

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.04.15

裂隙延展性统计分布离散性对岩体块体化程度 REV 的影响

夏露, 谢娟, 于青春

(中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 表征单元体 (REV) 的存在是应用连续介质力学方法对岩体进行研究的前提, REV 可以从岩体块体化程度的角度进行研究, 裂隙大小及其统计分布是影响岩体块体化程度 REV 的重要因素。本文利用课题组自主研发的 GeneralBlock 软件, 建立更一般化实际化的模型, 研究裂隙延展性统计分布的离散程度对岩体块体化程度 REV 的影响。分析时选取了最常用的裂隙延展性统计分布形式: 正态分布。由于所建立的岩体结构模型是随机的, 需要对每个随机裂隙模型进行多次实现。为节省计算量, 当研究范围比较小时, 对每种结构的每个研究范围进行 9 次随机实现。当研究范围足够大, 达到 REV 大小的时候进行 100 次随机实现。为确定离散程度对表征单元体的影响, 本文针对 5 个不同标准差进行了模拟分析 (共建立了 1 005 个裂隙模型, 分别进行了块体识别并计算其块体化程度 B)。结果表明, 裂隙延展性服从正态分布的情况下, 如果其平均值一定, 岩体的块体化程度随着统计分布离散程度的增加略有上升, 裂隙岩体的 REV 值基本上由裂隙延展性统计平均值决定。

关键词: 表征单元体; 裂隙延展性; 离散程度; 块体化程度

中图分类号: TU451

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)04-0112-07

Influence of statistical distribution dispersion in the fracture size on blockiness REV of fractured rock masses

XIA Lu, XIE Juan, YU Qingchun

(School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The existence of representative elementary volume (REV) is the premise of using the continuous-media method to study rock mass, and it can be studied from the view of blockiness. The size and statistical distribution of the fractures are the important factors in the blockiness REV of fractured rock masses. In this paper more generalized models are built to examine the influence of statistical distribution dispersion in the fracture size on the Blockiness REV of fractured rock masses by using the General Block software, which was developed by our research group. The most common statistical distribution of the fracture size, the normal distribution, is used. For each model, multiple realizations are carried out to reduce the effects of randomness. To improve the efficiency of computation, 9 random realizations are performed when the model domains are small. When the model domain sizes reach the REV volume, 100 random realizations are carried out. Five different standard deviations are considered in the simulation analysis to study the influence of statistical distribution dispersion in fracture size on the blockiness REV (1 005 fracture models are established, and rock blocks in each models are identified to calculate the blockiness). The results indicate

收稿日期: 2018-10-31; 修订日期: 2018-12-21

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(41802248); 北京市优秀人才培养资助(2016000020124G111)

第一作者: 夏露(1983-), 女, 副研究员, 主要从事水文地质工程地质研究。E-mail: xialu@cugb.edu.cn

通讯作者: 于青春(1963-), 男, 教授, 主要从事岩体裂隙、岩石块体的研究。E-mail: yuqch@cugb.edu.cn

that if the distribution of fracture size is normal, the REV is controlled by the mean value of the fracture size, and the blockiness increases slightly with the distribution dispersion in the fracture size.

Keywords: representative elementary volume; fracture size; dispersion; blockiness

表征单元体(representative elementary volume, REV)是裂隙岩体中重要的概念。对岩体来说,表征单元体的存在是应用连续介质力学方法对其进行研究的前提。正如只有当某岩体存在渗透表征单元体时,其渗透张量才有定义,才能够将多孔介质方法用于这一岩体。

由于岩体表征单元体概念的基础性,长期以来引起了众多学者关注。不同学者从不同角度对岩体REV进行了讨论。Bear从孔隙度的角度对岩体REV进行了研究^[1];Long^[2]、Wang等^[3]从渗透张量的角度讨论了表征单元体的存在性和尺度问题;张贵科等^[4]从结构面几何参数和力学参数的角度以岩体内所有结构面在某截面上的投影面积之和与岩体体积的比值作为衡量岩体REV尺度的指标;安玉华等^[5]从岩体体积节理数收敛的角度来确定岩体的REV的大小;Xia等^[6]提出了从岩体块体化程度的角度确定岩体REV。

