

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0253

裂隙岩体等效力学参数结构效应的 计算机模拟试验研究

崔臻^{1,2}, 盛谦^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 为研究裂隙岩体结构效应对其等效力学参数的影响, 引入基于离散元的合成岩体技术, 通过可控的改变三维岩体结构网络中的结构参数, 制作相应的合成岩体试件, 开展计算机模拟试验研究。结果表明: 随岩体中裂隙体积密度增大, 裂隙的变形参数和强度参数随裂隙密度增加而减少, 其中等效弹性模量对结构面密度变化最为敏感; 随岩体中裂隙倾角增加, 岩体等效弹性模量随之单调增加, 且等效弹性模量的离散程度(标准差)随倾角增加而减小, 而各强度参数指标则先减少而后增加, 形成一个 U 形变化规律; 岩体等效力学参数均随结构面尺寸增加而减小, 同时等效力学参数的离散程度(标准差)随结构面直径增加而增加, 其中单轴抗压强度指标变化最为敏感; 岩体等效力学参数对裂隙尺寸和产状的离散程度不敏感。该研究结论可为其他结构效应研究提供一种新思路。

关键词: 裂隙岩体; 计算机模拟试验; 合成岩体技术; 结构效应; 等效力学参数

中图分类号: TU 17

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)10-3830-11

Numerical modelling of structural effect of equivalent mechanical parameters of fractured rock mass

CUI Zhen^{1,2}, SHENG Qian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract: The structural effect of fractured rock mass on equivalent mechanical parameters is studied by introducing a new synthetic rock mass technique based on the discrete element method (DEM). Through the controllable change of structural parameters in the three-dimensional (3D) rock mass structure network, the corresponding synthetic rock specimens are produced, and numerical simulations are carried out. The results indicate that equivalent mechanical parameters decrease with the increase of fracture density. Particularly, the equivalent elastic modulus is the most sensitive to the change of fracture density. With increasing the fracture dip angle, the equivalent elastic modulus increases and its standard deviation decreases. While strength parameters decrease first and then increase to form a U shape with increasing the dip angle. The equivalent mechanical parameters decrease with the increase of fracture size. Meanwhile, their standard deviations increase with the increase of the fracture diameter, and especially the uniaxial compressive strength is the most sensitive index. Moreover, the dispersions of the fracture size and dip angle have little influence on the equivalent mechanical parameters. This study can provide certain references for studying the structural effect of the fractured rock mass on equivalent mechanical parameters.

Keywords: fractured rock mass; computer simulation; synthetic rock mass technique; structural effect; equivalent mechanical parameters

1 引言

目前我国正处于岩土工程发展的高峰时期, 众多大型水利工程以及大江大河梯级开发项目不断立

项动工, 深部特长隧洞工程纷纷涌现, 能源、废弃物和核废料深部地质储藏(处置)的研究工作相继展开, 给国内岩土工程学科的发展带来了巨大的机遇与挑战。

收稿日期: 2017-03-30

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2016YFC0401803); 国家自然科学基金资助项目(No. 51779253, No. 41672319); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(No. 2015CB057905); 湖北省自然科学基金(No. 2017CFB725)。

This work was supported by the National Key R & D Program of China (2016YFC0401803), the National Natural Science Foundation of China (51779253, 41672319), the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2015CB057905) and the Hubei Natural Science Foundation (2017CFB725).

第一作者简介: 崔臻, 男, 1986年生, 博士(后), 副研究员, 主要从事岩土工程静动力稳定性评价方面的研究工作。E-mail: zcui@whrsm.ac.cn

通讯作者: 盛谦, 男, 1962年生, 博士, 研究员, 从事工程岩体力学性质与稳定性评价、地质灾害防治等方面的研究工作。E-mail: qsheng@whrsm.ac.cn

而这些工程项目大多处于岩体之中，并且以性质复杂的裂隙岩体居多。裂隙岩体中普遍发育的岩体结构的分布、组合规律将直接控制这些重大工程的稳定性及可能发生的破坏模式^[1-2]。合理确定岩体结构对岩体力学特性的影响，是进行工程设计、变形计算、稳定性评价等环节的前提和保证。

应用数值分析方法研究岩体力学参数的结构效应是一个重要的研究方向。研究工作开展早期，盛谦等^[3-4]在地质调查的基础上，对三峡工程船闸区典型地段的岩体进行了计算机模拟试验，研究了裂隙对宏观力学参数的影响以及宏观力学参数的结构效应。Min 等^[5]采用离散单元法研究了裂隙岩体力学参数的结构效应。Sitharam 等^[6]引入节理因子，用有限元方法得到了等效模型；Mahous 等^[7]用代表体元方法，根据能量均匀化技术分析了单向裂隙非线性性质和双向正交裂隙的相互作用。赵吉东等^[8]建立基于等效柔度张量及特定破坏准则等效体力学参数预测的方法，对裂隙岩体的等效力学参数进行了计算机模拟和预测。随后，可以考虑岩体结构非连续性的方法被陆续引入等效力学参数结构的研究中，崔臻等^[9]二维节理网络有限元方法模拟了柱状节理岩体，分析了柱状节理等效弹性模量的结构效应。相比于解析公式及经验方法来说，数值分析方法具有可以模拟任意形状及分布特征的结构面的能力。宁宇等^[10]将 Voronoi 方法引入到 3DEC 中研究了柱状节理岩体力学参数的结构效应；晏长根等^[11]在 FLAC 中实现了随机节理岩体的模拟，对其变形与强度参数的结构效应进行了研究。

本文旨在将一种基于离散元的三维合成岩体技术引入裂隙岩体等效力学参数的结构效应研究中。通过可控的改变三维岩体结构网络中的结构参数，制作相应的合成岩体试件，不对岩体结构进行简化或等效假设，直接开展计算机模拟力学试验，研究裂隙密度、产状等结构参数对裂隙岩体等效力学参数的影响。

2 基于离散元的三维合成岩体技术

2.1 SRM 技术概述

所谓合成岩体技术(synthetic rock mass, SRM)，是一种基于裂隙网络的离散元数值计算模型。基于三维裂隙网络技术，将三维裂隙网络模型嵌入到岩石基质模型，构建能充分反映实际裂隙空间分布特征并考虑基质力学效应的合成岩体模型，并在此基础上分析岩体的各种力学行为。在过去的一段时间中，基于颗粒流方法（可视作常规离散元法之外的

另一种方法）的合成岩体技术应用报道较多^[12-14]。也有一些合成岩体方法中基于常规离散元方法采用计算中相对较为方便处理的全贯通或四边形非贯通裂隙模型^[15]，但尚未见到基于常规离散元方法的三维圆盘非贯通裂隙成果报告。

离散元方法从原理上注定了其仅能考虑凸多边形/凸多面体问题。具体到应用中时，表现为仅能考虑贯通裂隙问题，缺乏对非贯通裂隙的处理能力。因此，一般认为离散元方法无法对圆盘型裂隙开展力学计算。

