

基于数值试验的节理岩体变形特性 REV 研究

张红亮¹, 王水林², 李春光²

(1. 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津 300222, 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 根据随机节理网络程序, 得到多组随机节理岩体数值模型, 通过数值试验获得多组随机节理岩体模型的应力-应变曲线。首先在试件尺寸及节理概率分布特征参数不变时, 获得在一定围压下试件的应力应变曲线变化规律。然后考虑试件尺寸变化对岩体应力-应变曲线的影响。通过上述 2 类工况数值模拟结果进行分析发现, 试件尺寸小时, 变形曲线比较分散, 随着尺寸的增大, 曲线趋于一致, 说明节理岩体变形曲线存在尺寸效应, 岩体变形特性的特征尺寸可以由数值试验获得。

关键词: 岩石力学; 节理岩体; 尺寸效应; REV

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2008)增 2-3643-06

RESEARCH ON REPRESENTATIVE ELEMENTAL VOLUME (REV) OF DEFORMATION CHARACTER OF JOINTED ROCK MASS BASED ON NUMERICAL EXPERIMENT

ZHANG Hongliang¹, WANG Shuilin², LI Chunguang¹

(1. First Harbour Consultants, Co., China Communication Construction Company Ltd, Tianjin 300222, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: According to random joint program, several groups of numerical models on random joint rock mass are obtained. The stress-strain curves of these models are gained by numerical test. Firstly, the changing law of the deformation curve on these numerical samples under certain confining pressure is considered under the same probabilistic distribution parameters of random joint and the same sample size conditions. Then, the effect on the stress-strain curve caused by sample size is considered. Through the above two kinds of computing schemes, it is found that the deformation curves become dispersal when the sample is small, and become uniform with the enhancement of size. It illustrates that the size effect exists among these curves, and the size of rock mass deformation feature can be obtained by numerical test.

Key words: rock mechanics; jointed rock mass; scale effect; representative elementary volume(REV)

1 引言

在实际工程中, 工程师们非常关心岩体的力学响应过程及岩体屈服应力的大小。由于岩体本构关系的非线性特性, 不能只用变形模量一个指标来刻

画岩体的变形特性, 这就需要了解岩体变形特性随应力的变化规律, 即获取应力-应变全过程曲线。通过应力-应变曲线可以获得岩体的变形特性、屈服应力和极值强度^[1]。

岩体综合力学参数一般是其尺寸的函数, 即随着尺寸的增大, 岩体的参数(如模量、渗透系数等)降

收稿日期: 2007-04-24; **修回日期:** 2008-10-10

作者简介: 张红亮(1980-), 男, 硕士, 2004年毕业于东北大学采矿工程专业, 主要从事岩石力学计算方面的研究工作。E-mail: hlzh99@126.com

低, 当尺寸增加到某一临界值时, 该参数不再变化, 这一临界尺寸称为该参数的特征尺寸(representative elementary volume, REV)^[2~4]。

REV 的概念^[2]最早由 J. Bear^[3]在考察岩体的水力学特性时提出。后来 1987 年 Brown 等研究者在进行考虑岩体等效连续模型的现场试验时再次注意到这个问题。一些学者还特别强调 REV 的均质、各向同性。REV 真正引起较大关注是 20 世纪 90 年代, 特别是在 1990, 1993 年召开的两届关于岩体尺寸效应的国际会议上。

REV 的确定, 有现场实测法(例如 Brown (1987), Rocha(1974)和 Neuman(1987)等)和解析法(例如 Kulatilake(1993)、周创兵和於三大^[5])。在数值分析方面, Long(1982)考虑节理网络模型, 对不同尺寸的试件作渗透分析, 确定 REV; 周创兵和於三大^[5]考虑节理统计特征, 认为岩体体积 V 中包含的不连续面统计特征与总体统计特征一致时, 体积 V 即达到 REV; P. H. Kulatilake^[6]指出用离散元法研究 REV 的可能性。关于岩体变形参数的 REV 研究, 主要是假定参数是不变量, 研究了弹性参数, 泊松比等的尺寸效应^[7~9]。由于对 REV 的研究比较少, 试验数据比较分散, REV 的确定还存在许多问题。对岩石强度尺寸效应的研究^[10~13]基本上是针对完整岩石而言, 而且岩样尺寸均较小, 此外很少考虑裂隙岩样。实质上现场工程岩体在一定程度上已经遭到破坏, 因而为了定量和准确描述岩石强度尺寸效应的规律, 今后需进行大量考虑内部裂纹、节理及断层等不连续面的大尺度岩样的试验研究。