块体化程度^[7]是评价岩体完整性的一种指标,已有一些学者采用这一指标对岩体进行质量分级^[8-10]。裂隙岩体的块体化程度指岩体中由裂隙圈闭形成的孤立块体的总体积在岩体中所占体积百分比,文献[6]从岩体块体化程度的角度对岩体REV存在性进行了较系统的分析。作者在文献[6]中,根据国际岩石力学学会的裂隙分级,针对7个延展性级别、11个间距级别建立了77种岩体结构模型。并对这77种岩体进行了块体识别,分别讨论了这77种岩体结构的块体化程度随着模型范围变化的波动情况。由于所建立的岩体结构模型是随机的,对每种结构的每个研究范围进行了多次随机实现。结果表明,对于所有的77种岩体,76种岩体的表征单元体的尺寸在2~20倍间距之间。然而在以往的研究中,作者简化裂隙模型,假设所有裂隙相互平行且大小相同。而实际岩体中裂隙数量众多,大小各异。块体是由裂隙相互交切圈闭而形成的,其几何特征自然受裂隙的几何特征的影响。裂隙大小与产状相结合影响岩石块体数量和规模,进而影响岩体的稳定性。因此,基于以往研究基础,本文讨论裂隙大小对形成块体的作用,使建立的岩体裂隙模型相对于以往研究的更一般化,更实际化。在文献[6]模型的基础上,首先,保持裂隙位置、产状、密度等其他参数不变,改变裂隙大小统计分布的方差;第二步,构

建裂隙延展性统计分布的离散程度不同的三维裂隙网络模型;第三步,识别岩体中所有块体及其几何参数,绘制块体化程度与模型范围的关系图;最后,对各种裂隙岩体的块体化程度进行统计分析和定量计算,进而确定基于块体化程度统计的REV存在性及其大小。

为了得到规律性的认识,本文选取最常见的裂隙延展性统计分布形式:正态分布。用其标准差来表达裂隙大小离散程度,利用课题组自主研发的软件General Block软件^[11]建立裂隙网络模型及块体识别计算,对得到的结果进行统计分析,从块体化程度这个角度,总结归纳裂隙延展性统计分布的离散程度对岩体REV的影响。

1 裂隙延展性统计分布

1.1 裂隙的三维形状及大小

若要建立三维裂隙网络模型,裂隙面在三维空间上的形状和空间分布是一个无法回避的问题。实际岩体中的裂隙面会是非常复杂的形状,即使是在很小的范围内所有的裂隙也极可能不是一个固定的形状。在不同的研究中,裂隙曾被假设为圆形、椭圆形、任意多边形等。一般来说,任意多边形、椭圆形假设由于含有更多的参数,可以更符合实际地描述野外的实际裂隙,但一个模型含有的参数越多,对野外数据的要求则更高。像椭圆模型,在野外如何确定椭圆长短轴的方向和大小就是一个很大的困难。因此无论是理论还是实际工程应用研究,目前绝大多数情况下都把裂隙看作是圆盘形,这样描述裂隙的大小只需要一个参数,即它的直径或半径。因此,本文采用空间位置分布满足均匀泊松过程的圆盘模型^[12-13],这种模型是目前最为流行的裂隙模型,是许多裂隙参数统计理论建立的基础。这种情况下,裂隙面的延展性可以用圆盘的半径进行描述。

1.2 裂隙延展性及其统计分布

裂隙的延展性是表征裂隙系统的一个重要几何参数。文献[14-17]中可见,裂隙直径概率分布形式最常见的是服从正态分布(Normal分布)。如果随机变量 X 的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (-\infty < x < +\infty) \quad (1)$$

