

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

### 基于非均质系数的裂隙岩体表征单元体研究

王晓明, 杜玉芳, 梁旭黎

### Investigation of the representative elementary volume of fractured rock mass using the homogeneity index

WANG Xiaoming, DU Yufang, and LIANG Xuli

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202007029

### 您可能感兴趣的其他文章

## Articles you may be interested in

## 裂隙延展性统计分布离散性对岩体块体化程度REV的影响

Influence of statistical distribution dispersion in the fracture size on blockiness REV of fractured rock masses 夏露,谢娟,于青春 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 112-118

## 基于相关指标的裂隙岩体渗透系数估算模型研究

A model for estimating hydraulic conductivity of fractured rock mass based on correlation indexes 王玮, 钱家忠, 马雷, 王德健, 马海春, 赵卫东 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 82-89

## 利用电导率测井与压水试验联合评价岩体渗透性的方法

Method of evaluating the permeability of rock mass by the combination of packer test and flowing fluid electrical conductivity log 张必昌, 胡成, 陈刚, 张, 段丹丹 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 62-62

## 尺寸和加载速率对冻结水泥土单轴压缩影响

Effect of size and loading rate on the uniaxial compression characteristics of frozen cement soil 陈鑫, 张泽, 李东庆 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 74-82

## 岩质边坡复合型破坏机制的改进运动单元法研究

Investigation on combined failure mechanism of rock slope based on the improved kinematical element method 张科, 侯杰 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 95-101

## 含孔洞裂隙岩体灌浆后力学特性的物理试验与数值模拟

Experimental and numerical simulation of the mechanical characteristics of rocks containing hole and flaw after grouting 张科, 刘享华, 杨红宣, 范文臣 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 79-79



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202007029

# 基于非均质系数的裂隙岩体表征单元体研究

王晓明<sup>1,2</sup>, 杜玉芳<sup>1</sup>, 梁旭黎<sup>1</sup>

(1.河北地质大学城市地质与工程学院,河北石家庄 050031;2.河北地质大学河北省高校生态环境地质应用技术研发中心,河北石家庄 050031)

摘要:表征单元体(REV)是岩体力学中的一个基础性概念,其存在性是确定岩体等效参数和应用连续介质方法进行研究的前提条件。为综合反映裂隙大小、产状和密度对岩体 REV 的影响,本文提出采用岩体非均质系数 HI 来确定岩体的 REV。首先,详细介绍了非均质系数的概念和含义。利用 General Block 软件建立了中等间距-中等延展性(MS1-MP1)裂隙 的网络模型,并完成 20 次随机实现。从各模型中选取 10 个不同尺寸的岩体模型计算非均质系数,结果表明:非均质系数具 有明显的尺寸效应,当岩体尺寸不小于 8 m 时,非均质系数的平均值和标准差分别为 0.5 和 0.14,综合确定该岩体的 REV 为 8 m。采用 HI 对三峡地下电站厂房围岩的研究表明,该岩体的 REV 为 60 m,可作为非连续介质方法适用性的判断标准。HI 是从岩体结构角度提出的新指标,适用于确定岩体的 REV 和统计范围,对岩体的统计分析和等效参数研究具有重要意义。关键词:裂隙岩体;表征单元体;非均质系数;裂隙网络模型;尺寸效应

中图分类号: TU452 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2021)02-0055-06

## Investigation of the representative elementary volume of fractured rock mass using the homogeneity index

WANG Xiaoming<sup>1,2</sup>, DU Yufang<sup>1</sup>, LIANG Xuli<sup>1</sup>

 (1. School of Urban Geology and Engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China;
 2. Hebei Center for Ecological and Environmental Geology Research, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China)

