Fractured and Jointed Rock Masses. Berkeley: [s. n.], 1992: 87 - 95.
- [6] 王金安, 谢和平, 田晓燕, 等. 岩石断裂表面分形测量的尺度效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 11 - 17.(WANG Jin'an, XIE Heping, TIAN Xiaoyan, et al. Scale effect on fractal measurement of rock fracture surface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 11 - 17.(in Chinese))
- [7] 谢和平, 高峰, 周宏伟, 等. 岩石断裂和破碎的分形研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(4): 1 - 9.(XIE Heping, GAO Feng, ZHOU Hongwei, et al. Fractal fracture and fragmentation in rocks[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 23(4): 1 - 9.(in Chinese))
- [8] 易顺民, 赵文谦, 蔡善武. 岩石脆性破裂断口的分形特征[J]. 长春科技大学学报, 1999, 29(1): 37 - 41.(YI Shunmin, ZHAO Wenqian, CAI Shanwu. Fractal characteristics of brittle fracture appearance in rocks[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 1999, 29(1): 37 - 41.(in Chinese))
- [9] 冯增朝, 赵阳升, 文再明. 岩体裂缝面数量三维分形分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 601 - 609.(FENG Zengchao, ZHAO Yangsheng, WEN Zaiming. Study on 3D fractal distribution law of the surface number in rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4): 601 - 609. (in Chinese))
- [10] 朱珍德, 张勇, 徐卫亚, 等. 高围压高压条件下大理岩断口微观机制分析与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 44 - 51.(ZHU Zhende, ZHANG Yong, XU Weiya, et al. Experimental studies and microcosmic mechanics analysis on marble rupture under high confining pressure and high hydraulic pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 44 - 51.(in Chinese))
- [11] 谢海峰, 饶秋华, 王志. 反平面剪切(III型)加载下脆性岩石的断口分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1 832 - 1 839.(XIE Haifeng, RAO Qiuhua, WANG Zhi. Fracture morphology analysis of brittle rock under anti-plane shear(mode III) loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1 832 - 1 839.(in Chinese))
- [12] 陆冰洋. 岩石类材料损伤演化的分形几何行为特征及其分形机制研究[硕士学位论文][D]. 贵阳: 贵州大学, 2007.(LU Bingyang. Research fractal geometry behavior characteristics and fractal mechanism of rock material damage evolution[M. S. Thesis][D]. Guiyang: Guizhou University, 2007.(in Chinese))
- [13] Environment System Research Institute. ArcView GIS[R]. [S. l.]: [s. n.], 1996.
- [14] Environment System Research Institute. ArcView Spatial Analyst[R]. [S. l.]: [s. n.], 1996.
- [15] Environment System Research Institute. ArcView 3D Analyst[R]. [S. l.]: [s. n.], 1996.
- [16] 周枝华, 杜守继. 岩石节理表面几何特性的三维统计分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1 227 - 1 232.(ZHOU Zhihua, DU Shouji. 3D statistic analysis of geometrical properties of a rock joint[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1 227 - 1 232.(in Chinese))
- [17] 杜守继, 孙钧, 江崎哲郎, 等. 岩体不连续面的几何特性与剪切强度的关系[J]. 同济大学学报, 1999, 27(4): 379 - 383.(DU Shouji, SUN Jun, TETSURO E, et al. Relation of surface roughness and shear strength of rock joints[J]. Journal of Tongji University, 1999, 27(4): 379 - 383.(in Chinese))