则称随机变量 X 服从正态分布,记作 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$,其中 μ 与 σ 是分布的参数,参数 μ 是随机变量 X 的数学期望,参数 σ 是随机变量 X 的标准差。若固定 μ ,改变值 σ ,由 $f(x)$ 的最大值可知, σ 越大,正态密度曲线越平坦; σ 越小,正态密度曲线越陡峭。参数 σ 决定曲线的形状(图 1)。本研究中,裂隙延展性统计分布的离散程度即由标准差(σ)来表征。

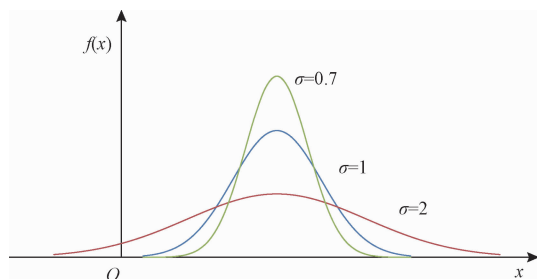


图 1 正态分布概率密度函数曲线

Fig. 1 Curves of the probability density function of normal distribution

表 1 77 种裂隙岩体的裂隙间距、延展性、三维密度表(D = 延展性; C = 间距)

Table 1 Spacing, persistence and three-dimensional density (d_3) of the fractures in the 77 fractured rock models (D = persistence; C = spacing)

	极密间距 (ECS) $C = 0.02$ m	很密间距 (VCS1) $C = 0.04$ m	很密间距 (VCS2) $C = 0.06$ m	密间距 (CS1) $C = 0.13$ m	密间距 (CS2) $C = 0.2$ m	中等间距 (MS1) $C = 0.4$ m	中等间距 (MS2) $C = 0.6$ m	宽间距 (WS1) $C = 1.3$ m	宽间距 (WS2) $C = 2$ m	很宽间距 (VWS) $C = 4$ m	极宽间距 (EWS) $C = 6$ m
非常高延展性 (VHP) $D = 20.0$ m	0.159 2	0.079 6	0.053 1	0.024 5	0.015 9	0.008 0	0.005 3	0.002 4	0.001 6	0.000 8	0.000 5
高延展性 (HP) $D = 15.0$ m	0.282 9	0.141 5	0.094 3	0.043 5	0.028 3	0.014 1	0.009 4	0.004 4	0.002 8	0.001 4	0.000 9
中等延展性 (MP2) $D = 10$ m	0.636 6	0.318 3	0.212 2	0.097 9	0.063 7	0.031 8	0.021 2	0.009 8	0.006 4	0.003 2	0.002 1
中等延展性 (MP1) $D = 6.5$ m	1.506 8	0.753 4	0.502 3	0.231 8	0.150 7	0.075 3	0.050 2	0.023 2	0.015 1	0.007 5	0.005 0
低延展性 (LP2) $D = 3.0$ m	7.073 6	3.536 8	2.357 9	1.088 2	0.707 4	0.353 7	0.235 8	0.108 8	0.070 7	0.035 4	0.023 6
低延展性 (LP1) $D = 2.0$ m	15.915 5	7.957 7	5.305 2	2.448 5	1.591 5	0.795 8	0.530 5	0.244 9	0.159 2	0.079 6	0.053 1
非常低延展性 (VLP) $D = 1.0$ m	63.662 0	31.831 0	21.220 7	9.794 2	6.366 2	3.183 1	2.122 1	0.979 4	0.636 6	0.318 3	0.212 2

由于所建立的岩体结构模型是随机的,本文首先对每种结构的每个研究范围先进行 9 次随机实现,得到 MS1-MP1 裂隙岩体的块体化程度和 REV 值大小。然后再对研究范围为 REV 大小,即块体化程度达到稳定时,进行 100 次随机实现,得到模型的块体化程度。本文选取裂隙延展性统计分布为 5 个不同标准差条件下的正态分布,故文中共建立了 1 005 个裂隙模型,分别进行了块体识别并计算其块体化程度,归纳总结裂隙延展性统计分布的离散程度对岩体表征单元体的

