

牙兰开, 刘远明, 陈庆芝, 等. 基于 SRM 法的直剪作用下不同随机节理倾角岩体尺寸效应研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(1): 217-230. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.018

YA Lankai, LIU Yuanming, CHEN Qingzhi, et al. Study of the size effect of rock mass with different random joint dip angles under direct shear based on the SRM method[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(1): 217-230. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.018

# 基于 SRM 法的直剪作用下不同随机节理倾角岩体尺寸效应研究

牙兰开<sup>1</sup>, 刘远明<sup>1</sup>, 陈庆芝<sup>1</sup>, 王忠星<sup>1</sup>, 张策<sup>2</sup>, 王义乾<sup>1</sup>, 田茂亮<sup>1</sup>

(1. 贵州大学土木工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 中铁开发投资集团有限公司, 云南 昆明 650200)

**摘要:**【目的】旨在揭示不同倾角区间的随机节理对岩体破坏特征、抗剪强度和剪切模量尺寸效应的影响规律。【方法】利用 PFC<sup>2D</sup> 离散元软件的 SRM 技术, 结合分形理论和 Monte Carlo 方法, 对不同尺寸、内嵌随机节理的类型岩体进行数值模拟直剪试验。【结果】结果表明: (1) 岩体抗剪强度随内嵌随机节理倾角区间的增大均呈现“S”型非线性特征, 且最小值多出现在 15°~30° 区间, 最大值均在 60°~75° 区间。(2) 不同尺寸的内嵌随机节理倾角区间变化对岩体破坏影响效果相似。低倾角区间出现明显的优势破坏面和次优势破坏面, 随着倾角区间增大, 其应力集中发生向节理中部转移, 两优势破坏面的优势发生转换。(3) 随机节理倾角区间变化显著影响岩体抗剪强度和剪切模量的尺寸效应, 且对岩体抗剪强度尺寸效应的影响大于对剪切模量尺寸效应的影响。【结论】研究了相同尺寸条件下内嵌随机节理倾角区间变化对节理岩体抗剪强度及破坏特征的影响和不同尺寸条件下内嵌随机节理倾角区间变化对节理岩体抗剪强度和剪切模量尺寸效应的影响, 为岩体力学性质的预测和工程应用提供了重要的参考价值。

**关键词:** SRM 法; PFC; 随机节理; 直剪试验; 尺寸效应; 抗剪强度; 力学性能

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.018

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)01-0217-14



## Study of the size effect of rock mass with different random joint dip angles under direct shear based on the SRM method

YA Lankai<sup>1</sup>, LIU Yuanming<sup>1</sup>, CHEN Qingzhi<sup>1</sup>, WANG Zhongxing<sup>1</sup>, ZHANG Ce<sup>2</sup>, WANG Yiqian<sup>1</sup>, TIAN Maoliang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. China Railway Development and Investment Group Co., Ltd., Kunming 650200, Yunnan, China)

**Abstract:** [Objective] Aiming at revealing the patterns of influence that random joints within different dip angle intervals have on the failure characteristics, shear strength, and size effect of the shear modulus of rock masses, [Methods] the SRM technology in

收稿日期: 2024-05-20; 修回日期: 2024-07-05; 录用日期: 2024-07-08; 网络出版日期: 2024-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(52064008); 贵州省科学技术基金(黔科合基础-ZK[2022]一般082); 贵阳市轨道交通科研项目(GD3-FW-YJ-05-2020-13-ZB)

作者简介: 牙兰开(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事节理岩体方面研究。E-mail: 2965591535@qq.com

通信作者: 刘远明(1975—), 男, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事隧道开挖及节理岩体方面研究。E-mail: liuym\_2021@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

PFC<sup>2D</sup> discrete element software is used combined with fractal theory and the Monte Carlo method, and numerical simulation of direct shear tests is conducted on rock-like materials of various sizes with embedded random joints. [Results]The result indicate that: (1) The shear strength of the rock body shows “S”-type nonlinear characteristics with the increase of the inclination angle of embedded random joints, and the minimum value mostly occurs in the interval of 15°~30°, and the maximum value is in the interval of 60°~75°. (2) Different sizes of embedded random joints have similar effects on the damage of the rock mass by the change of inclination intervals. The low inclination interval shows obvious dominant and subdominant damage surfaces, and as the inclination interval increases, the stress concentration is shifted to the middle of the joints, and the dominance of the two dominant damage surfaces is switched. (3) The variation of random joint dip intervals significantly affects the size effects of rock shear strength and shear modulus, and the effect on the size effect of rock shear strength is greater than the effect on the size effect of shear modulus. [Conclusion]The study investigates the impact of variations in the embedded random joint dip angle intervals on the shear strength and failure characteristics of jointed rock masses under the same size conditions, as well as the influence of variations in the embedded random joint dip angle intervals on the shear strength and the size effect of the shear modulus of jointed rock masses under different size conditions. It provides significant reference value for the prediction of rock mechanical properties and their engineering applications.