**Abstract:** Representative elementary volume (REV) is a fundamental concept in rock mechanics and its existence is a prerequisite for estimating the equivalent parameters of rock mass and applying the continuum method to investigating the rock mass. To comprehensively consider the effects of fracture size, orientation and density on the REV of rock mass, the heterogeneity index (*HI*) is presented to estimate the REV. The concept and meaning of *HI* are elaborated and 20 random realizations of fracture network models with moderate spacing and medium persistence are implemented using the General Block software. For each realization, ten rock mass models with different sizes are selected to calculate the *HI*. The results show an obvious size effect of the homogeneity index. The mean value and standard deviation of the homogeneity index are 0.5 and 0.14, respectively, when the size of the rock mass is not less than 8 m, and the REV for the rock mass is determined to 8 m. The investigation of the surrounding rock mass of the underground powerhouse in the Three Gorges using the *HI* shows a REV size of 60 m, which can be used as a criterion for the applicability of the discontinuous method. *HI* is a new index proposed

收稿日期: 2020-07-13; 修订日期: 2020-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41902298);河北省自然科学基金项目(D2019403151);河北省教育厅在读研究生创新能力培养资助项目(CXZZSS2021124);河北地质大学博士科研启动基金项目(1714023)

第一作者: 王晓明(1984-), 男, 高级工程师, 博士, 从事岩体工程地质教学与研究。E-mail: wangxiaoming@hgu.edu.en

通讯作者:梁旭黎(1981-),女,讲师,硕士,主要从事岩石力学教学和研究工作。E-mail: liangxuli@foxmail.com

from the perspective of rock mass structure, which is suitable for determining the REV and statistical range of rock masses. It is of great significance for the statistical analysis and investigation of the equivalent parameters of rock masses.

**Keywords**: fractured rock mass; representative elementary volume; heterogeneity index; fracture network; size effect

表征单元体(representative elementary volume, REV) 是岩体力学中的一个重要概念。对裂隙岩体而言, 表 征单元体的存在是应用连续介质方法对其进行研究 的前提。只有当裂隙岩体的研究尺度大于等于 REV 时, 连续介质方法才适用于岩体的数值分析, 岩体的 等效参数才能表征裂隙岩体的性质。因此, REV 的确 定对研究裂隙岩体具有重要意义。

由于关注的角度不同,许多学者选取不同的参数 来确定裂隙岩体的 REV。王晓明等<sup>[1]</sup>将这些研究参 数归纳总结为结构面及块体几何参数、岩体力学参数 和水力学参数。几何参数包括岩体的块体化程度<sup>[2-3]</sup>、 岩石质量指标 RQD<sup>[4-5]</sup>、体积节理数<sup>[6]</sup>、裂隙连通率<sup>[7-8]</sup> 等;力学参数包括岩体的弹性模量、泊松比、柔度矩 阵及单轴抗压强度等<sup>[9-12]</sup>;水力学参数主要为等效渗 透系数和渗透系数张量<sup>[13-14]</sup>。选取的参数不同,确定 的岩体 REV 尺寸也不相同。裂隙岩体的力学性质和 水力学性质主要取决于岩体中普遍存在的裂隙或结 构面,这些裂隙的大小、方向和密度对岩体的性质起 着控制作用。当岩体的体积达到某一特定值时,裂隙 的这些参数便具有统计学上的代表性, 岩体的等效力 学参数和水力学参数才逐渐趋于稳定,此时对应的岩 体体积即为岩体的 REV。根据裂隙参数确定的几何 REV 是确定力学 REV 的基础<sup>[15]</sup>, 也是建立裂隙网络模型应 满足的最小尺寸。因此,从岩体结构的角度出发,根 据裂隙的大小、产状和密度等特征参数确定岩体的 REV 是十分必要的。

本文旨在根据裂隙多参数(大小、产状、密度)的 尺寸效应确定裂隙岩体的 REV。首先,提出岩体非均 质系数的概念,该指标综合反映了多个裂隙参数的统 计代表性。选取中等间距-中等延展性的裂隙建立 20 个三维裂隙网络模型,从模型中选取不同尺寸的研 究区域分析非均质系数的尺寸效应,进而确定岩体的 REV。