但随着计算机技术的发展及程序执行效率的提高，我们可以采用一些替代方法，实现利用常规离散元对圆盘裂隙进行计算。其具体原理为：针对某一个裂隙圆盘，首先根据其产状切穿整个模型；然后对切割完毕的块体划分网格，在整个切割面上形成接触单元；最终，根据圆盘直径，分别对圆盘范围内外的接触单元重新赋值，对圆盘范围外的接触单元力学参数赋一个大值，形成事实上不可破坏、不可滑动、不可分离的“虚拟裂隙”^[16-17]，对余下圆盘范围内的接触单元赋正常材料参数值，形成事实上的圆盘裂隙面，如图 1 所示。根据大量的计算经验，在圆盘外部结构面的力学参数大于内部的 10 倍以上时，即可取得较好的结果。

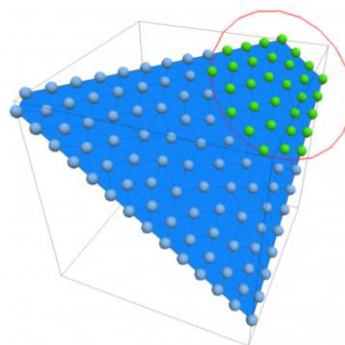


图 1 基于离散元的圆盘裂隙面计算原理
Fig.1 Calculation principle for disk shape joints by discrete element method

按照上述策略加工后的离散元块体模型示意图如图 2 所示。注意图中的正交切割的裂隙为辅助性的虚拟裂隙，可以减少整个离散元模型中的裂隙长度，以达到减少计算量的目的。

离散元模型中的裂隙圆盘实现情况可以利用裂隙的属性特性得以展示。如图 3 通过裂隙黏聚力云图的形式给出了裂隙圆盘实现效果。

对裂隙圆盘的这种处理方式势必受到接触面上划分的单元尺寸的影响。图 4 给出了针对一个直径

为 50 m 的圆盘,在不同的接触单元尺寸的条件下的实现效果。其中,圆盘内部的真实裂隙面法向刚度为 2 GPa,而圆盘外部虚裂隙的刚度为大值 30 GPa。可见,当网格尺寸不小于圆盘直径的 1/10 时,这种处理方式可以保证三维裂隙网络中的圆盘型裂隙在数值模拟中得到较为真实的体现。

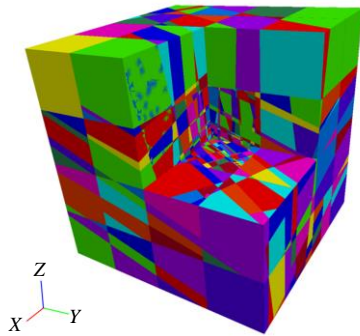


图 2 嵌入三维随机结构面网络之后的离散元块体示意图
Fig.2 Discrete element blocks after cutting with 3D fracture system

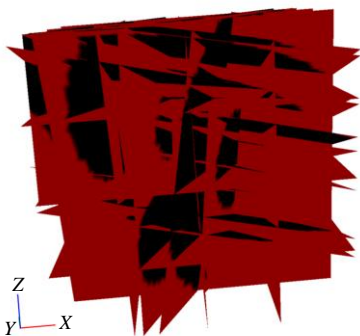


图 3 裂隙圆盘实现效果
Fig.3 Contour disk shape joints

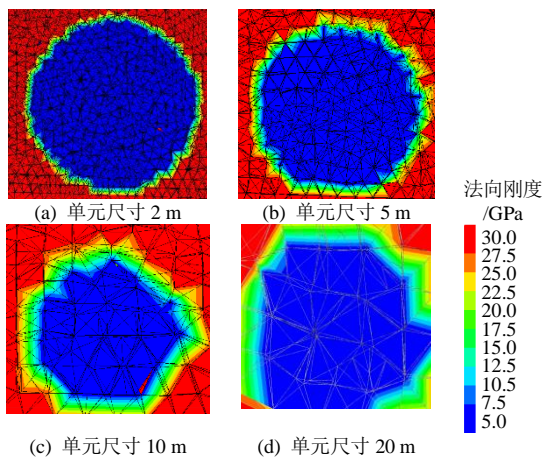


图 4 不同单元尺寸下圆盘节理的实现效果
Fig.4 Contours of disk shape joints with different discrete intensities

2.2 计算机模拟试验及等效岩体力学参数确定方法

当采用三维离散元方法模拟试件的力学试验

时,首先在岩体试样的 3 个面上施加相同的压力,模拟围压 σ_3 ,求解至平衡,而后开始轴向压缩。对于轴向压缩方式,有应力加载(柔性加载)及位移加载(刚性加载)两种方式,已有文献多采用力加载方式^[18],但有研究成果对此提出意见^[19],认为位移加载形式更好:

(1) 在真实岩石力学试验过程中,法向加载一般是由钢垫板施加的,钢材的弹性模量在 200 GPa 左右,远大于岩石材料和岩体,可近似认为加载面位移是相同的,故采用位移加载模式与实际岩石力学试验加载方式是相同的。

(2) 对于含有软弱部分的试样,如果采用应力加载模式,会在软弱部分区域形成明显的压缩凹陷区,在岩石力学试验中,除了侧向采用液体压力加载可以达到这种效果外,承压板加载不会对软弱夹层区域造成过大的压缩。

(3) 当使用应力加载模式时,对于含有软弱部分的试样,在加载面产生的变形并不唯一,会导致在计算应变变量值时,面临如何合理选取加载面位移值的难题。

在以上认识的基础上,本文的三维离散元数值模拟中采用位移加载方式,模拟刚性加载。为了保证加载中数值计算的稳定性,加载速率取为一个很小的 10^{-8} m/每循环步。

对于各加载面的荷载求取,因此,采用编制 FISH 函数,历遍加载面所有单元,求取其竖向应力平均值的方式,取得加载面的应力荷载量值。持续加载试件直至破坏(到达峰值荷载),根据求得的各面应力及位移值求得当前试件的等效弹性模量、泊松比以及该围压等级下的峰值荷载。然后,修改围压条件,重复上述计算过程,可以获得另一个围压条件下的峰值荷载,结合多个围压条件下的峰值荷载,可以根据 $\sigma_1 - \sigma_3$ 法或 $p-q$ 法^[20]确定试件的 M-C 强度参数 c 和 φ 。

2.3 基于 SRM 技术获取岩体等效力学参数实例

为对基于三维离散元合成岩体技术获取岩体等效力学参数的方法进行详细说明,选取一个基础性算例进行演示说明。

算例为单组随机分布的结构面网络,裂隙体积密度为 $P_{30} = 0.01 \text{ m}^{-3}$ 。为了更明显地体现出各向异性特征,裂隙倾角均值为 30° ,服从 Fisher 分布, Fisher 分布常数 k 为中值 30,由于倾向对 E_2 无影响,因此,取为 0° 。为了简化起见,此处选取参数较少的正态分布表达裂隙迹长的离散程度,裂隙迹长离散程度即由标准差 σ 表征。正态分布概率密度函数

的定义域本为 $[\infty, -\infty]$ ，但有大于 99%的数据位于均值 $\pm 3\sigma$ 的范围内，在此以 3σ 区间作为迹长分布的上、下限。本例中迹长均值设为 5 m，标准差 $\sigma=1$ m， 3σ 分布区间为 $[2, 8]$ m。