**Keywords:** SRM method; PFC (Particle Flow Code); random joints; direct shear test; size effect; shear strength; mechanical property

## 0 引言

节理作为岩体内部的关键结构要素,其非连续性和空间分布复杂性的存在影响着岩体的力学特性及变形行为<sup>[1-2]</sup>。在岩体工程中,离散裂隙网络的形态、分布及连通性各异是引起岩体尺寸效应的最根本原因。尺寸效应已经成为岩石力学研究中一个至关重要的考量因素,它反映了岩石力学性质随试样尺寸变化而显著变化的现象<sup>[3]</sup>。当岩石试样的力学参数随着尺寸增加而趋于稳定时的试样尺寸即为表征单元体(REV)<sup>[4-5]</sup>(见图1)。尺寸效应使岩体的力学行为变得更为复杂且难以预测。因此,深入研究非贯通节理岩体的尺寸效应,对揭示其力学特性和工程应用具有重要意义。

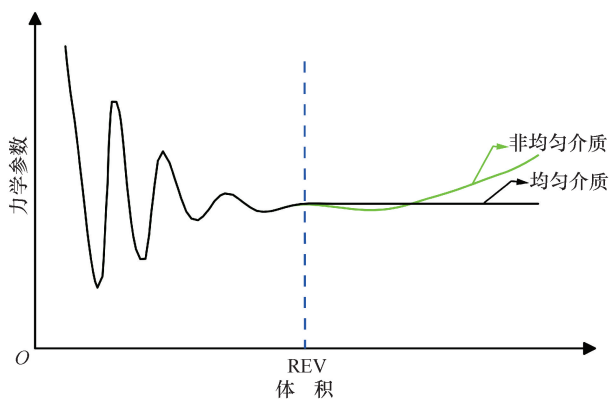


图1 表征单元体的概念

Fig.1 Concept of the characteristic element

随着计算机技术的发展和研究的深入,非贯通节理岩体尺寸效应的研究成为岩石力学的热门课题。众

多学者综合运用数值模拟、室内试验和理论分析等多种手段,对非贯通节理岩体的尺寸效应进行了广泛而深入的研究。

例如,ZHOU等<sup>[6]</sup>、MA等<sup>[7]</sup>采用离散元法模拟自然岩体单轴和三轴压缩试验,分析了节理岩体尺寸效应和REV影响,揭示了节理参数对强度的影响及破坏模式。YIOUTA-MITRA等<sup>[8]</sup>应用随机裂隙网络模拟单轴压缩试验,评估了尺寸效应对力学特性的影响,并应用于实际工程。栗东平等<sup>[9]</sup>通过UDEC软件研究了节理岩体抗压强度随围压和尺寸变化的规律。

陈银红等<sup>[10]</sup>通过单轴压缩试验探讨了尺寸和岩性对岩石力学行为的影响,指出尺寸效应主要源于岩样不均质性和端部效应。罗国立等<sup>[11-12]</sup>利用3D打印技术并通过压缩试验研究了裂隙岩体力学特性的尺寸效应和各向异性。

黄达等<sup>[13]</sup>分析了裂隙走向对类岩石力学行为的影响,发现其增加破坏复杂性并影响峰值强度等参数。ZHAO等<sup>[14]</sup>研究了不同倾角柱状节理岩体单轴和真三轴压缩条件下的尺寸效应和各向异性,发现90°倾角下性能最稳定。蒲成志等<sup>[15-16]</sup>基于节理排布均匀假设证实裂隙排布特征显著影响岩体新生裂隙非均匀分布的破坏模式。

此外,一些学者对非贯通节理岩体尺寸效应的相关理论也进行了研究。例如,傅姜平等<sup>[17-18]</sup>利用RFPA有限元分析岩桥倾角对单轴抗压强度和尺寸效应的影响,建立了相关函数关系。宋盛渊等<sup>[19]</sup>通过PFC3D模拟大尺度节理岩体直剪,探讨了剪切特性、尺寸效应及力学参数与试样尺寸的函数关系。

上述学者的成果为研究非贯通节理岩体尺寸效应提供了基础。但分析发现, 针对节理岩体尺寸效应的研究方法多集中于单轴压缩试验, 其适用范围具有局限性, 少有涉及直剪条件下节理岩体尺寸效应研究, 而且较多研究主要是基于节理均匀排布的假设, 不能反映自然界广泛的节理岩体破坏特征。而在边坡开挖、基坑支护及浅埋隧道建设等实际岩体工程中往往涉及到非贯通节理岩体的压剪复合受载情况。因此, 在压剪复合作用下不同尺寸节理岩体的破坏模式及力学特性亟待深入研究。