## 1 非均质系数

岩体中裂隙空间的分布和组合形式构成了岩体 结构,是决定岩体工程地质特征和力学性质的关键因 素。对于某一特定的岩体而言,影响其工程性质的主要因素包括裂隙的大小、方向和密度等,正是由于这些参数的随机性和复杂性,岩体表现出显著的非均质性和尺寸效应。裂隙网络模型作为描述岩体结构最重要的手段,通常将裂隙视为有限大小的圆盘,裂隙的大小用圆盘的半径或直径描述,半径的离散程度用标准差衡量。裂隙的产状多服从Fisher分布(式(1)), $\theta$ 和 $\phi$ 分别是当把z轴旋转至裂隙的平均矢量方向后在新坐标系中的倾向和倾角, $\kappa$ 反映了裂隙产状分布的集中程度, $\kappa$ 越大表明同组裂隙的方向越集中。裂隙的三维密度为单位体积岩体内裂隙的数量,反映了岩体中裂隙的密集程度。

$$f(\theta') = \frac{\kappa \sin \theta'}{2\sinh(\kappa)} e^{\kappa \cos \theta'}, 0 \le \theta' \le \pi$$
(1a)

$$f(\phi') = \frac{1}{2\pi}, 0 \le \phi' < 2\pi$$
 (1b)

为了综合反映岩体中裂隙半径、产状和密度的统 计代表性,本文提出了岩体非均质系数(heterogeneity index, HI)的概念,该指标用于评价特定体积岩体的裂 隙参数(大小、产状和密度)是否具有统计意义。只有 当岩体具有统计代表性时,才能进一步确定裂隙岩体 的等效参数。三维裂隙网络模型是计算 HI 的基础, 根据现场实测裂隙的迹长、产状和一维(或二维)密 度,可以推求出实测裂隙的半径和三维密度,基于这 些参数即可建立裂隙网络模型。裂隙网络模型具有 尺寸效应,不同尺寸的模型其统计参数诸如半径均 值、标准差、平均产状、κ和三维密度随着模型体积的 增大而趋于实测值,意味着岩体具有统计代表性。模 型中,模拟裂隙的半径均值、标准差和三维密度可以 根据每组裂隙的数量和半径通过统计分析确定,本文 重点介绍裂隙产状的均质性计算过程。裂隙产状可 以用裂隙面的法向量表示,实测裂隙的平均法向量为 p,模拟裂隙的平均法向量为 $p^{\circ}$ 。二者方向越接近,则 其夹角越小,夹角正弦值越小,因此可采用夹角正弦 值来反映裂隙产状的均质性。根据向量代数可知, p和p°的夹角余弦值为:

$$\cos(\boldsymbol{p}, \boldsymbol{p}^{c}) = \frac{\boldsymbol{p}^{c} \cdot \boldsymbol{p}}{|\boldsymbol{p}^{c}||\boldsymbol{p}|}$$
(2)

则p和p°的夹角正弦值为:

$$\sin(\boldsymbol{p}, \boldsymbol{p}^{c}) = \sqrt{1 - \left(\frac{\boldsymbol{p}^{c} \cdot \boldsymbol{p}}{|\boldsymbol{p}^{c}||\boldsymbol{p}|}\right)^{2}}$$
(3)

裂隙产状 Fisher 分布的常数 κ 可按下式计算<sup>[16]</sup>:

$$\kappa = \frac{N-1}{N-|\boldsymbol{r}_N|} \tag{4}$$

式中:N——裂隙的数量;

 $r_N$ ——裂隙面的和向量。

综上分析, HI的计算公式如下:

$$HI = \sum_{i=1}^{n} \left[ \left| \frac{\mu_i^c - \mu_i}{\mu_i} \right| + \left| \frac{\sigma_i^c - \sigma_i}{\sigma_i} \right| + \sqrt{1 - \left( \frac{\boldsymbol{p}_i^c \cdot \boldsymbol{p}_i}{|\boldsymbol{p}_i^c| |\boldsymbol{p}_i|} \right)^2} + \left| \frac{\kappa_i^c - \kappa_i}{\kappa_i} \right| + \left| \frac{d_i^c - d_i}{d_i} \right| \right]$$
(5)

式中:n---裂隙组数;