本文的主要思路是: 首先建立数值模型, 确定加载方式。然后应用各个节理岩体试件的极值强度, 作为试件轴向应力, 设计分步加载, 记录每一加载步对应的试件位移。这时可以根据应力 - 位移曲线得出应力 - 应变曲线。然后将同一尺寸同一节理概率模型的不同试件结果汇总, 比较曲线的分散程度。最后改变试件尺寸, 重复以上步骤, 确定应力 - 应变曲线比较集中时的尺寸大小, 即可得能够代表整个岩体变形特性的应力 - 应变曲线, 此时的尺寸就是该随机节理模型变形特性的特征尺寸 REV。

2 模型的建立

针对本文中涉及的随机断续节理岩体, 节理网络具有随机性, 由同样的节理统计特征参数, 可以得到不同的节理网络图。不同的节理网络图表现出

的力学性质必然也是随机的、不相同的。不能将任一网络图反映的力学性质, 看成具有相应节理统计规律的岩体力学性质。该岩体的力学性质应该由多个网络图表现的力学性质共同确定, 所以在同一个节理概率模型下, 生成了 10 组相同尺寸的试件。岩石弹性模量 80 GPa, 泊松比 0.2; 节理材料的弹性模量 10 GPa, 泊松比 0.25。强度参数分别为: 岩石的黏聚力 1.2 MPa, 内摩擦角 50°; 软弱面的黏聚力 0.5 MPa, 内摩擦角 30°。

本文中得到的应力 - 应变曲线很多, 为了节约篇幅, 在此不一一罗列, 下面只列出具有代表性的试件模型。试件尺寸为 0.4 m×0.4 m 和 1.1 m×1.1 m, 如图 1 所示。

表 1 节理分布的概率模型参数
Table 1 Probabilistic parameters of joint distribution

节理组号	中心点位置分布	平均间距/m	平均迹长			倾角		
			分布类型	期望/m	方差	分布类型	期望/(°)	方差
1	泊松分布	0.2	正态分布	0.35	0.01	正态分布	30	2
2	泊松分布	0.2	正态分布	0.35	0.01	正态分布	120	2

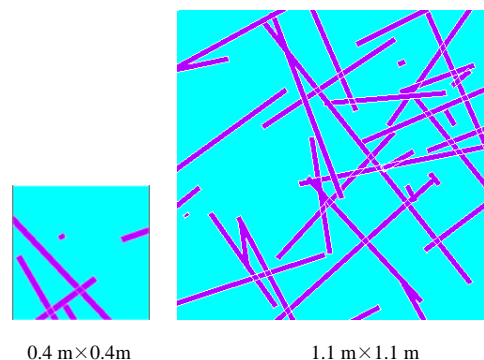


图 1 试件模型节理分布示意图

Fig.1 Sketch maps of simulated network of discontinuities

在围压为 5 MPa 时, 施加轴向荷载, 荷载值为已经获得的岩体极值强度。加载采用分步加载, 步间距根据应力随应变变化幅度自动调整, 同时在每一步记录下岩体的轴向位移, 这样就得到了岩体的应力与位移的对应数据组, 位移除以试件长度就是岩体的平均应变, 据此可以绘制岩体的应力 - 应变曲线。边界条件和加载过程如图 2 所示。

3 岩体变形性质

在荷载作用下, 岩体产生变形, 随着荷载的不

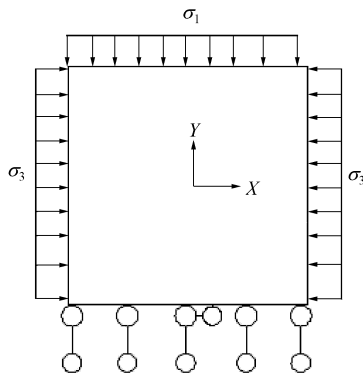


图 2 试件的边界条件和加载过程

Fig.2 Boundary condition and loading process of sample

断增加, 岩体变形逐渐增大, 最终导致岩体破坏。岩体变形有弹性变形和塑性变形。通过室内试验, 已得到的岩体单轴和三轴压缩变形曲线。对比分析尺寸为 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 的试件的数值试验结果, 其应力 - 应变曲线如图 3 所示。