鉴于原位与室内试验成本高、难度大、简化性及重复性差等局限, 颗粒流软件 PFC 作为一种能够有效模拟非均质性和非连续性岩体的离散元手段, 在岩石力学领域得到了广泛的应用。本文将利用 PFC<sup>2D</sup> 离散元软件, 结合分形理论和 Monte Carlo 方法, 选取七种尺寸节理岩体试样, 嵌入具有不同倾角区间且服从正态分布的裂隙网络, 模拟恒定法向力和剪切速率条件下的直剪试验。旨在深入探究相同试样尺寸下随机节理倾角区间变化对岩体抗剪强度、破坏特征的影响, 以及不同试样尺寸下随机节理倾角区间变化对岩体抗剪强度和剪切模量尺寸效应的影响规律。因本文研究对象内嵌的节理为随机分布, 更加符合自然界的节理岩体产状。

# 1 模型建立与试验方案

## 1.1 SRM 技术

SRM (Synthetic Rock Mass) 是基于离散元法模拟节理岩体的先进手段<sup>[20-21]</sup>。试样模型在离散元软件 PFC 中由 BPM (平形黏结模型, Bonded Particle Model) 和 DFN (二维裂隙网络, Discrete Fracture Network) 两部分组成 (见图 2)。BPM 代表完整岩块, 其本质上是由多个粒子组合而成的集合体, 其内部粒子间的相互作用通过键合接触模型来刻画; 而 DFN 则模拟岩体中的节理面, 此模块负责详细描述岩体节理面的空间分布及其特征, 其中采用的光滑节理接触模型 (Smooth Joints Contact Model) 能够有效地模拟节理面的滑动和开裂等破坏过程。两者之间的接触模型定义了岩块与节理面的动态相互作用。通过调整这些接触模型的细观参数, 可以模拟具有不同物理特性的岩块行为。

## 1.2 参数选取和岩体取样

本研究根据相似理论采用特定配比 (水泥 : 石英石 : 水 = 5 : 7 : 2) 的完整类岩石试样及 45° 四节理试样的室内试验结果作为数值模拟模型细观参数校准的基准。基于现有研究成果<sup>[23-26]</sup>, 通过试错法最终确定了如表 1 所列的模型细观力学参数。具体步骤如

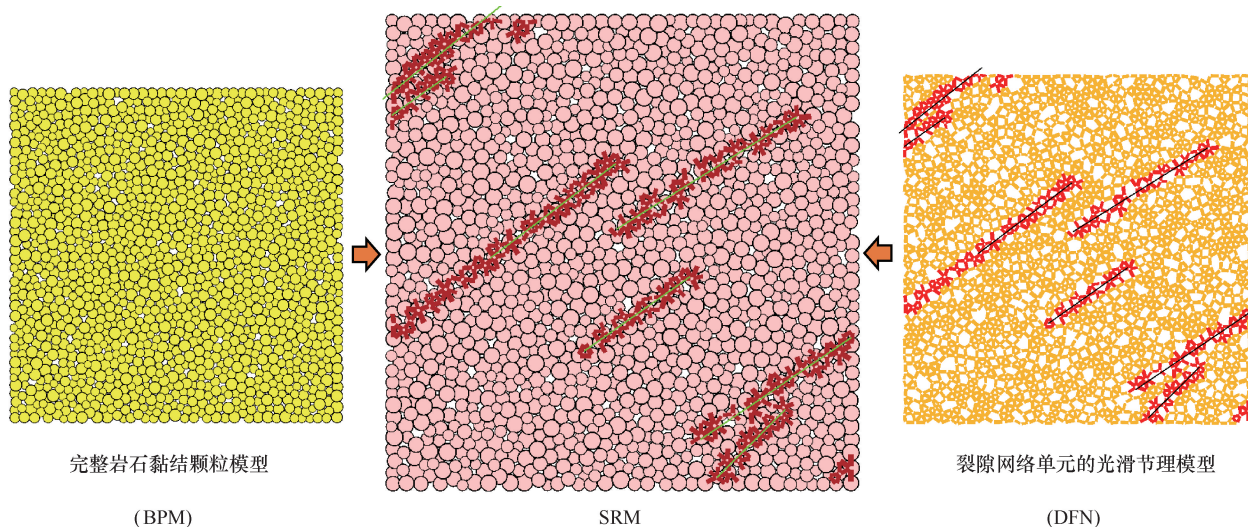


图 2 合成岩体技术

Fig. 2 Synthetic rock mass technology

表 1 SRM 细观力学参数

Table 1 SRM micromechanical parameters

平行黏结模型参数							光滑节理模型参数		
密度/ kg · m <sup>-3</sup>	孔隙率	颗粒半径 /mm	阻尼系数	颗粒接触法向 刚度/N · m <sup>-1</sup>	颗粒接触切向 刚度/N · m <sup>-1</sup>	颗粒弹性 模量/GPa	法向刚度/ GPa · m <sup>-1</sup>	切向刚度/ GPa · m <sup>-1</sup>	摩擦因数
2 750	0.02	0.074~0.122	0.7	3.2 × 10 <sup>10</sup>	1.6 × 10 <sup>10</sup>	4.7	1.2 × 10 <sup>10</sup>	1.1 × 10 <sup>10</sup>	0.18