根据以上分布参数得到的算例模型如图 5 所示。

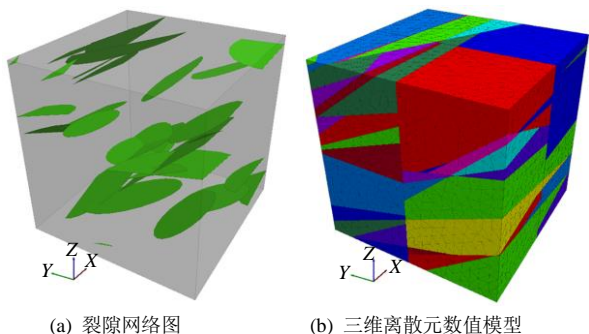


图 5 算例 1 的三维离散元数值模型
Fig.5 DEM model of the example case 1

其中，在进行数值模拟时，考虑的岩块及裂隙面的力学参数如表 1 所示。其中为简化问题起见，岩石基质与裂隙面的强度准则均采用理想弹塑性准则，暂不考虑峰后特性。

表 1 算例 1 的岩块及裂隙面力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock matrix and fracture of example case 1

裂隙岩体	E /GPa	μ	k_n /(GPa/m)	k_s /(GPa/m)	c /MPa	φ /($^\circ$)	f_t /MPa
岩石基质	20	0.20	/	/	1.00	40	0.5
裂隙面	/	/	10	5	0.15	20	0.1

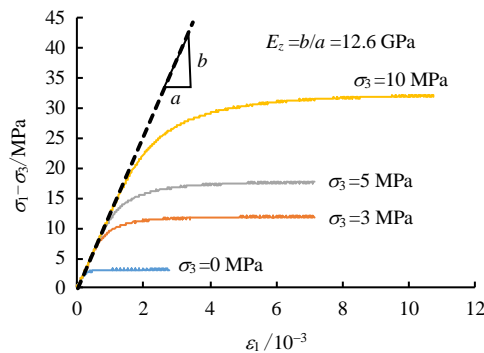
注： E 为岩石的弹性模量； μ 为岩石的泊松比； k_n 为结构面的法向刚度； k_s 为结构面的切向刚度； c 为岩石或结构面的黏聚力； φ 为岩石或结构面的摩擦角； f_t 为岩石或结构面的抗拉强度。

上文所述的计算机模拟力学试验方法对算例合成岩体进行三轴压缩加载试验，分别进行围压为 0、3、5、10 MPa 的加载试验，根据轴向应力-应变曲线获得合成岩体的等效弹性模量，见图 5(a)；得到各次试验应力-应变曲线后，根据不同围压下的峰值强度采用 $\sigma_1 - \sigma_3$ 法计算等效黏聚力和等效内摩擦角，见图 5(b)。当考虑岩石基质与裂隙面的峰后强度特性时，可以用类似方式求得合成岩体的等效残余强度参数。

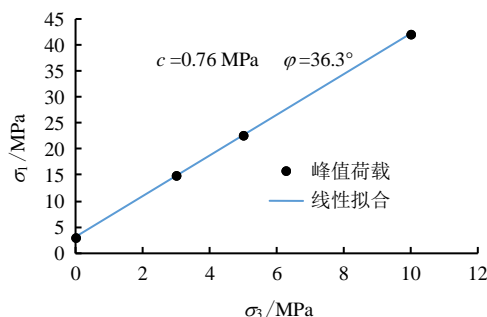
2.4 SRM 技术正确性检验

以上对基于离散元的三维合成岩体作为一项新方法进行了说明，下面将简要对本技术的正确性进行检验。由于裂隙岩体的随机性，导致在理论层面上对其讨论相对较为困难，鉴于此，这里选择最简

单的裂隙岩体形式——规则贯通裂隙岩体进行讨论。首先介绍其理论解，随后采用基于离散元的合成岩体技术进行计算，对比两者差异，借以说明基于离散元的合成岩体的正确性。



(a) 不同围压下数值试验成果



(b) 试验成果回归

图 6 等效岩体力学参数的获取

Fig.6 Calculation of equivalent mechanical parameters of rock mass

2.4.1 变形参数

文献[21]给出了多组贯穿裂隙岩体的正交各向异性弹性参数计算方法，其某个方向上（如竖直 z 向）的弹性模量为

$$\frac{1}{E_z} = \frac{\epsilon_{zz}}{\sigma_z} = \frac{1}{E} + \sum_{i=1}^N \left[\frac{\cos^2 \lambda_i}{s_i} \left(\frac{\cos^2 \lambda_i}{k_{ni}} + \frac{\sin^2 \lambda_i}{k_{si}} \right) \right] \quad (1)$$

式中： E_z 为竖直 z 向岩体的等效弹性模量； $\lambda_i \in [0, \pi]$ ，为各组结构面法向 z 轴的夹角； s_i 为各组结构面的间距； k_{ni} 和 k_{si} 分别为各组结构面的法向、切向刚度； E 为岩石基质的模量。

对于 3 组正交裂隙的更特殊情况，考虑表 2 中各计算方案进行验证。

将文献[5]中的 E_z/E 展示图拓展至三维，来表示岩体受不同产状的裂隙切割后的 E_z ，如图 7 中的曲面所示。其中，图中的方位以裂隙组 1 平面的法向量的产状所代表。

按照上述参数建立含三组裂隙的正交裂隙合成岩体模型，如图 8 所示，进行单轴压缩试验以计算

其等效弹性模量，验证结果如图7中的蓝点所示，显示验证效果良好。

表2 算例2 裂隙岩体中岩石与裂隙力学参数
Table 2 Mechanical parameters of rock matrix and fracture of example case 2

裂隙岩体	E /GPa	μ	间距 /m	k_n /(GPa/m)	k_s /(GPa/m)
岩石	50	0.25	/	/	/
裂隙组1	/	/	1	方案 A:50 方案 B:75	方案 A1: 25.0, 方案 A2: 100.0 方案 B1: 37.5, 方案 B2: 150.0
裂隙组2	/	/	1	方案 A:50 方案 B:50	方案 A1: 25.0, 方案 A2: 100.0 方案 B1: 25.0, 方案 B2: 100.0
裂隙组3	/	/	1	方案 A:50 方案 B:25	方案 A1: 25.0, 方案 A2: 100.0 方案 B1: 12.5, 方案 B2: 50.0

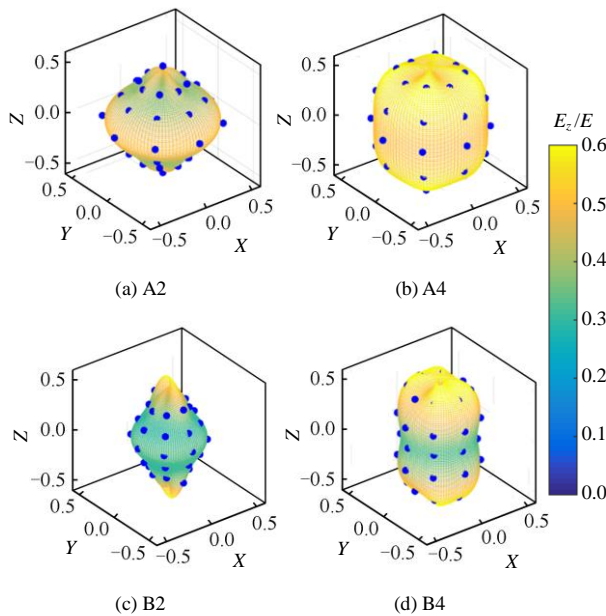


图7 基于离散元的合成岩体技术变形参数验证成果
Fig.7 Verification of the deformation parameter of synthetic rock mass based on discrete element method