2 裂隙岩体块体化程度分析

2.1 裂隙网络模型

文献[6]中作者根据国际岩石力学学会(1978)的岩体裂隙分级表,构建 77 种不同长度(D)、不同间距(C)的裂隙网络模型(表 1)。由于计算量巨大,本文选取中间的模型即中等间距-中等延展性(MS1-MP1)模型($C = 0.4$ m, $D = 6.5$ m)来进行详细分析讨论。模型的研究范围为长、宽、高相同的立方体,选取从 2 倍裂隙间距一直取到 20 倍裂隙间距:0.8,1.6,2.4,3.2,4,4.8,5.6,6.4,7.2 和 8 m。

根据 3σ 原则^[18],随机变量 x 几乎落在区间 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 内,概率为 0.997 4(图 2),而落在该区间以外的概率可以忽略不计。因裂隙直径大于 0,即 $\mu - 3\sigma > 0$,故本研究中对于每个模型范围,裂隙延展性统计分布选取 5 个不同标准差($\sigma = 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1$)条件下的正态分布。

影响。

中等间距-中等延展性裂隙网络模型具体参数如表 2 所示。图 3 是 MS1-MP1 裂隙岩体模型(模型范围:4 m × 4 m × 4 m)3 种不同裂隙参数的三维裂隙网络图。图 3a 是裂隙延展性统计分布为标准差($\sigma = 0.1$)条件下的正态分布;图 3b 是裂隙延展性统计分布为标准差($\sigma = 0.5$)条件下的正态分布;图 3c 是裂隙延展性统计分布为标准差($\sigma = 1$)条件下的正态分布。

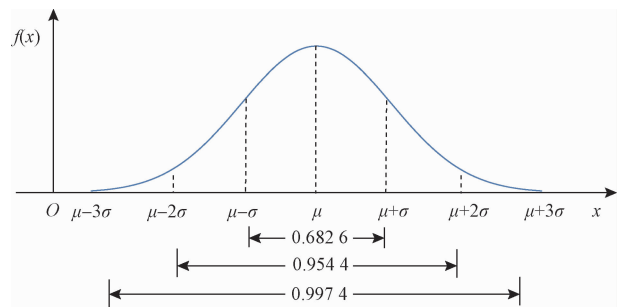


图 2 正态分布 μ 两侧 σ 、 2σ 、 3σ 之间的概率

Fig.2 Probability of σ , 2σ , 3σ on both sides of the normal distribution μ

表 2 中等间距-中等延展性裂隙网络模型参数表

Table 2 Parameters for the discrete fracture network of the MS1-MP1 model

裂隙组号	1	2	3
长度分布形式	正态分布	正态分布	正态分布
产状分布形式	Fisher	Fisher	Fisher
产状 Fisher 参数 κ	20	20	20
平均倾向/(°)	180	90	360
平均倾角/(°)	90	90	1
半径均值/m	3.25	3.25	3.25
三维密度/(条·m ⁻³)	0.075 3	0.075 3	0.075 3

对比设定的理想值与模拟值(表 3)可发现,二者之间在裂隙半径均值、标准差、数量等方面都十分接近,说明建立的模型比较合理。

表 3 中等间距-中等延展性岩体模型裂隙半径理想值与模拟值对比

Table 3 Comparison between the theoretical and simulated of the fracture radius in the MS1-MP1 model

理想值		模拟值					
半径 σ	半径 μ /m	半径 σ	半径 μ /m	半径最大/m	半径最小/m	极差/m	裂隙条数
0.10	3.25	0.10	3.26	3.572	2.908	0.664	1 107
0.25	3.25	0.25	3.27	4.054	2.395	1.659	1 107
0.50	3.25	0.51	3.29	4.859	1.54	3.319	1 107
0.75	3.25	0.76	3.31	5.663	0.684	4.979	1 107
1	3.25	0.99	3.32	6.188	0.394	5.794	1 107