- $\mu_i^{c}$  ——研究区域内第 *i* 组模拟裂隙的半径均值;  $\mu_i$  ——第 *i* 组实测裂隙的半径均值;
- $\sigma_i^{c}$ ——研究区域内第*i*组模拟裂隙半径标准差;  $\sigma_i$ ——第*i*组实测裂隙的半径标准差;
- **p**<sup>°</sup><sub>i</sub>——研究区域内第 i 组模拟裂隙平均产状的 法向量;
- $p_i$ ——第*i*组实测裂隙平均产状的法向量;
- $\kappa_i^{c}$ ——研究区域内第i组模拟裂隙所服从的 Fisher 分布的常量;
- $\kappa_i$ ——第*i*组实测裂隙所服从的Fisher分布的常量;
- $d_i^{\circ}$ ——研究区域内第i组模拟裂隙的三维密度;
- d<sub>i</sub>——第 i 组实测裂隙的三维密度。

**p**和κ的计算可查阅文献 [16], 限于篇幅本文不再 详细介绍。

式(5)中,[]内第一项表示研究区域内模拟裂隙半 径均值的相对误差;第二项表示模拟裂隙半径标准差 的相对误差;第三项为模拟裂隙平均产状与实测裂隙 平均产状夹角的正弦值,反映了模拟裂隙平均产状偏 离实测平均产状的程度;第四项表示模拟裂隙产状Fisher 分布常数κ的相对误差;第五项表示模拟裂隙三维密 度的相对误差。综上可知,非均质系数 HI反映了模 拟裂隙的半径、产状和密度与实测值之间的相对误 差,是一个无量纲参数。HI 越小,表明岩体越接近统 计均质体。

### 2 研究数据和三维裂隙网络模型

### 2.1 研究数据

Xia等<sup>[2]</sup>根据国际岩石力学学会(1978)的岩体裂

隙分级表,构建了77种不同长度D、不同间距C的裂隙网络。本文选取中间的模型即中等间距-中等延展性(MS1-MP1)模型(C=0.4m,D=6.5m)来进行详细研究。用于构建裂隙网络模型的裂隙参数见表1。

表 1 中等间距-中等延展性裂隙网络模型参数表 Table 1 Parameters for generating the discrete fracture network of the MS1-MP1 model

裂隙组号	1	2	3		
半径分布形式	正态分布	正态分布	正态分布		
半径均值/m	3.25	3.25	3.25		
半径标准差/m	0.5	0.5	0.5		
产状分布形式	Fisher分布	Fisher分布	Fisher分布		
平均倾向/(°)	0	90	180		
平均倾角/(°)	0	90	90		
参数κ	20	20	20		
三维密度/(条·m <sup>-3</sup> )	0 075 3	0.075.3	0 075 3		

### 2.2 三维裂隙网络模型

研究采用于青春等<sup>[17-19]</sup> 开发的 General Block(GB) 软件建立三维裂隙网络模型。该软件具有裂隙网络 模拟、一般块体识别和块体稳定性分析等功能,在工 程地质领域得到了广泛应用<sup>[20-22]</sup>。裂隙网络模拟是 根据实测裂隙的特征参数及其分布形式,采用 Monte Carlo 随机模拟方法产生模拟裂隙的过程,模拟裂隙与 实测裂隙的特征参数和分布形式一致。本文假设裂 隙为圆盘状,其中心坐标服从泊松分布,即每个裂隙 中心点坐标是相互独立的,裂隙的数量由其三维密度 确定。用 GB 软件进行三维裂隙网络模拟,只需在界 面输入并保存各组裂隙的参数和分布形式,点击 Fracture Generation 按钮即可完成。由于裂隙的生成具有随机 性,本文对 MS1-MP1 模型进行 20 次随机实现,共生 成20个裂隙网络模型,图1为种子数为8时生成的裂 隙网络模型。模型均为立方体,边长为 20 m,每组裂 隙的数量为602条。软件生成的随机裂隙数据全部保 存在 random fracture xyzabr 文件中,具体包括每条裂 隙的空间坐标、倾向、倾角及半径等数据。利用这些 数据计算每个模型的 HI,得到 HI 的范围为 0.23~0.68。 同时对比模拟的裂隙参数(表 2, HI = 0.68) 与实测值, 两者基本一致,表明本文所建立的裂隙网络模型是可 靠的。