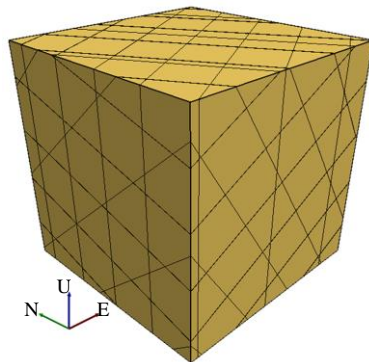


图8 含有3组正交裂隙的离散元模型
Fig.8 Discrete element model with three joint sets

2.4.2 强度参数

对于更加理想化的单组规则贯通裂隙岩体，(Jaeger 等^[22]给出了一种计算不同结构面与加载方向

夹角下单轴抗压强度 s 的计算方法，一般称之为 Jaeger 单弱面理论解。

对于岩石基质有单轴抗压强度 s_m 为

$$s_m = \frac{2c_m \cos \varphi_m}{1 - \sin \varphi_m} \quad (2)$$

式中： c_m 和 φ_m 分别为岩石基质的黏聚力和摩擦角。

对于法向与加载方向呈夹角 λ 的单组裂隙面的单轴抗压强度 s_j 为

$$s_j = \frac{2c_j}{(1 - \cot \lambda \tan \varphi_j) \sin 2\lambda} \quad (3)$$

式中： c_j 和 φ_j 分别为裂隙面的黏聚力和摩擦角。

而裂隙岩体的单轴抗压强度为

$$s = \min(s_m, s_j) \quad (4)$$

当考虑岩石基质的黏聚力和摩擦角分别为 7 MPa 和 42°，裂隙间距为 5 mm，裂隙面黏聚力和摩擦角分别为 8 MPa 和 20°时，有基于 Jaeger 单弱面理论解的裂隙岩体试件的等效抗压强度，如图 9 中虚线所示。

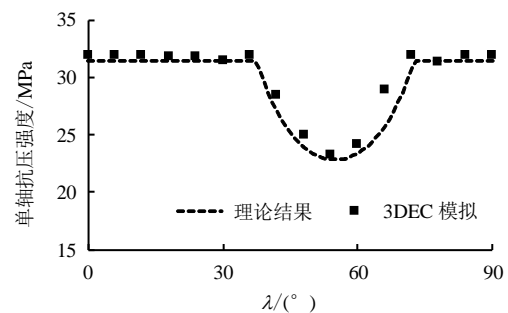


图9 基于离散元的合成岩体技术强度参数验证成果
Fig.9 Verification of strength parameter of synthetic rock mass based on discrete element method

按照上述参数建立含一组裂隙的合成岩体模型，如图 10 所示，进行单轴压缩试验以计算其等效单轴抗压强度，验证结果如图 9 中的黑点所示，显示基于合成岩体方法的数值试验结果与 Jaeger 单弱面理论解吻合良好。对岩体的等效强度计算可以取得较为精确的模拟结果。



图10 含有一组贯通裂隙的离散元模型
Fig.10 Discrete element model with one penetrated joint set

3 裂隙岩体等效力学参数的结构效应

3.1 裂隙岩体结构效应的表征参数

大量的统计资料表明，结构面网络的表征参数服从一定的分布规律。人工模拟生成结构面网络时，对这些表征参数分布规律的变化对裂隙岩体等效力学参数的影响进行考虑，认为代表了结构面网络表征参数的影响。

本文基于单组随机分布的结构面网络，采用随机裂隙密度、随机裂隙倾角角度、随机裂隙倾角离散程度、随机裂隙尺寸、随机裂隙尺寸离散程度 5 方面讨论结构面网络标准参数的影响。

对于结构效应的表征参数分布范围，雅砻江杨房沟水电站坝址区岩体为研究背景，根据结构面调查成果^[23]，平均裂隙体积密度为 $0.005 \sim 0.01 \text{ m}^{-3}$ ，裂隙平均倾角为 $40^\circ \sim 80^\circ$ ，裂隙平均直径不大于 $5 \sim 6 \text{ m}$ 。以此为基本依据，适当考虑参数变化范围，进行参数的影响性分析。

由于一组结构面网络的表征参数在重构过程中可以生成无数个与之相对应的裂隙网络模型。虽然这些结构面网络的统计学意义是一致的，但不同的裂隙网络图形成的裂隙岩体表现出的力学性质必然是随机的、不相同的。不能将任一裂隙网络图反映的计算结果，看成具有相应裂隙统计规律岩体的确定性结果。裂隙岩体的力学性质应该是多个裂隙网络模型所计算的力学性质的平均。计算中，每种计算方案生成 10 种随机裂隙网络样本，取样本计算结果的平均值作为该随机分布下裂隙岩体的结果。

3.2 随机裂隙密度的影响

为研究结构面密度变化对合成岩体等效力学参数的影响，取裂隙密度为 0.005 、 0.0075 、 0.01 、 0.015 、 0.02 m^{-3} ，对于每级结构面密度取 10 个样本，计算得到的等效力学参数平均值作为该级结构面产状下的代表值。裂隙倾角均值为 45° ，服从 Fisher 分布，Fisher 分布常数 k 为中值 30，由于倾向无影响，因此，取为 0° 。本例中迹长均值设为 5 m ，标准差 $\sigma = 1 \text{ m}$ ， 3σ 分布区间为 $[2, 8] \text{ m}$ 。其他条件如 2.3 节中算例。

图 11 为结构面密度分别为 $P_{30} = 0.005$ 、 0.015 m^{-3} 的 2 个结构面网络模型示意图。图 12 给出了根据计算机模拟试验获取的合成岩体的各种等效岩体力学参数与裂隙密度的关系，其中蓝色点线的结果为 10 组模拟结果的平均值，I 字为 10 组模拟结果的标准差。结构面密度 P_{30} 在 $0.005 \sim 0.02 \text{ m}^{-3}$ 范围内变化时，各类岩体等效参数随结构面密度增加而减小，

且减小趋势在结构面密度较大时最为明显。

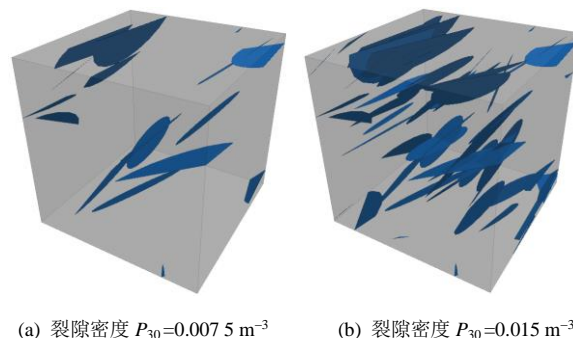


图 11 不同结构面密度的数值模拟试件样本示意图
Fig.11 Examples of numerical specimens with different fracture densities