2.2 裂隙模型块体化程度计算

作者自主开发的 General Block 软件,它能够在“有限延展裂隙、复杂开挖面形状”条件下识别出所有块体,并得到块体的稳定性和几何参数,如块体体积、块体各顶点坐标等。用 General Block 建立岩体模型,输入裂隙几何参数建立裂隙网络模型,对裂隙岩体进行块体识别及稳定性计算可以得到相关结果。用 General Block 软件建立中等间距-中等延展性

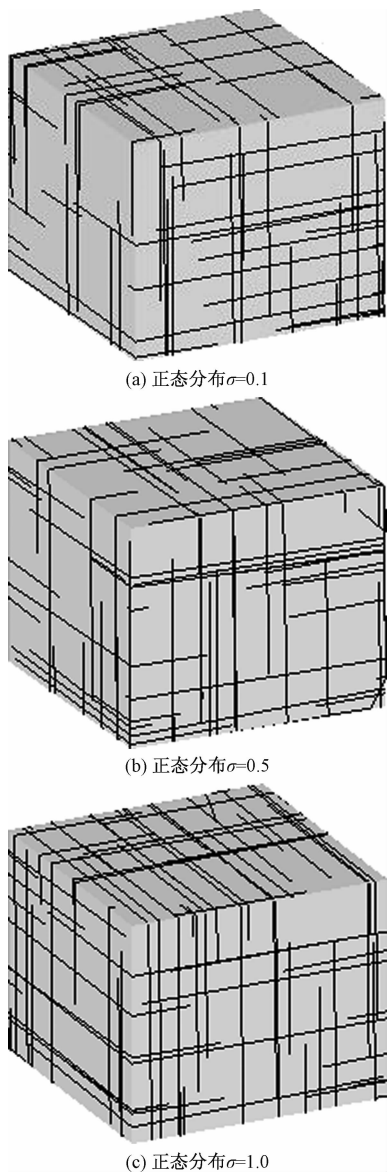


图 3 中等间距-中等延展性裂隙岩体模型 (模型范围:4 m×4 m×4 m) 不同裂隙延展性统计分布离散程度的三维裂隙网络图

Fig.3 3D fracture networks produced by different statistical distribution dispersions in the fracture size of the MS1-MP1 model(model dimensions: 4 m×4 m×4 m)

裂隙岩体模型,并输入各组裂隙的随机参数(表 3),进行三维裂隙网络模拟,并进一步进行块体识别计算。计算结果可以得到相应模拟的裂隙岩体中存在的所有块体及其几何参数。用块体百分比^[6]来确定各不同裂隙岩体的块体化程度,进而来确定 REV 的大小。图 4 是图 3 中所示的 3 个模型的块体发育情况,图中的裂隙大小离散程度、间距及模型范围与图 3 相同。

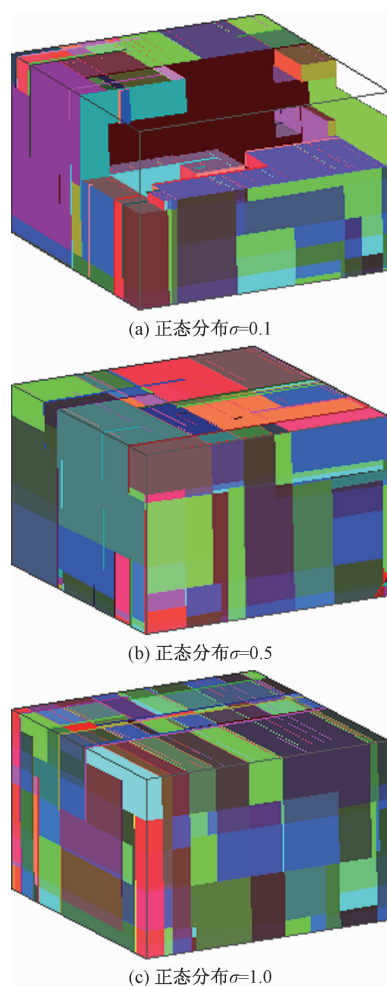


图4 不同裂隙延展性统计分布离散程度的中等间距-中等延展性裂隙岩体模型形成块体情况(模型范围:4 m×4 m×4 m)