下: 首先, 调整无节理数值模型的细观参数以匹配符合完整岩体的平行黏结模型(BPM); 其次, 基于此微调四节理试样模型的细观参数以确定所需的光滑节理模型(SJM)。最终, 通过对比应力-位移曲线和破坏模式, 验证了数值模拟与室内试验的一致性。

结果显示: 完整试样的抗剪强度误差为 1.56%, 剪切面新生裂隙发育带的位置及破坏模式与室内试验结果相似[见图 3(b)]; 45°四节理试样的抗剪强度误差为 1.65%, 数值模拟的主要破坏区域和大部分裂隙发育路径与试验结果相吻合[见图 3(d)]。因此, 基于SRM法构建的颗粒试样模型适用于浇筑类岩石材料的尺寸效应数值仿真。

在现有研究成果<sup>[6-27]</sup>的基础上, 本文假设岩体内嵌入有一组随机裂隙, 其密度为 0.28 条/m<sup>2</sup>, 裂隙位置与方向角服从均匀分布, 迹长服从对数正态分布(迹长均值为 5 mm, 标准差为 7 mm)。通过编写 PFC 程序内置 command 命令语言和 Fish 函数在 700 mm×700 mm 的完整岩体平面区域内嵌入不同倾角区间(注: 试样内节理的倾角在设定区间内随机分布)的二维裂隙

网络(DFN)。并在此基础之上, 按照相同中心点、不同尺寸的原则不断缩小区域进行取样, 最终获得 700 mm×700 mm, 600 mm×600 mm, ..., 100 mm×100 mm 等 7 种尺寸的区域进行离散元分析(见图 4)。

### 1.3 试验方案

在 2 MPa 法向应力及 0.06 mm/s 剪切速率的恒定条件下, 通过调整岩体试样尺寸  $l$  及改变节理倾角  $\alpha$  的区间(相关概念见图 5), 探讨随机节理倾角区间变化如何影响岩体破坏特征、抗剪强度和剪切模量的尺寸效应。

为此, 本研究设计了两套基本的试验方案。

方案一: 岩体试样模型的尺寸  $l$  分别设定为 100 mm、200 mm、300 mm、400 mm、500 mm 及 600 mm, 其对应的内嵌的节理倾角区间均为 0°~15°、15°~30°、30°~45°、45°~60°、60°~75°、75°~90°、90°~105°, 共计进行 42 次不同组合的直剪试验, 以揭示倾角区间变化对岩体强度及破坏特征的影响。