## 3 岩体 REV 的确定

HI具有尺寸效应,当研究区域的体积达到 REV 时 HI 应趋于 0,表明研究区域内裂隙的参数具有统计 学上的代表性。根据 HI 的尺寸效应可以确定岩体的



图 1 中等间距-中等延展性的裂隙网络模型(模型边长 20 m) Fig. 1 3D fracture network of the MS1-MP1 model (model dimensions:20 m)



 
 Table 2
 Parameters for the simulated fractures of the MS1-MP1 rock mass

			-
裂隙组号	1	2	3
半径分布形式	正态分布	正态分布	正态分布
半径均值/m	3.34	3.35	3.37
半径标准差/m	0.56	0.58	0.55
产状分布形式	Fisher分布	Fisher分布	Fisher分布
平均倾向/(°)	341.7	86.7	183.7
平均倾角/(°)	2.2	89.0	87.1
参数κ	20.5	24.0	24.2
三维密度/(条·m <sup>-3</sup> )	0.075 3	0.075 3	0.075 3

REV,该 REV 能够保证岩体的裂隙参数具有良好的代表性,达到 REV 的岩体可看作统计均质性岩体。

为了确定岩体的 REV, 从每一个随机生成的裂隙 网络模型中选取 10级不同尺寸的研究区域计算其 HI。选取的研究区域均为立方体,中心与 20 m裂隙 网络模型中心一致, 尺寸分别为 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 m。根据研究区域内包含的裂隙数量和裂隙 参数,运用公式(5)计算每个研究区域的 HI,结果详见 图 2。计算过程中发现,当研究区域为 2 m 时,包含的 裂隙数量很少甚至为完整岩体,这样便无法计算岩体 的 HI, 因此不再对 2 m的研究区域进行 HI统计分析, 但显然这种尺寸的岩体是非均质的。图 2 反映了 HI 随研究区域尺寸的变化情况, 圆点代表不同模型、 不同尺寸岩体的 HI, 曲线代表 HI 的平均值。可以看 出, HI 表现出显著的尺寸效应,随着尺寸的增大, HI 总体上减小并趋于稳定。当研究区域的尺寸达到 8 m 时, HI 的均值基本稳定在 0.5 上下。

从图 2 也可以看出,当研究区域的尺寸小于 6 m时, HI 的离散性比较大,反映出岩体是非均质的;当岩



体尺寸不小于 8 m 时, HI上下波动很小, 反映出岩体 具有统计意义上的均质性。根据各级岩体的 HI, 计算 得到 HI 的标准差(图 3)。HI 标准差随岩体尺寸的增 大而减小, 当岩体尺寸达到 8 m 时, HI 标准差稳定在 0.14上下。随着岩体尺寸的进一步增大, HI 标准差没 有明显的变化。根据 HI 的平均值和标准差的尺寸效 应, 综合确定中等间距-中等延展性(MS1-MP1)裂隙岩 体的 REV 为 8 m。文献 [2] 根据块体百分比确定的岩 体 REV 为 10 m, 大于由 HI 确定的 REV, 表明获得岩 体的统计均质区是确定岩体等效参数的前提条件。



Fig. 3 Relationship between the standard deviation of *HI* and domain size of the study area

### 4 工程实例验算

三峡水电站是迄今世界上最大的水利枢纽,位于 长江西陵峡中段,坝址所在地位于湖北省宜昌市夷陵 区三斗坪镇,控制流域面积约100×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>。三峡水利 枢纽主要由拦河大坝、电站建筑物、通航建筑物、茅 坪溪防护工程等组成。地下电站位于右岸白岩尖山 体内,主要建筑分为引水系统、主厂房系统、尾水系 统三大部分。其中主厂房洞室为圆拱直墙型,全长 311.3 m,轴线走向223.5°,最大跨度32.6 m,最大高度 87.3 m。厂房围岩为坚硬的花岗岩,岩体完整一较完 整,整体稳定性较好。地下电站厂房洞室的开挖揭露