Fig.4 3D models of rock masses produced by different statistical distribution dispersions in the fracture size of the MS1-MP1 model(model dimensions: 4 m×4 m×4 m)

3 裂隙大小离散性与 REV 的关系

3.1 裂隙大小离散性与岩体块体化程度的关系

利用 General Block 软件对中等间距-中等延展性模型中每个不同模型研究范围下的块体化程度进行计算统计分析。文献[6]中作者已得出中等间距-中等延展性裂隙岩体模型在研究范围达到10倍裂隙间距,岩体的块体化程度趋于稳定,即中等间距-中等延展性岩体模型的 REV 大小为4 m×4 m×4 m。由于所建立的岩体结构模型是随机的,为了得到裂隙大小离散性与岩体块体化程度的关系,减少随机性的影响,作者对此岩体模型研究范围4 m×4 m×4 m,裂隙延展性统计分布为5个不同标准差($\sigma = 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1$)的正态分布条件下的裂隙网络模型,分别进

行100次随机实现,绘制裂隙岩体的块体化程度随裂隙延展性统计分布离散程度的波动情况(图5)。图中纵轴(B)代表岩体块体化程度,即岩体中由裂隙圈闭形成的孤立块体的总体积在岩体中所占体积百分比;横轴(σ)表示裂隙大小的离散程度,即标准差(σ),图中的曲线表示的是100次随机实现的平均值。由图5可见,岩体的块体化程度随着裂隙延展性统计分布的离散程度增大而略有增加,其块体化程度从85.31%增加到90.96%。即随着裂隙延展性统计分布的离散程度变化,中等间距-中等延展性裂隙岩体模型的块体化程度稍有变化,其模型岩体处于相对破碎状态。这说明裂隙直径平均值一定的情况下,如统计分布的离散程度变化,岩体模型的块体化程度会略有上升,这方面有待于进一步详细研究。

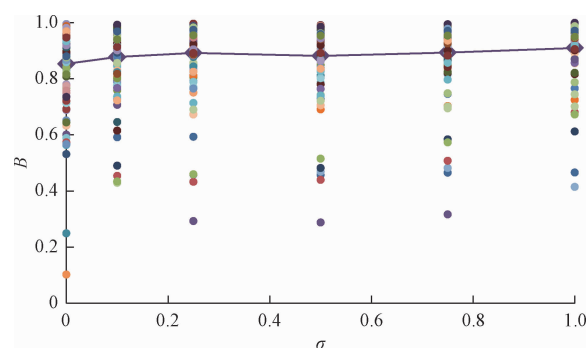


图5 中等间距-中等延展性裂隙岩体(模型范围:4 m×4 m×4 m) B 值与裂隙延展性统计分布离散程度(σ)的关系

Fig.5 Relationships between B and statistical distribution dispersion in the fracture size (σ) of the MS1-MP1 model(model dimensions: 4 m×4 m×4 m)

3.2 裂隙大小离散性与岩体 REV 值的关系

结合以上 General Block 软件的计算结果和相关的块体理论,绘制不同裂隙大小离散性条件下,岩体结构的块体化程度随着模型范围变化的波动图(图6)。图中纵轴是岩体块体化程度,横轴表示一个无量纲长度,研究范围长度 L 与裂隙间距 C 的比值。图中的5条曲线分别表示5个不同离散程度的裂隙延展性统计分布下,裂隙岩体块体化程度随模型范围的变化情况。如果把岩体模型的块体程度波动趋于稳定时的研究范围的长度定义为表征单元体的大小,那么可以初步认为,中等间距-中等延展性裂隙岩体的表征单元体的大小在10倍间距时,裂隙岩体的块体化程度达到稳定,中间的模型即中等间距-中等延展性模型($C = 0.4$ m, $D = 6.5$ m),当裂隙直径平均值一定的情况下,其统计