方案二: 岩体试样模型内嵌的随机节理倾角区间设定为 0°~15°、15°~30°、30°~45°、45°~60°、60°~

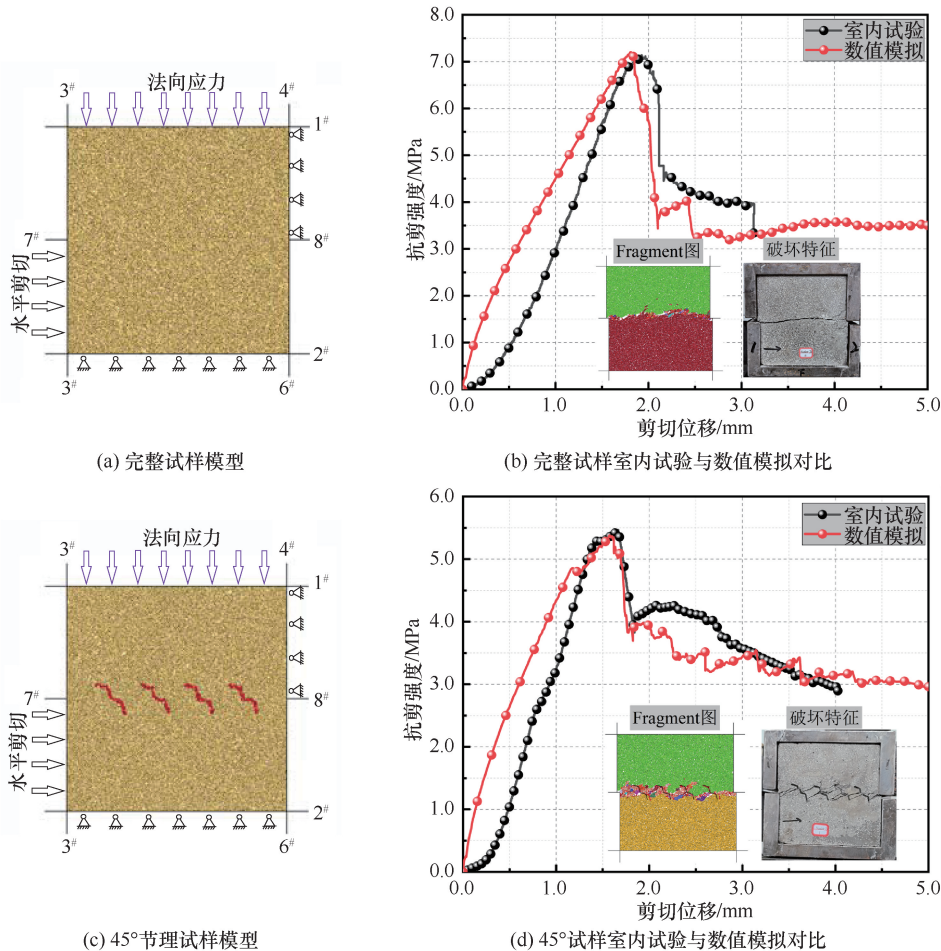


图 3 PFC 数值模拟

Fig. 3 PFC numerical simulation

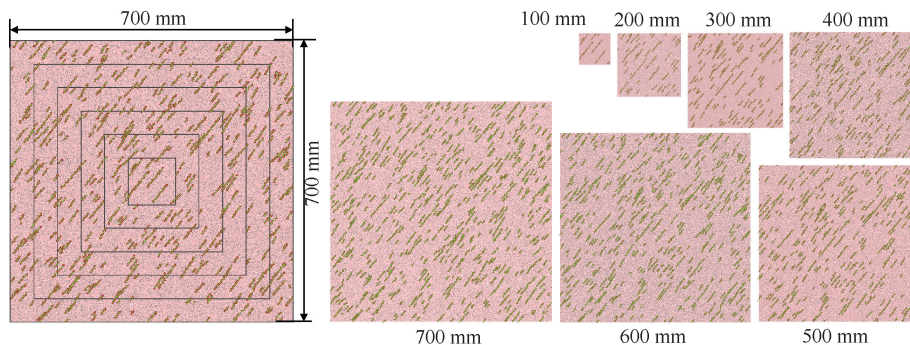


图 4 取样方法及试样示意

Fig. 4 Sampling method and schematic diagram of the specimen

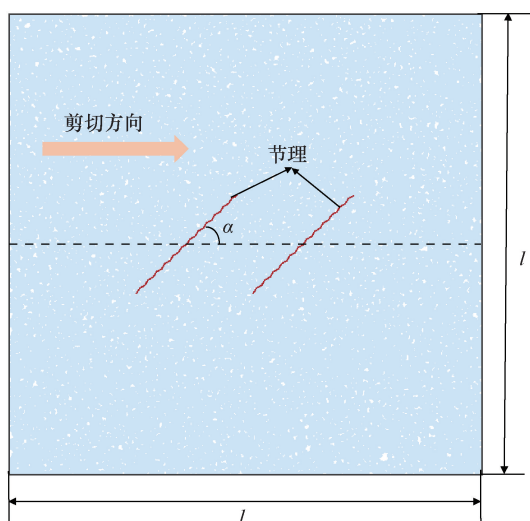


图 5  $l$  及  $\alpha$  示意

Fig. 5 Schematic diagram of  $l$  and  $\alpha$

75°、75°~90°、90°~105°，对应的试样尺寸  $l$  均为 100 mm、200 mm、300 mm、400 mm、500 mm、600 mm 和 700 mm，共计进行 49 次不同组合的直剪试验，旨在揭示不同尺寸试样下倾角区间变化对岩体抗剪强度和剪切模量尺寸效应的影响。

## 2 倾角区间变化对岩体抗剪强度及破坏特征的影响

### 2.1 倾角区间变化对抗剪强度的影响

按照方案一，绘制了六种试样尺寸下岩体抗剪强度随着不同节理倾角区间变化的柱状图及趋势曲线（见图 6）。发现：在系列尺寸条件下，不同倾角区间的随机节理显著影响岩体抗剪强度。岩体抗剪强度随着倾角区间改变而变化的曲线走向趋势几乎相同，表现出减小-增大-减小的“S”型非线性变化趋势，与 GEHLE 等<sup>[28]</sup>的物理试验结果相契合。除了尺寸为 100 mm×100 mm 的试样抗剪强度最小值出现在 30°~

45°区间外，其他 5 种岩体抗剪强度的最小值均出现在 15°~30° 区间上，对应的抗剪强度分别为 2.69 MPa、2.28 MPa、2.45 MPa、2.68 MPa 及 2.42 MPa；而最大值均出现在 60°~75° 区间上，对应的抗剪强度分别为 6.97 MPa、6.11 MPa、5.38 MPa、4.65 MPa、4.58 MPa、4.58 MPa。

当试样模型内嵌有相同倾角区间的随机节理时，岩体抗剪强度受尺寸变化影响显著，呈现明显尺寸效应。

### 2.2 破坏特征分析

根据上文分析，六种试样尺寸下岩体抗剪强度随倾角区间变化的趋势呈现较高的一致性。介于篇幅原因，本文选用 100 mm×100 mm、300 mm×300 mm 及 500 mm×500 mm 试样尺寸的数值模型以分析倾角区间变化对岩体强度及破坏特征的影响。左侧加载端区域和右侧固定端分别标记为 A 区和 B 区。