 $\cdot$  58  $\cdot$ 

了大量裂隙,为研究岩体统计均质区提供了丰富的资料,文献[23]对裂隙进行了统计分析,具体参数见表3。

表 3 三峡地下电站厂房围岩裂隙参数表<sup>[23]</sup> Table 3 Fracture parameters of the surrounding rock mass of the underground powerhouse in the Three Gorges

	•		0
裂隙组号	1	2	3
半径分布形式	对数正态	对数正态	对数正态
半径均值/m	4.48	4.81	5.19
半径标准差/m	2.98	2.81	2.92
产状分布形式	Fisher分布	Fisher分布	Fisher分布
平均倾向/(°)	80.07	261.77	355.76
平均倾角/(°)	40.22	47.52	71.70
参数κ	9.50	7.80	10.19
三维密度/(条·m <sup>-3</sup> )	0.002 834	0.002 626	0.002 775

根据裂隙参数随机生成了 20 个边长为 100 m 的 三维裂隙网络模型,并按照上述方法分别计算不同尺 寸岩体的 HI,结算结果见图 4。可以看出,三峡地下 电站厂房岩体的 HI 同样具有明显的尺寸效应,当岩 体尺寸不小于 60 m 时,其 HI 基本稳定在 0.7。根据 HI 的平均值和标准差综合确定该岩体的 REV 为 60 m, 表明对该岩体进行统计分析的尺寸不应小于 60 m× 60 m×60 m。若研究范围小于该尺寸,应采用非连续 介质方法确定岩体的等效参数。





## 5 结论

(1)本文从岩体结构的角度提出了岩体非均质系数 HI 的概念,该指标为研究区域内模拟裂隙的半径、 产状和密度与实测值之间的相对误差之和,综合反映 了岩体中裂隙半径、产状和密度的统计代表性,可以 作为确定岩体 REV 和裂隙统计区的指标。

(2)对中等间距-中等延展性(MS1-MP1)裂隙岩体的研究表明, HI具有明显的尺寸效应, 根据 HI 的平均值和标准差, 综合确定该岩体的 REV 为 8 m。

(3)采用 HI 对三峡地下电站厂房围岩的尺寸效应 进行了研究,综合确定该岩体的 REV 为 60 m,表明对 该岩体进行统计分析的尺寸不应小于 60 m×60 m×60 m, 否则应采用非连续介质方法进行研究。

(4) HI 综合考虑了裂隙半径、产状和密度等多个 参数的统计代表性,不仅可以作为确定岩体 REV 的指标,还能用于衡量同一地区不同岩体的均质程度。目前该指标尚未考虑裂隙张开度、粗糙度等裂隙参数, 相关内容还有待进一步研究。

### 参考文献(References):

- [1] 王晓明,郑银河. 裂隙岩体表征单元体及尺寸效应研究进展[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3456 3464.
  [WANG Xiaoming, ZHENG Yinhe. Review of advances in investigation of representative elementary volume and scale effect of fractured rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(12): 3456 3464. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 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.
- [3] 夏露,谢娟,于青春.裂隙延展性统计分布离散性对岩体块体化程度REV的影响[J].水文地质工程地质,2019,46(4):112 118. [XIA Lu, XIE Juan, YU Qingchun. Influence of statistical distribution dispersion in the fracture size on blockiness REV of fractured rock masses[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019,46(4):112 118. (in Chinese with English abstract)]
- ZHANG W, CHEN J P, CAO Z X, et al. Size effect of RQD and generalized representative volume elements: a case study on an underground excavation in Baihetan dam, Southwest China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 35: 89 – 98.
- [5] 张文,陈剑平,苑晓青,等.基于三维裂隙网络的 RQD尺寸效应与空间效应的研究[J].岩石力学与工 程学报,2012,31(7):1437-1445. [ZHANG Wen, CHEN Jianping, YUAN Xaoqing, et al. Study of size effect and spatial effect of RQD for rock masses based on three-dimensional fracture network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1437-1445. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 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 Yuhua, WANG Qing. Analysis of representative element volume size based on 3D fracture network[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12):3775-3780. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 王晓明,夏露,郑银河,等.基于三维裂隙连通率的裂