分布的离散程度变化,不影响其 REV 值的大小,中等间距-中等延展性模型的 REV 大小为 $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 。

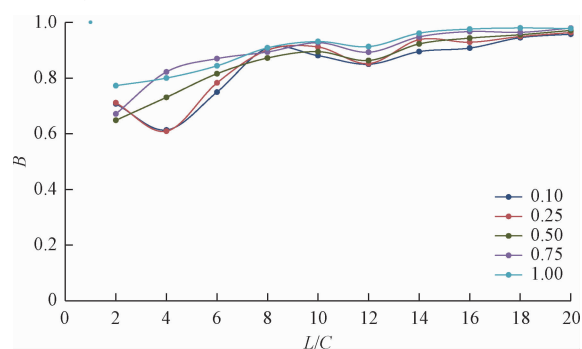


图6 中等间距-中等延展性裂隙岩体模型 B 值与模型范围的关系 ($C=0.4\text{ m}$, $D=6.5\text{ m}$)

Fig. 6 Relationships between B and the model domain size of the MS1-MP1 model ($C=0.4\text{ m}$, $D=6.5\text{ m}$)

4 结论

(1) 裂隙大小不变的条件下,中等间距-中等延展性裂隙岩体的块体化程度为 85.31%。

(2) 裂隙直径服从正态分布的情况下,如果其平均值一定,岩体的块体化程度随着统计分布离散程度的增加略有上升。

(3) 中等间距-中等延展性裂隙岩体的 REV 值与裂隙延展性统计分布的离散程度相关性不大,其岩体的 REV 值为 10 倍间距,即 $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 。

(4) 以上结论是关于裂隙大小离散性与 REV 的关系的基本认识,假设裂隙大小满足正态分布。对于更复杂的分布形式仍有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] BEAR J. 多孔介质流体动力学[M]. 李竞生,陈崇希,译. 北京:中国建筑工业出版社,1972. [BEAR J. Dynamics of fluids in porous media[M]. LI J S, CHEN C X, trans. Beijing: China Building Industry Press, 1972. (in Chinese)]
- [2] LONG J C S. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures [J]. Water Resources Research, 1982, 18(3): 645-658.
- [3] WANG M, KULATILAKE P H S. Estimation of REV size and three-dimensional hydraulic conductivity tensor for a fractured rock mass through a single well packer test and discrete fracture fluid flow modeling [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(7): 887-904.
- [4] 张贵科,徐卫亚. 裂隙网络模拟与 REV 尺度研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1675-1680. [ZHANG G K, XU W Y. Analysis of joint network simulation method and REV scale[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1675-1680. (in Chinese)]
- [5] 安玉华,王清. 基于三维裂隙网络的裂隙岩体表征单元体研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3775-3780. [AN Y H, WANG Q. Analysis of representative element volume size based on 3D fracture network [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3775-3780. (in Chinese)]
- [6] XIA L, ZHENG Y H, YU Q C. Estimation of the REV size for blockiness of fractured rock masses[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 76: 83-92
- [7] 夏露,李茂华,陈又华,等. 三峡工程地下电站厂房岩石块体研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2015. [XIA L, LI M H, CHEN Y H, et al. Rock blocks in the rock around the underground powerhouse of Three-gorges project [M]. Beijing: China Waterpower Press, 2015. (in Chinese)]
- [8] 陈庆发,韦才寿,牛文静,等. 一种基于块体化程度理论的裂隙岩体巷道顶板稳定性分级方法研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2901-2908. [CHEN Q F, WEI C S, NIU W J, et al. Stability classification of roadway roof in fractured rock mass based on blockiness theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2901-2908. (in Chinese)]
- [9] 和大钊,胡斌,姚文敏,等. 基于块体化程度和云模型的露天矿边坡稳定性分级评价方法[J]. 矿冶工程, 2017, 37(4): 6-13. [HE D Z, HU B, YAO W M, et al. Stability grading method for open pit slope based on Blockiness and Cloud Model[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37(4): 6-13. (in Chinese)]
- [10] 王晓明,李会中,王吉亮,等. 乌东德水电站右岸地下厂房随机块体特征研究[J]. 现代地质, 2013, 27(2): 475-481. [WANG X M, LI H Z, WANG J L, et al. Characteristics of stochastic blocks in underground powerhouse on the right bank of Wudongde hydropower station [J]. Geoscience, 2013, 27(2): 475-481. (in Chinese)]
- [11] YU Q C, OHNISHI Y, XUE G F, et al. A generalized procedure to identify three-dimensional rock blocks around complex excavations [J]. International Journal for Numerical and Analytical