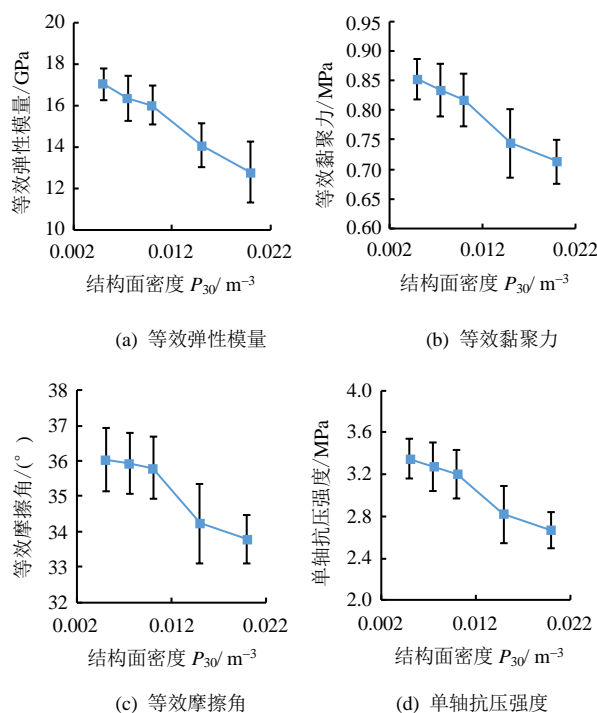


图 12 岩体力学参数与裂隙密度的关系

Fig.12 Relationships between mechanical parameters of rock mass and fracture density

为对这一变化趋势较为精确地讨论，图 13 给出了对岩体力学参数与结构面密度的敏感性分析结果，敏感性分析中，以结构面体积密度 $P_{30} = 0.01 \text{ m}^{-3}$ 的结果作为基准结果。敏感性分析结果表明，岩体力学指标与结构面密度指标的敏感性关系近似线性正相关，非线性相关特性不明显。等效弹性模量对结构面密度变化最为敏感，当结构面密度 P_{30} 变化 100% 时，等效弹性模量变化可达 20%。等效摩擦角指标对结构面密度变化最不敏感，当结构密度指标变化 100% 时，等效摩擦角指标仅变化不到 6%。

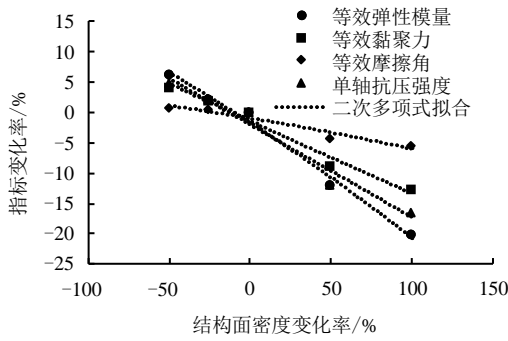


图 13 岩体力学参数对裂隙密度敏感性分析
Fig.13 Sensitivity analysis of mechanical parameters of rock mass to fracture density

3.3 随机裂隙产状的影响

研究当裂隙产状（此处仅表现为倾角）变化对合成岩体等效力学参数的影响，为了减小倾角离散程度对结果可能的影响，此处 Fisher 常数取为高值 50，取裂隙倾角均值分别为 0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°。对于每级裂隙倾角取 10 个样本，计算得到的等效力学参数平均值作为该级结构面产状下的代表值。裂隙迹长服从正态分布，迹长均值为 5 m，标准差 $\sigma=1$ m， 3σ 分布区间为[2,8] m。裂隙密度取为中值 $P_{30}=0.01\text{ m}^{-3}$ 。

图 14 为结构面倾角分别为 30°和 60°的 2 个结构面网络模型示意图。

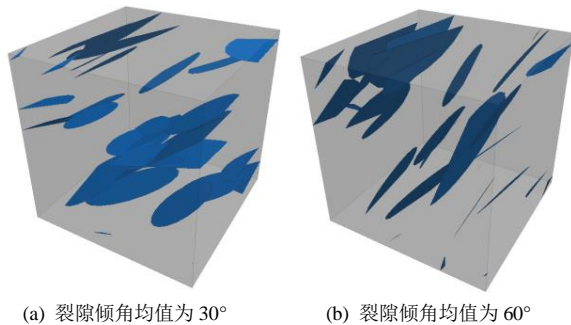


图 14 不同结构面倾角的数值模拟试件样本示意图
Fig.14 Examples of numerical specimens with different fracture dip angles

图 15 给出了根据计算机模拟试验获取的合成岩体的各种等效岩体力学参数与裂隙平均倾角的关系，其中蓝色点线的结果为 10 组模拟结果的平均值，I 字为 10 组模拟结果的标准差。可见在结构面倾角在 0°~90°范围内变化时，岩体等效弹性模量随之单调增加，且等效弹性模量的离散程度（标准差）随倾角增加而减小。而结构面倾角在 0°~90°范围内变化时，等效黏聚力、等效摩擦角、单轴抗压强度指标随倾角增加先减少而后增加，形成一个

U 形变化规律，而各指标的离散程度也首先增加，而后减小。

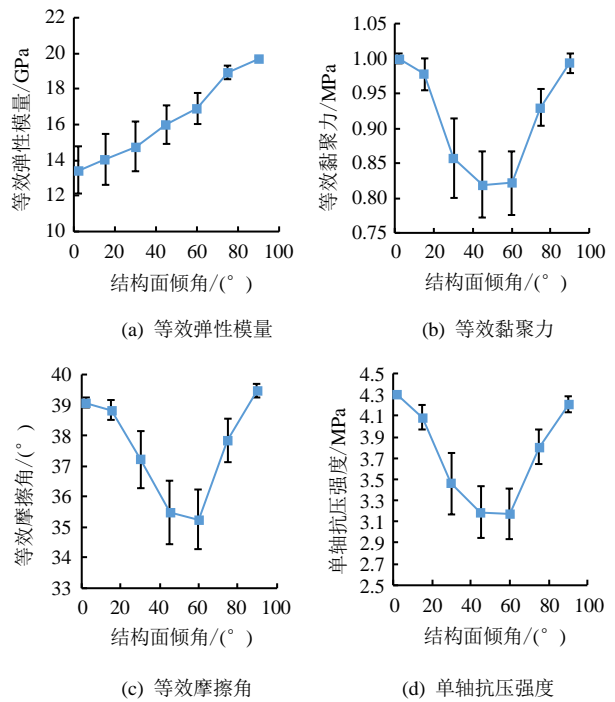


图 15 岩体力学参数与裂隙倾角的关系
Fig.15 Relationships between mechanical parameters of rock mass and fracture dip angle

为对变化趋势较为精确地讨论，图 16 给出了对岩体力学参数与结构面倾角的敏感性分析结果，敏感性分析中，以结构面倾角 45°的结果作为基准结果。敏感性分析结果表明，岩体等效弹性模量与结构面倾角呈非线性正相关关系，当结构面倾角在 -100°~100°范围内变化时，等效弹性模量变化范围为 -16%~23%。而其他指标随倾角变化程度增加而增加，单轴抗压强度指标变化最为敏感，当结构面倾角变化范围为 $\pm 100\%$ 时，单轴抗压强度变化可达 35%。

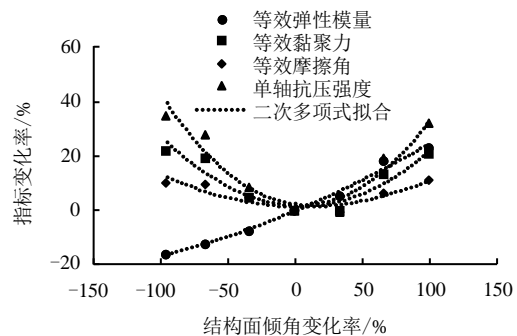


图 16 岩体力学参数对裂隙倾角敏感性分析
Fig.16 Sensitivity analysis of mechanical parameters of rock mass to fracture dip angle