隙岩体表征单元体研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 3297 - 3302. [WANG Xaoming, XIA Lu, ZHENG Yinhe, et al. Study of representative elementary volume for fractured rock mass based on threedimensional fracture connectivity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup 2): 3297-3302. (in Chinese with English abstract)]

- SONG S Y, SUN F Y, CHEN J P, et al. Determination of RVE size based on the 3D fracture persistence[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2017, 50(1): 60 - 68.
- [9] KHANI A, BAGHBANAN A, HASHEMOLHOSSEINI H. Numerical investigation of the effect of fracture intensity on deformability and REV of fractured rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 63: 104 – 112.
- [10] YANG J P, CHEN W Z, DAI Y H, et al. Numerical determination of elastic compliance tensor of fractured rock masses by finite element modeling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 70: 474 – 482.
- [11] LAGHAEI M, BAGHBANAN A, HASHEMOLHOSS-EINI H, et al. Numerical determination of deformability and strength of 3D fractured rock mass[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 110: 246 – 256.
- [12] CUI Z, ZHANG Y H, SHENG Q, et al. Investigating the scale effect of rock mass in the Yangfanggou hydropower plant with the discrete fracture network engineering approach[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(4): 04020033.
- [13] 张莉丽,张辛,王云,等.非常低延展性裂隙岩体 REV存在性研究[J].水文地质工程地质,2011, 38(5):20-25. [ZHANG Lili, ZHANG Xin, WANG Yun, et al. Determining of the REV for fracture rock mass of very low ductility[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(5):20-25. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 牛玉龙,王媛,于可,等.裂隙网络非达西渗流REV及 非达西系数张量研究[J].水利学报,2020,51(4): 468-478. [NIU Yulong, WANG Yuan, YU Ke, et al. Non-Darcy seepage REV and non-Darcy coefficient tensor in fracture network[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(4): 468 - 478. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 陈庆发,郑文师,牛文静,等.裂隙岩体几何与力学尺 寸效应的关联性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊1): 2857 - 2870. [CHEN Qingfa, ZHENG Wenshi, NIU Wenjing, et al. Correlation of the

geometrical and mechanical size effects of fractured rock masses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(Sup 1): 2857 - 2870. (in Chinese with English abstract) ]

- [16] 郑俊,邓建辉,魏进兵.不连续面产状Fisher分布拟合度检验方法的改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1561 1568. [ZHENG Jun, DENG Jianhui, WEI Jinbing. An improved method of goodness-of-fit test for fisher distribution to discontinuity orientations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8): 1561 1568. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 于青春,陈德基,薛果夫,等. 裂隙岩体一般块体理论 初步[J].水文地质工程地质,2005,32(6):42-48.
  [YU Qingchun, CHEN Deji, XUE Guofu, et al. Preliminary study on general block method of fractured rock mass[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005,32(6):42-48. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 于青春,薛果夫,陈德基.裂隙岩体一般块体理论[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007. [YU Qingchun, XUE Guofu, CHEN Deji. General block theory of fractured rock mass [M]. Beijing: China Water Power Press, 2007.(in Chinese)]
- [19] YU Q, OHNISHI Y, XUE G, 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.
- [20] 王晓明. 乌东德坝区岩体裂隙及块体研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013. [WANG Xaoming. Study on rock fractures and rock blocks in Wudongde dam area[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.(in Chinese with English abstract)]
- [21] 陈庆发, 牛文静, 郑文师, 等. 裂隙岩体块体化程度评价方法的若干问题修正[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3727 - 3734. [CHEN Qingfa, NIU Wenjing, ZHENG Wenshi, et al. Correction of the problems of blockiness evaluation method for fractured rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(10): 3727 - 3734. (in Chinese with English abstract)]
- [22] ZHANG L, SHERIZADEH T, ZHANG Y W, et al. Stability analysis of three-dimensional rock blocks based on general block method[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 124: 103621.
- [23] 夏露. 三峡工程地下电站厂房岩石块体研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011. [XIA Lu. Rock blocks in the rock around the underground powerhouse of Three Gorges project[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011.(in Chinese with English abstract)]

第2期

编辑:张明霞