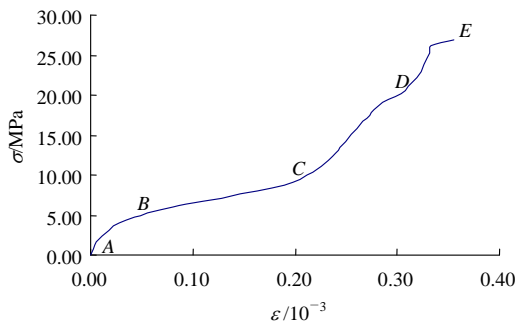


图 3 尺寸为 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 试件的应力 - 应变曲线图

Fig.3 Stress-strain curve of sample with size of $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$

从上面的应力 - 应变曲线可以看出: 由于试件尺寸比较小, 所包含的节理数目特别少, 岩体内部绝大多数是完整岩石, 但有一条贯穿节理, 如图 2 所示, 所以岩体曲线基本与岩石的变形曲线有些不同。由于节理的影响, 使曲线产生了波动现象。开始阶段 *AB* 近似直线上升, 结构面与岩石均处于弹性阶段, 到达点 *B* 后, 结构面材料发生屈服; *BC* 段为岩石处于弹性阶段, 结构面材料发生蠕变流动, 并不断持续到点 *C*, 这与结构面材料相对完整岩石来说属于软岩的特征相符合。这个过程中结构面材料已经塑性屈服; *CD* 段是表征荷载主要由完整岩石来承担, 且岩石处于弹性阶段, 由于有结构面的影响, 应力 - 应变曲线稍有波动但近似为直线, 点 *D* 表示岩石达到弹性极限, 开始屈服即是屈服点; *DE* 段为岩体的塑性性状阶段, 在这个过程中, 岩

体微破裂的发展出现了质的变化, 破裂不断发展, 直至试件完全破坏, 达到极值强度点 *E*。试件由体积压缩变成扩容, 轴向应变速率迅速增大; 点 *E* 以后为岩体破坏后阶段, 本文不作讨论。

从另一方面来分析, *AB* 段弹性模量 *E* 近似不变; 进入 *BC* 段, 随着轴向荷载的增加, 岩体应力增加变缓, 应变增加加剧, 此时, 变形模量 *E* 变小, 且在该构成中近似维持不变, 直至点 *C* 附近, 变形模量又开始增大; 点 *D* 过后, 整个岩体开始进入屈服阶段, *E* 值开始减小, 直至破坏。

从上面的分析可以看出, 随机断续节理岩体当尺寸比较小时, 岩体变形特性受节理影响比较大, 往往一条节理就可以影响整个试件的变形特征。而当试件尺寸增大时, 由于节理分布的增多, 整个岩体趋于均匀, 所以岩体的变形特性趋于平稳, 与完整岩石的变形特性十分相似。

4 岩体变形特征的尺寸效应及 REV

通过改变试件的尺寸大小, 从 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 到 $1.4\text{ m} \times 1.4\text{ m}$, 共计 7 组试件。考虑到节理网络的随机性, 每一组试件中共包括 10 个试件, 这 10 个试件是由同一节理分布概率模型产生的。通过上面介绍的加载方法, 每一组试件获得 10 条应力 - 应变曲线, 这些曲线可绘制在一张图上, 以试件尺寸为 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 的模型为例, 其应力 - 应变曲线如图 4 所示。

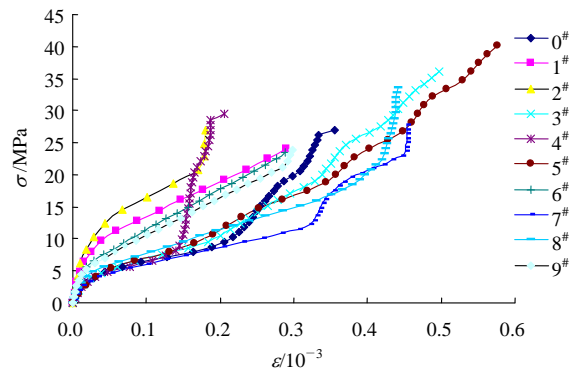


图 4 尺寸为 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 的 10 组试件的应力 - 应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of model with size $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$

通过上图可以观测到由于节理的存在, 应力 - 应变曲线是分散的, 10 条曲线迥然各异, 有的表现出结构面的蠕变特性; 有的结构面的影响不是很明显, 有的极值强度很大, 有的很小, 差异比较大, 这主要是由于试件尺寸比较小, 节理分布很不均匀,