3.4 随机裂隙产状离散程度的影响

研究当结构面产状（此处仅表现为倾角）变化对合成岩体等效力学参数的影响，分别取 Fisher 常数为 10、20、30、40、50，对每级 Fisher 常数取 10 个样本，计算得到的等效力学参数平均值作为该级结构面产状下的代表值。裂隙倾角均值为中值 45°。裂隙迹长服从正态分布，迹长均值为 5 m，标准差 $\sigma=1$ m， 3σ 分布区间为[2,8] m。裂隙密度取为中值 $P_{30}=0.01\text{ m}^{-3}$ 。

图 17 为 Fisher 常数分别为 20 和 40 的 2 个结构面网络模型示意图。

图 18 给出了根据计算机模拟试验获取的合成岩体的各种等效岩体力学参数与裂隙倾角离散程度（Fisher 常数 k ）的关系，其中蓝色点线的结果为 10

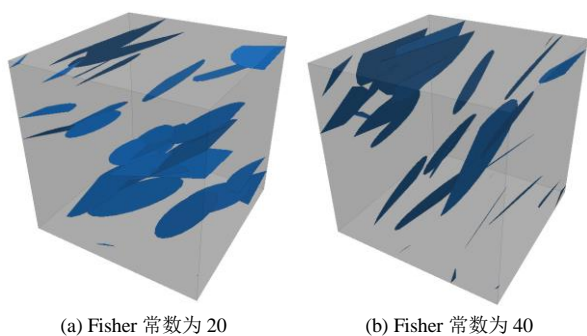


图 17 不同裂隙倾角离散程度的数值试件样本示意图
Fig.17 Examples of numerical specimens with different dispersions of fracture dip angle

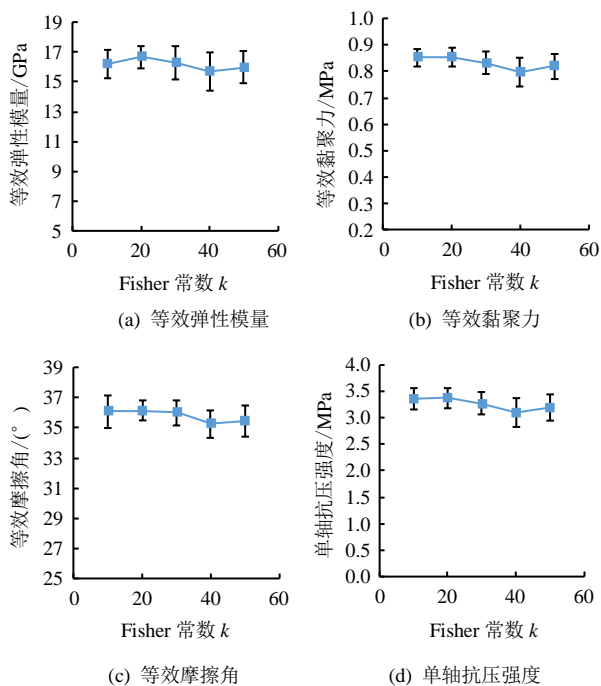


图 18 岩体力学参数与裂隙倾角离散程度的关系
Fig.18 Relationships between mechanical parameters of rock mass and dispersion of fracture dip angle

组模拟结果的平均值，I 字为 10 组模拟结果的标准差。可见在当前研究范围内，Fisher 常数 k 的变化对岩体等效力学参数影响不大，均值及标准差均变化不大。

同样的，图 19 给出了对岩体等效力学参数与结构面倾角离散程度的敏感性分析结果，敏感性分析结果也表明，岩体等效力学参数对结构面倾角的离散程度不敏感。

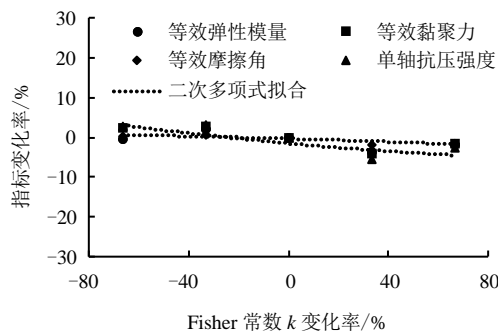


图 19 岩体力学参数对裂隙倾角离散程度敏感性分析
Fig.19 Sensitivity analysis of mechanical parameters of rock mass to dispersion of fracture dip angle

3.5 随机裂隙尺寸的影响

研究当结构面尺寸（此处仅表现为直径）变化对合成岩体等效力学参数的影响。分别取结构面直径定值 1、3、5、7、9 m，对每级直径常数取 10 个样本，计算得到的等效力学参数平均值作为该级结构面产状下的代表值。裂隙倾角均值为中值 45°，服从 Fisher 分布，Fisher 分布常数 k 为中值 30。裂隙密度取为中值 $P_{30}=0.01\text{ m}^{-3}$ 。

图 19 为结构面直径分别为 3、7 m 的两个数值试件样本示意图。

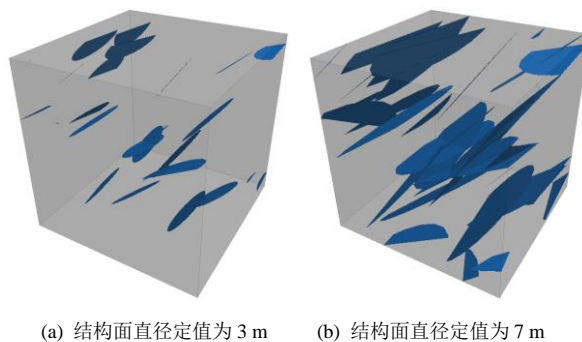


图 20 不同结构尺寸的数值模拟试件样本示意图
Fig.20 Examples of numerical specimens with different fracture diameters

图 21 给出了根据计算机模拟试验获取的合成

岩体的各种等效岩体力学参数与裂隙平均倾角的关系，其中蓝色点线的结果为 10 组模拟结果的平均值，I 字为 10 组模拟结果的标准差。可见在结构面直径在 1~9 m 范围内变化时，岩体等效力学参数均随结构面直径增加而减小。同时，等效力学参数的离散程度（标准差）随结构面直径增加而增加。

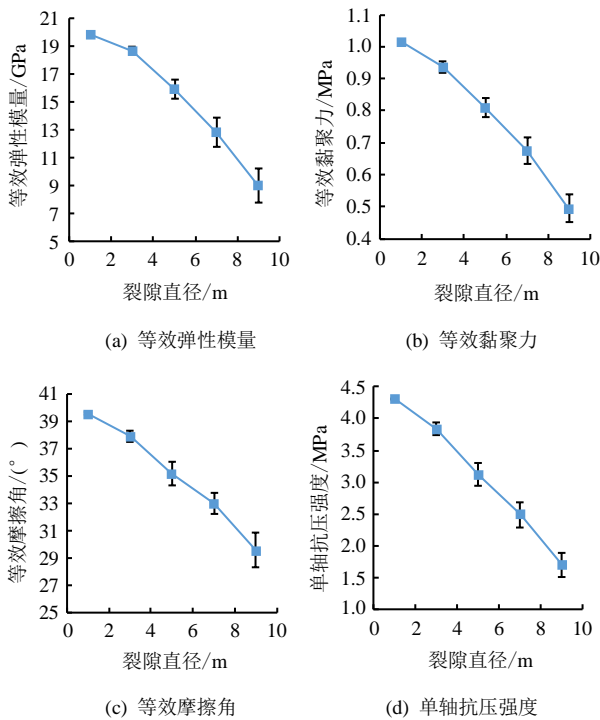


图 21 岩体力学参数与裂隙尺寸的关系

Fig.21 Relationships between mechanical parameters of rock mass and fracture diameter