三组试验试样破坏形态如表 2 所列，可知：

(1) 相较于内嵌随机节理的岩体破坏特征，施加荷载时，三组完整试样应力集中主要位于 A 区和 B 区。新生裂隙萌生后由 A、B 区起始沿着最大主应力方向发育扩展，在 A-B 连线区域内形成较集中的直剪破坏带（见图 7 绿色区域），此时张拉裂隙比剪切裂隙对完整岩石直剪破坏的贡献更大。

(2) 在低倾角区间（0°~15°和 15°~30°）的三组试验中，试样内均出现了明显优势破坏面（指节理分布较密集的薄弱面，此区域相互贯通几率最大，见图 7 紫色区域）和次优势破坏面（见图 7 黑色区域）。破坏总是由优势破坏面内节理尖端出现应力集中导致张拉裂隙萌生并在相邻节理间贯通开始，当贯通完成后，其破坏形式转换为复合拉剪破坏。观察发现，低倾角区间试样内新生裂隙的扩展贯通

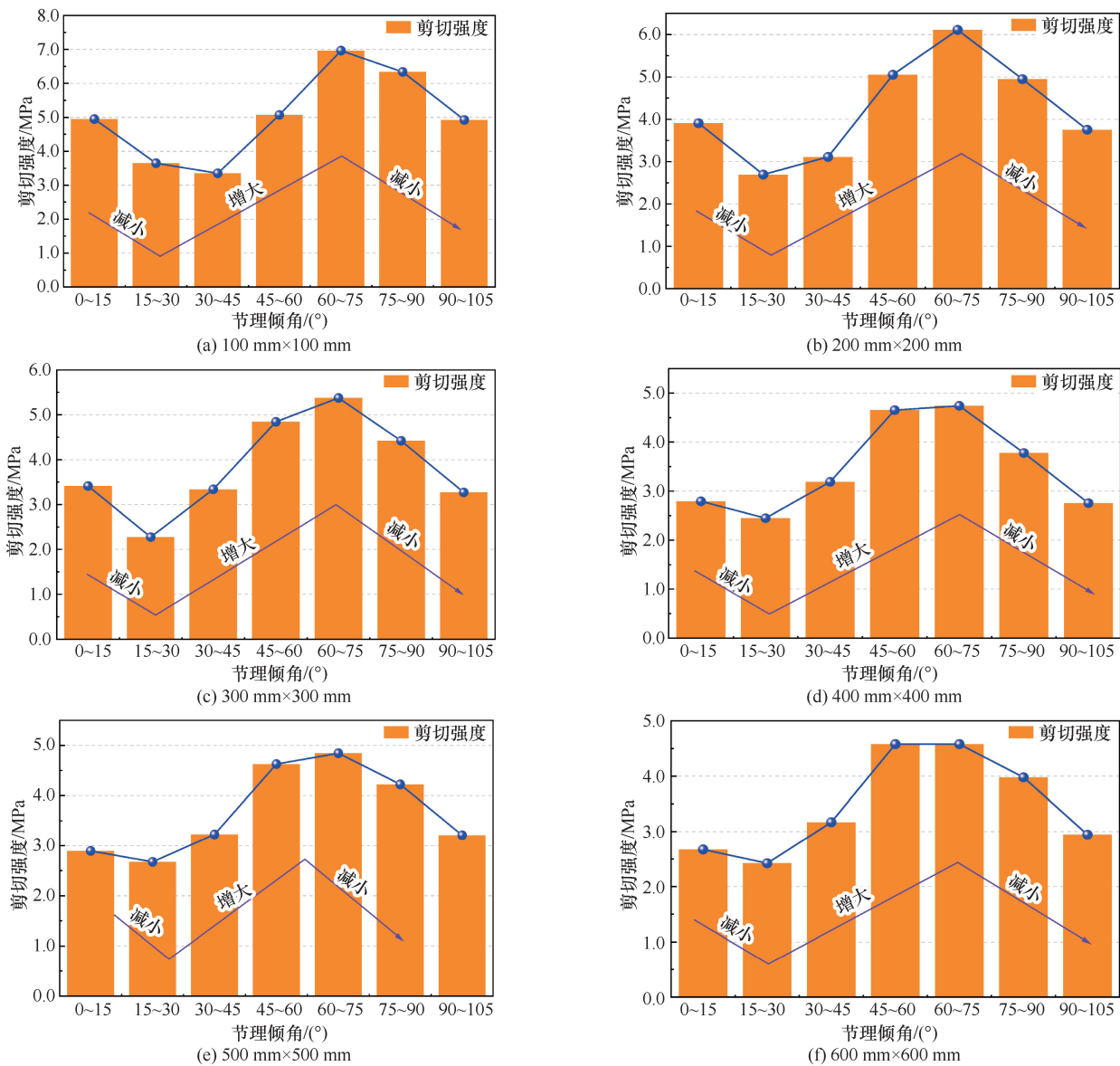


图6 系列尺寸下节理岩体抗剪强度与倾角区间的关系

Fig. 6 Relationship between shear strength and dip intervals of jointed rock bodies at series sizes