有的试件节理条数多一些，有的少一些，节理的随机空间分布，使得加载过程是一个使岩体变形局部化的过程，从而得到离散的应力 - 应变曲线和试件产生复杂的响应现象。整个岩体结构的差异导致应力 - 应变曲线的离散性。

为了描述同一尺寸同一节理分布概率模型产生的不同试件的应力 - 应变曲线的离散性，设定以下几个统计指标。由于测得的数据是许多应力 - 应变的离散点，且数据比较密集，所以可以把某一应力前后两个应力下的应变值用线性差值获得这一应力下的应变值。这样可以得到同一应力下，不同试件的应变值，然后对这些离散的应变值进行统计分析。以这些离散值的方差作为判断曲线离散程度的标准。

由于时间和篇幅的限制，这里只取 3 个应力水平下的各试件应变值，3 个应力分别是 10，15，20 MPa(见表 2)。

表 2 尺寸为 0.4 m×0.4 m 的试件同一应力水平下轴向应变离散值

Table 2 Scatter value of axial strain with size of 0.4 m×0.4 m for joint rock mass samples under same stress condition

试件	应变/10 ⁻³		
	10 MPa	15 MPa	20 MPa
0 [#]	0.213 0	0.255 0	0.300 0
1 [#]	0.044 0	0.128 0	0.220 0
2 [#]	0.026 0	0.076 0	0.158 0
3 [#]	0.193 0	0.262 0	0.339 0
4 [#]	0.149 0	0.157 0	0.164 0
5 [#]	0.177 0	0.259 0	0.356 0
6 [#]	0.079 0	0.157 0	0.236 0
7 [#]	0.253 0	0.336 0	0.386 0
8 [#]	0.161 0	0.302 0	0.397 0
9 [#]	0.090 0	0.176 0	0.263 0
期望	0.139 0	0.211 0	0.282 0
方差	0.005 1	0.006 8	0.007 6

3 个应力水平下，10 组曲线对应的应变值的方差分别是 0.005 1，0.006 8，0.007 6。以下是尺寸分别为 0.6 m×0.6 m，0.8 m×0.8 m，1.0 m×1.0 m，1.1 m×1.1 m 的试件对应的应力 - 应变曲线，如图 5~8 所示。以及试件尺寸分别为 0.6 m×0.6 m，0.8 m×0.8 m，1.0 m×1.0 m，1.1 m m×1.1 m 的同一应力水平下轴向应变离散值的统计结果，如表 3 所示。

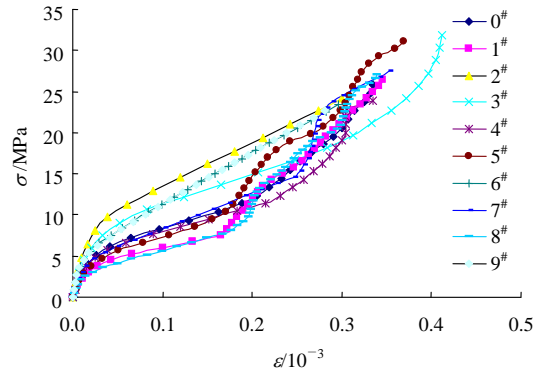


图 5 尺寸为 0.6 m×0.6 m 的 10 组试件的应力 - 应变曲线
Fig.5 Stress-strain curves of model with size of 0.6 m×0.6 m

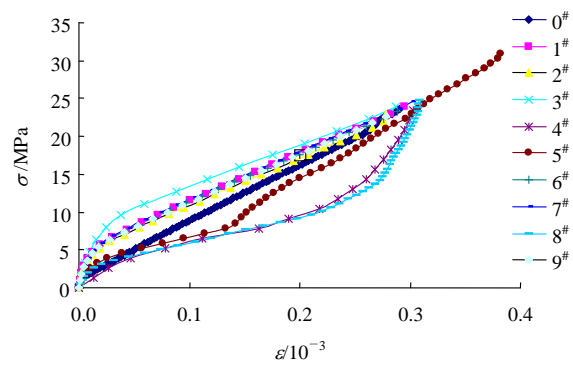


图 6 尺寸为 0.8 m×0.8 m 的 10 组试件的应力 - 应变曲线
Fig.6 Stress-strain curves of model with size of 0.8 m×0.8 m