为对变化趋势较为精确地讨论，图 22 给出了对岩体力学参数与结构面尺寸的敏感性分析结果。敏感性分析中，以结构面尺寸 5 m 为的结果作为基准结果。敏感性分析结果表明，岩体等效力学参数与结构面倾角呈非线性负相关关系，当结构面倾角在 -100%~100% 范围内变化时，等效力学参数变化范围为 40%~-40%。单轴抗压强度指标变化最为敏感，等效摩擦角最不敏感。

3.6 随机裂隙尺寸离散程度的影响

为了研究结构面尺寸离散程度对合成岩体等效力学参数的影响。对于直径均值为 5 m 时，分别取正态分布区间为分布区间为 [5, 5] m (标准差 $\sigma = 0$ m)、[3.5, 6.5] m (标准差 $\sigma = 0.5$ m)、[2, 8] m (标准差 $\sigma = 1$ m)、[0.5, 9.5] m (标准差 $\sigma = 1.5$ m)。每级结构面尺寸离散程度取 10 个样本，计算得到的等

效力学参数平均值作为该级结构面产状下的代表值。裂隙倾角均值为中值 45°，服从 Fisher 分布，Fisher 分布常数 k 为中值 30。裂隙密度取为中值 $P_{30} = 0.01 \text{ m}^{-3}$ 。

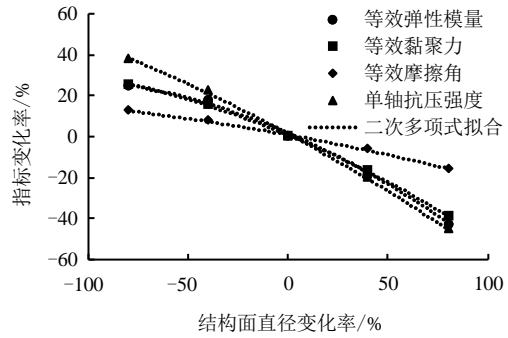
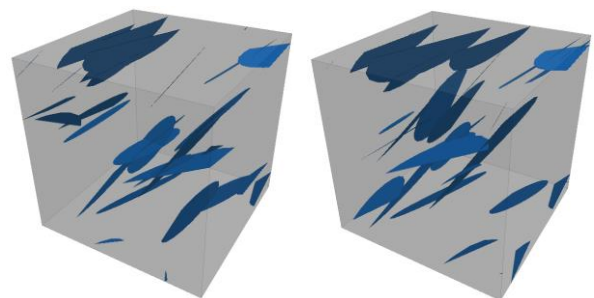


图 22 岩体力学参数对裂隙尺寸敏感性分析

Fig.22 Sensitivity analysis of mechanical parameters of rock mass to fracture diameter

图 23 为结构面尺寸区间分别为 [3.5, 6.5] m (标准差 $\sigma = 0.5$ m) 和 [0.5, 9.5] m (标准差 $\sigma = 1.5$ m) 的 2 个结构面网络模型示意图。



(a) [3.5, 6.5] m, 标准差为 0.5 m (b) [0.5, 9.5] m, 标准差为 1.5 m

图 23 不同裂隙尺寸离散程度的数值试件样本示意图

Fig.23 Examples of numerical specimens with different dispersions of fracture diameter

图 24 给出了根据计算机模拟试验获取的合成岩体的各种等效岩体力学参数与裂隙尺寸离散程度（直径的标准差）的关系，其中蓝色点线的结果为 10 组模拟结果的平均值，I 字为 10 组模拟结果的标准差。可见在当前研究范围内，直径的标准差的变化对岩体等效力学参数影响不大，均值及标准差均变化不大。

同样的，图 25 给出了对岩体等效力学参数与结构面尺寸离散程度的敏感性分析结果，敏感性分析结果也表明，岩体等效力学参数对结构面尺寸的离散程度不敏感。

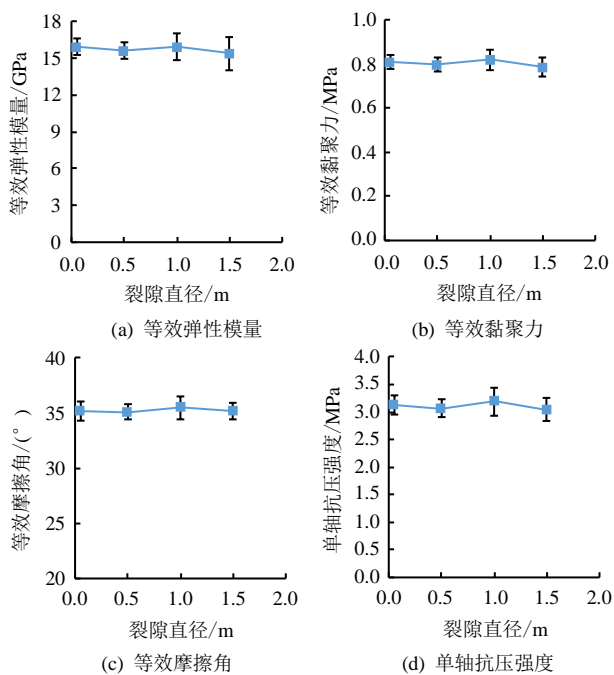


图 24 岩体力学参数与裂隙尺寸离散程度的关系
Fig.24 Relationships between mechanical parameters of rock mass and dispersion of fracture diameter

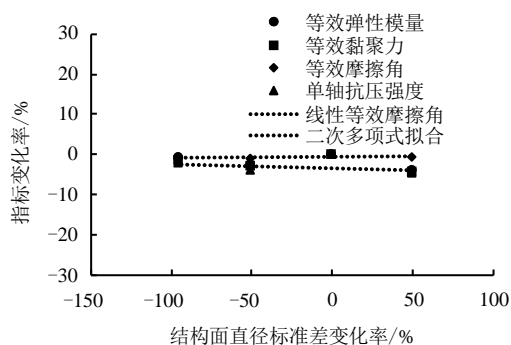


图 25 岩体力学参数对裂隙尺寸离散程度敏感性分析
Fig.25 Sensitivity analysis of mechanical parameters of rock mass to dispersion of fracture diameter

4 结 论

本文针对裂隙岩体等效力学参数的结构效应问题，采用基于三维离散元的 SRM 技术，通过可控地改变三维岩体结构网络中的结构参数，制作相应的合成岩体试件，开展计算机模拟试验，研究了裂隙密度、产状等结构参数对裂隙岩体等效力学参数的影响，初步研究结论如下：

(1) 通过计算机模拟试验获取的合成岩体等效力学参数与理论解得到的结果较为接近，说明采用基于三维离散元的合成岩体技术来开展计算机模拟试验，研究裂隙岩体结构效应对其等效力学参数的影响是可行的。