在紫、黑色区域内交替进行，这是分块体内应力集中与释放的表现。

(3)在中倾角区间(30°~45°)的三试样中，初始加载时，原优势破坏面内节理群应力集中位置有由节理尖端向节理中部转移的趋势，其尖端丧失萌生张拉裂隙的优势。相反，在A-B连线附近区域内节理端部仍存在应力集中现象，此区域内张拉裂隙随着荷载施加在相近节理尖端间扩展贯通，次优势破坏面得以发展。100 mm×100 mm的试样内存在两条长且近的原生节理，其优势破坏面未被抑制。

(4)在高倾角区间(60°~75°、75°~90°和90°~105°)原优势破坏面完全丧失裂隙起始发育的优势。在三组试验试样中，随着倾角区间不断增大，应力集

中位置不再局限于尖端，而是随着节理中部扩展。在初始加载时，压应力在相邻节理间岩桥内集中，而拉应力在A、B区集中；随着直剪荷载进行，压应力由岩桥向节理中部转移，同时在剪切方向节理间内出现拉应力集中，其在节理尖端与中部萌生的张拉裂隙会沿着拉应力集中处发育并相互贯通，进而造成整体失稳破坏。

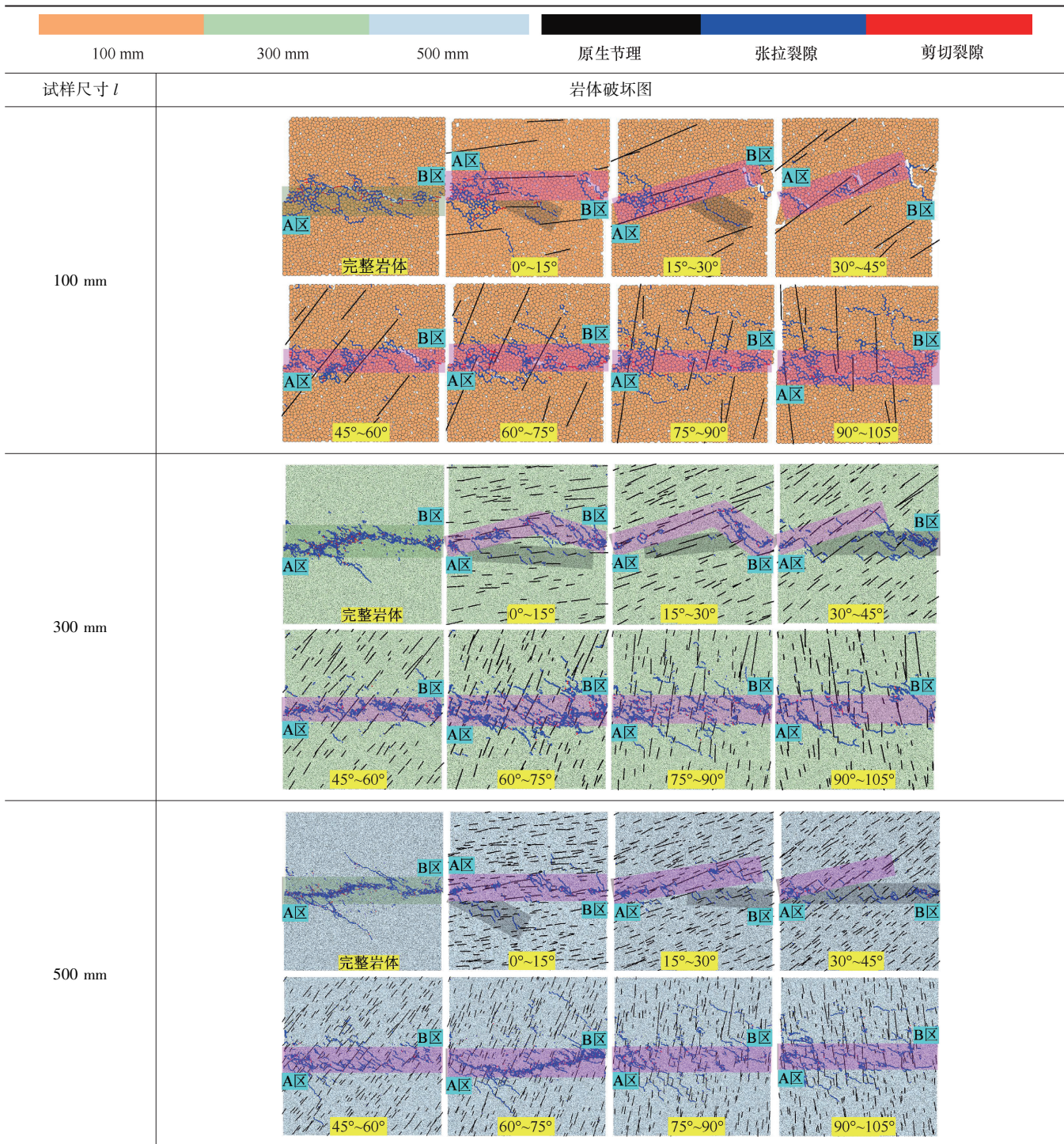
### 3 倾角区间变化对岩体尺寸效应的影响

#### 3.1 倾角区间变化对岩体抗剪强度的影响

根据方案二，可得到七组倾角区间在七种试样尺寸下共计49组抗剪强度，将其整合并汇总至表3，以及获取同49组抗剪强度，相对应的剪应力-应变