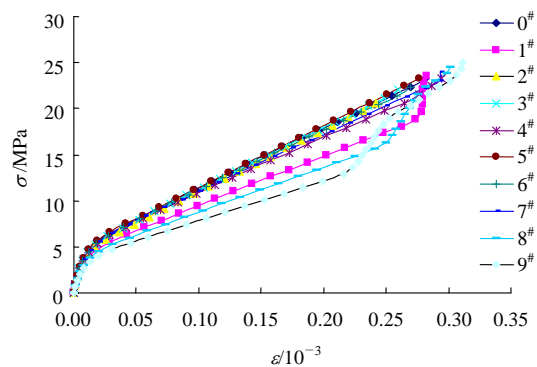


图 7 尺寸为 1.0 m×1.0 m 的 10 组试件的应力 - 应变曲线
Fig.7 Stress-strain curves of model with size of 1.0 m×1.0 m

从不同尺寸试件的应力 - 应变曲线可以看出，随着试件尺寸的增大，应力 - 应变曲线越来越趋于一致，多组曲线组成的条带宽度渐渐变窄。同时也可以发现，当尺寸增大到 1.1 m×1.1 m 时，曲线基本上都变成了上凸形曲线，这种变形曲线与实际室内试验得到的节理是一致的，即这种曲线一般代表的以下几种岩体：节理裂隙很发育，而有软弱夹层充填的情况；岩石性质软弱(如泥岩、风化岩等)的

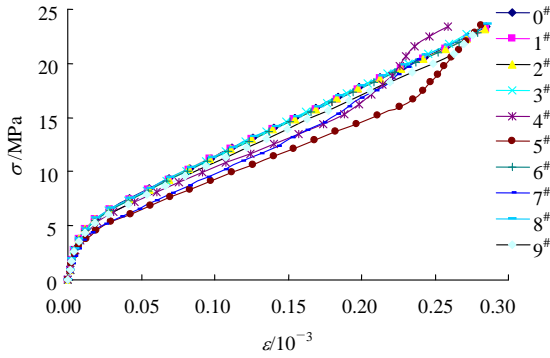


图 8 尺寸为 1.1 m×1.1 m 的 10 组试件的应力 - 应变曲线
Fig.8 Stress-strain curves of model with size of 1.1 m×1.1 m

表 3 同一应力水平下不同尺寸试件对应的应变方差

Table 3 Square error of strain with different sizes under same stress condition

试件尺寸 /(m×m)	应变方差		
	10 MPa	15 MPa	20 MPa
0.4×0.4	0.005 1	0.006 8	0.007 6
0.6×0.6	0.002 7	0.001 8	0.000 9
0.8×0.8	0.003 2	0.002 2	0.000 6
1.0×1.0	0.000 5	0.000 9	0.000 3
1.1×1.1	0.000 6	0.000 5	0.000 1

岩体; 埋藏较深, 有软弱夹层的岩体。

从上面的统计结果看, 随着试件尺寸的增加, 最大方差 D 小于 0.001 时, 就认为曲线已经很接近同一应力水平下, 10 组曲线对应的应变值的分散程度逐渐减小, 如表 3 和图 9 所示, 10 MPa 时应变方差从 0.005 1 下降到 0.000 6; 15 MPa 对应的各曲线应变值的方差从 0.006 8 下降到 0.000 5; 20 MPa 对应的应变值方差从 0.007 6 下降到 0.000 1。这里以

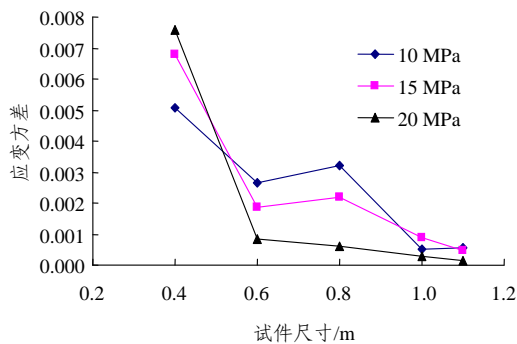


图 9 不同应力水平下轴向应变方差随试件尺寸变化曲线图
Fig.9 Relationship between mean squared departure of the axial strain and model scale under different stresses