- Methods in Geomechanics, 2009, 33(3): 355 – 375
- [12] BAECHER G B, LANNEY N A, Einstein H H. Statistical description of rock properties and sampling [C]// The 18th US Symposium on rock mechanics (USRMS), 1977.
- [13] ZHANG L, EINSTEIN H H. Estimating the mean trace length of rock discontinuities [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1998, 31(4): 217 – 235.
- [14] 王晋丽, 陈喜, 黄远洋, 等. 岩体裂隙网络随机生成及连通性研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(2): 30 – 35. [WANG J L, CHEN X, HUANG Y Y, *et al.* A study of stochastic generation and connectivity of fracture network in rock mass [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(2): 30 – 35. (in Chinese)]
- [15] PRIEST S D, HUDSON J A. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18(3): 183 – 197.
- [16] 张弛, 吴剑锋, 陈干, 等. 裂隙网络生成的随机模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 12 – 17. [ZHANG C, WU J F, CHEN G, *et al.* A comparative study of stochastic modeling for generating fracture networks [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(4): 12 – 17. (in Chinese)]
- [17] 周洪福, 宋志, 李富, 等. 鸡公山斜坡岩体裂隙网络模拟及强度参数研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 153 – 158. [ZHOU H F, SONG Z, LI F, *et al.* Research on fracture network simulation and parameters of shear strength of the Jigongshan slope [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3): 153 – 158. (in Chinese)]
- [18] 褚宝增, 王翠香. 概率统计[M]. 北京: 北京大学出版社, 2010. [CHU B Z, WANG C X. Probability statistics[M]. Beijing: Peking University Press, 2010. (in Chinese)]

编辑: 张明霞

(上接第 111 页)

- [12] 孙峰, 孔纪名, 贾超, 等. 地震作用下碎石土滑坡抗滑桩的变形破坏机理[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(7): 77 – 81. [SUN F, KONG J M, JIA C, *et al.* Mechanism of deformation failure of anti-slide piles in debris landslide under earthquake action[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(7): 77 – 81. (in Chinese)]
- [13] 铁道部第二勘测设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983. [Institute of Second Survey and Design of the Ministry of Railways. Design and calculation of anti-sliding pile [J]. Beijing: China Railway Publishing House, 1983. (in Chinese)]
- [14] 王成, 梁波. 新型支挡结构[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2011. [WANG C, LIANG B. New retaining structure[J]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2011. (in Chinese)]
- [15] 宋雅坤, 郑颖人, 雷文杰. 沉埋式抗滑桩机制模型试验数值分析研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊 1): 63 – 68. [SONG Y K, ZHENG Y R, LEI W J. Analysis of the experimental mechanism of deeply buried anti-slide pile by FEM [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (Supl): 63 – 68. (in Chinese)]
- [16] ASHOUR M, ARDALAN H. Analysis of pile stabilized slopes based on soil-pile interaction [J]. Computers & Geotechnics, 2012, 39(1): 85 – 97.
- [17] 李凯玲, 门玉明. 锚索抗滑桩与岩土体相互作用研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(1): 20 – 22. [LI K L, MEN Y M. Study of the interaction among anti-slide pile, anchor and soil body [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(1): 20 – 22. (in Chinese)]

编辑: 张明霞