(2) 在生成计算机模拟试验用的合成岩体试样

隙产状离散程度、裂隙尺寸、裂隙尺寸离散程度这 5 个参数来表达，可视作影响裂隙岩体等效力学特性的结构效应参数。

(3) 随岩体中裂隙体积密度增大，裂隙的变形参数和强度参数随裂隙密度增加而减少，其中等效弹性模量对结构面密度变化最为敏感。随岩体中裂隙倾角增加，岩体等效弹性模量随之单调增加，且等效弹性模量的离散程度（标准差）随倾角增加而减小，而各强度参数指标则先减少而后增加，形成 U 形变化规律，而各指标的离散程度也首先增加，而后减小。岩体等效力学参数对结构面倾角的离散程度不敏感。岩体等效力学参数均随结构面尺寸增加而减小，同时等效力学参数的离散程度（标准差）随结构面直径增加而增加，其中单轴抗压强度指标变化最为敏感。岩体等效力学参数对结构面尺寸的离散程度不敏感。

(4) 后续研究中，可以进一步开展考虑岩石基质与裂隙面峰后强度特性的研究，获取岩体结构参数对裂隙岩体峰后力学特性的影响。并考虑采用尽量接近真实岩体的合成岩体模型开展研究工作，使得结构效应的影响规律更加符合工程岩体的实际状况。

参 考 文 献

- [1] HOEK E. 实用岩石工程技术[M]. 刘丰收. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.
HOEK E. Practical rock engineering[M]. LIU Feng-shou. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2002.
- [2] GOODMAN R E. Introduction to rock mechanics[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1989.
- [3] 盛谦, 杨启贵, 陈胜宏. 节理岩体宏观力学参数的计算机模拟试验[J]. 地下空间, 1999, 19(5): 482—487.
SHENG Qian, YANG Qi-gui, CHEN Sheng-hong. Computer simulations of jointed rock mass macroscopic mechanical parameters[J]. **Underground Space**, 1999, 19(5): 482—487.
- [4] 周火明, 盛谦, 鄂爱清. 三峡工程永久船闸边坡岩体宏观力学参数的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 661—664.
ZHOU Huo-ming, SHENG Qian, WU Ai-qing. Size effect analysis on macro-mechanics parameters for the rock masses of the TGP shiplock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(5): 661—664.
- [5] MIN Ki-bok, JING Lan-ru. Numerical determination of the equivalent elastic compliance tensor for fractured rock masses using the distinct element method[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40(6): 795—816.
- [6] SITHARAMA T. G. SRIDEVIV J. SHIMIZUG N.

- Practical equivalent continuum characterization of jointed rock masses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(3): 437–448.
- [7] MAGHOUS S, HINTON E. Non-linear global elastic behaviour of a periodically jointed material[J]. **Mechanics Research Communications**, 2002, 29(1): 4–51.
- [8] 赵吉东, 尹健民, 周维垣, 等. 节理岩体断裂损伤模型在三峡坝基岩体力学参数模拟和预测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 176–179.
ZHAO Ji-dong, YIN Jian-min, ZHOU Wei-yuan, et al. Fracture-damage model of jointed rockmass and its application to the numerical parameters predicting of the dam-bed-rock of the three gorges project[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(2): 176–179.
- [9] 崔臻, 魏倩, 侯靖, 等. 基于节理网络有限元的柱状节理岩体等效变形模量结构效应研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2921–2930.
CUI Zhen, WEI Qian, HOU Jing, et al. Structural effect on equivalent modulus of deformation of columnar jointed rock mass with jointed finite element method [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(10): 2921–2930.
- [10] 宁宇, 徐卫亚, 郑文棠, 等. 柱状节理岩体随机模拟及其表征单元体尺度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1202–1208.
NING Yu, XU Wei-ya, ZHENG Wen-tang, et al. Study of random simulation of columnar jointed rock mass and its representative elementary volume scale[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(6): 1202–1208.
- [11] 晏长根, 伍法权, 祁生文, 等. 随机节理岩体变形与强度参数及其尺寸效应的数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(6): 879–885.
YAN Chang-gen, WU Fa-quan, QI Sheng-wen, et al. Deformation and strength parameters and size effect of random jointed rock mass by numerical simulation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(6): 879–885.
- [12] ESMAYELI K, HADJIGEORGIOU J, GRENON M. Estimating geometrical and mechanical REV based on synthetic rock mass models at Brunswick mine[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47(6): 915–926.
- [13] IVARS D M, PIERCE M E, DARCEL C, et al. The synthetic rock mass approach for jointed rock mass modelling[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2011, 48(12): 219–244.
- [14] 吴顺川, 周喻, 高利立, 等. 等效岩体技术在岩体工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1435–1442.
WU Shun-chuan, ZHOU Yu, GAO Li-li, et al. Application of equivalent rock mass technique to rock mass engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(7): 1435–1442.
- [15] 吴琼, 唐辉明, 王亮清, 等. 基于三维离散元仿真试验的复杂节理岩体力学参数尺寸效应及空间各向异性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2419–2433.
WU Qiong, TANG Hui-ming, WANG Liang-qing, et al. Three-dimensional distinct element simulation of size effect and spatial anisotropy of mechanical parameters of jointed rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(12): 2419–2433.
- [16] Itasca Consulting Group Inc. 3DEC (3 dimensional distinct element code) discrete fracture networks in 3DEC[R]. 5.0 version. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc., 2014.
- [17] KULATILAKE P H S W, UCPIRTI H, WANG S, et al. Use of the distinct element method to perform stress analysis in rock with non-persistent joints and to study the effect of joint geometry parameters on the strength and deformability of rock masses[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1992, 25(4): 253–274.
- [18] WU Qiong, KULATILAKE P H S W. REV and its properties on fracture system and mechanical properties, and an orthotropic constitutive model for a jointed rock mass in a dam site in China[J]. **Computers & Geotechnics**, 2012, 43(1): 124–142.
- [19] 张占荣. 裂隙岩体变形特性研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2010.
ZHANG Zhan-rong. Study on deformation characteristics of fractured rock mass[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [20] 付志亮. 岩石力学试验教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
FU Zhi-liang. Course of rock mechanics test[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [21] 朱泽奇, 盛谦, 李红霞. 多组贯穿节理岩体正交各向异性变形参数研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2013, 32(增刊 2): 3022–3028.
ZHU Ze-qi, SHENG Qian, LI Hong-xia. Study of orthogonal anisotropy deformation parameters of rock mass with multiple persistent crack sets[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(Supp.2): 3022–3028.
- [22] 耶格 J C, 库克 N G W. 岩石力学基础[M]. 3 版. 中国科学院工程力学研究所译. 北京: 科学出版社, 1983.
JAEGER J C, COOK N G W. Fundamentals of rock mechanics[M]. 3rd ed. Translated by Institute of Engineering Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press, 1983.
- [23] 崔臻. 岩体尺寸效应研究及其工程应用: 以雅砻江杨房沟水电站为例[R]. 杭州: 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 2015.
CUI Zhen. Study on the size effect of rock mass and its engineering application: Taking Yangfanggou hydropower station as an example[R]. Hangzhou: PowerChina Huadong Engineering Co., Ltd., 2015.