这个同一应力水平下多组应变值的方差来度量多组曲线的聚敛程度。不同应力水平下, 多组应变值的最大方差 D 小于 0.001 时, 就认为曲线已经很接近了, 这些应力 - 应变曲线所形成的带状区域可以作为该节理岩体的变形特征区域。所以本文中当试件尺寸达到 1.1 m×1.1 m 时, 曲线围成的狭长趋于就可以作为节理岩体模型的变形特征区域, 该尺寸 1.1 m×1.1 m 就可以作为该节理岩体的变形性状的特征尺寸 REV 值。

5 结 论

本文通过自编的 ANSYS 随机断续节理模型对节理岩体变形特征 REV 进行了研究。分析了尺寸为 0.4~1.1 m 试件的应力 - 应变曲线特征, 对同一尺寸的 10 组模型的变形曲线进行了比较分析, 确定了曲线离散度的判断标准。发现当岩体尺寸比较小时, 同一节理概率模型下的不同试件的应力 - 应变曲线的离散性比较高, 随着试件尺寸的增大, 多组应力 - 应变曲线越来越趋于一致, 多组曲线组成的条带宽度渐渐变窄, 可见岩体的变形特征具有明显的尺寸效应, 根据离散度的判断标准得到了岩体变形性状的特征尺寸 REV 值。

参考文献(References):

- [1] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.(CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese))
- [2] 周创兵, 熊文林. 论岩体的渗透特性[J]. 工程地质学报, 1996, 4(2): 69 - 74.(ZHOU Chuangbing, XIONG Wenlin. On permeability characteristics of rock mass[J]. Journal of Engineering Geology, 1996, 4(2): 69 - 74.(in Chinese))
- [3] BEAR J. Dynamics of fluids in porous media[M]. New York: Elsevier, 1972.
- [4] CUNHA A P. Scale effects in rock mechanics, scale effects in rock masses[M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1990.
- [5] 周创兵, 於三大. 论岩体表征单元体积 REV——岩体力学参数取值的一个基本问题[J]. 工程地质学报, 1999, 7(4): 332 - 337. (ZHOU Chuangbing, YU Sanda. Representative elementary volume

- REV — a fundamental problem for selecting the mechanical parameters of jointed rock masses[J]. *Journal of Engineering Geology*, 1999, 7(4): 332 - 336.(in Chinese))
- [6] KULATILAKE P H S W. Estimating elastic constants and strength of discontinuous rock[J]. *J. Geotech. Engrg., ASCE*, 1985, 111(10): 847 - 864.
- [7] MIN K B, JING L R. Numerical determination of the equivalent elastic compliance tensor for fractured rock masses using the distinct element method[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2003, 40(6): 795 - 816.
- [8] MIN K B, JING L. Stress—dependent mechanical properties and bounds of Poisson's ratio for fractured rock masses investigated by a dfn-dem technique[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2004, 41(Supp.1): 390 - 395.
- [9] 喻 勇. 岩体变形模量的尺寸效应[J]. *岩土力学*, 2003, 24(增 1): 48 - 51.(YU Yong. Size effects on deformation modulus of rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(Supp.1): 48 - 51.(in Chinese))
- [10] 向文飞, 周创兵. 裂隙岩体表征单元体研究进展[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(增 2): 5 686 - 5 690.(XIANG Wenfei, ZHOU Chuangbing. The advances in investigation of representative elementary volume for fractured rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(Supp.2): 5 686 - 5 690.(in Chinese))
- [11] 杨圣奇. 岩石材料尺寸效应的试验和理论研究[J]. *工程力学*, 2005, 22(4): 112 - 118.(YANG Shengqi. Experimental and theoretical study of size effect of rock material[J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(4): 112 - 118.(in Chinese))
- [12] 刘宝琛, 张寄生, 杜奇中. 岩石抗压强度的尺寸效应[J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(6): 611 - 614.(LIU Baochen, ZHANG Jisheng, DU Qizhong. A study of size effect for compression strength of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(6): 611 - 614.(in Chinese))
- [13] 傅宇方, 唐春安. 岩石声发射 Kaiser 效应的数值模拟试验研究[J]. *力学与实践*, 2000, 22(6): 42 - 44.(FU Yufang, TANG Chun'an. Numerical test on Kaiser effect in rock failure process[J]. *Mechanics and Engineering*, 2000, 22(6): 42 - 44.(in Chinese))
- [14] TANG C A, LIU H, LEE P K, et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression: part II: constraint, slenderness and size effect[J]. *Int. J. Rock Mech. Mini. Sci.*, 2000, 37(4): 571 - 583.