表 2 三组试验不同倾角区间岩体破坏图

Table 2 Rock damage diagrams for different inclination intervals of the three sets of tests



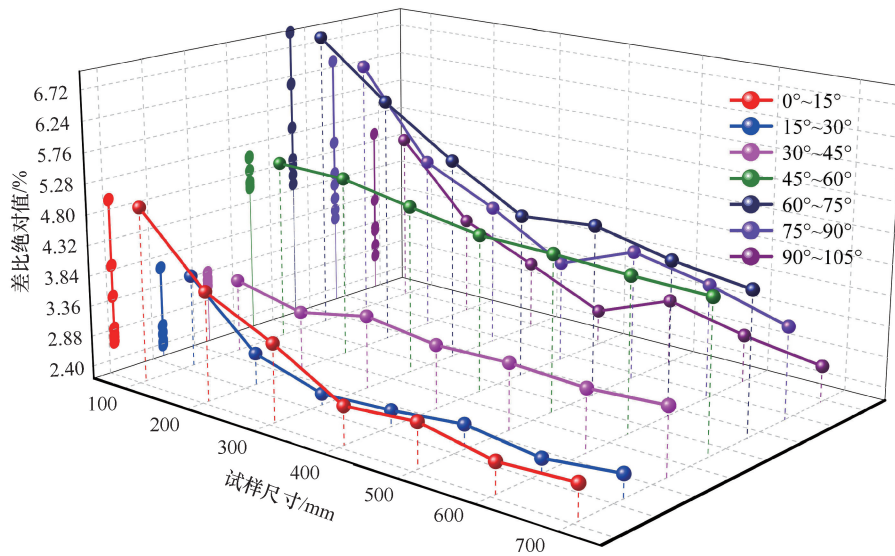
曲线(见图 8)。

本文采用差比值量化评估相邻尺寸试样模型属性的变化程度, 设定差比值绝对值小于 10% 为确定表征单元体的量化阈值<sup>[6]</sup>。当 SRM 模型  $i$  与尺寸更大的模型  $i+1$  间的差比值绝对值均满足此标准时, 模型  $i$  的尺寸即被认定为岩体的 REV 尺寸。差比值  $C_i$  的计算方法为

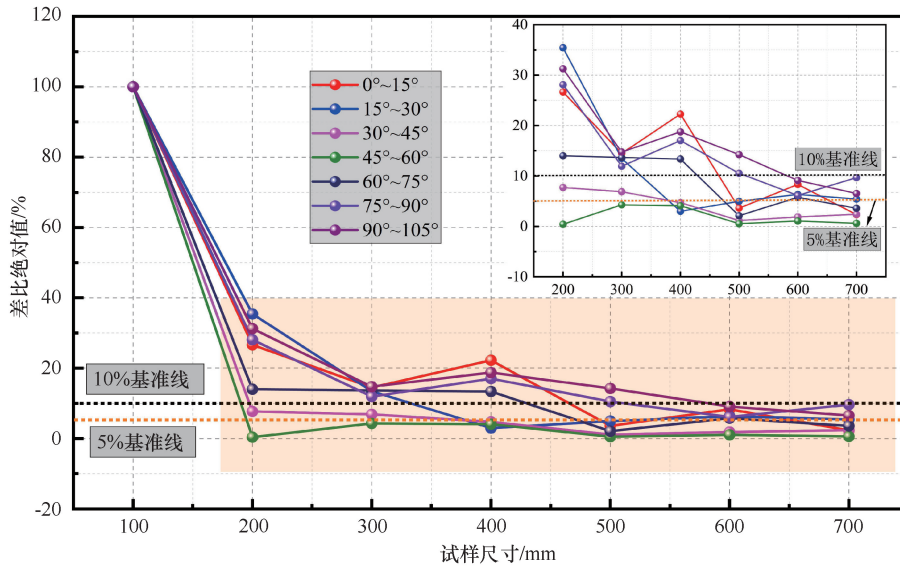
$$C_i = \frac{P_i - P_{i-1}}{P_{i-1}} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $P_i$  为试样模型  $i$  的属性;  $P_{i-1}$  为模型  $i-1$  的属性。

以  $0^\circ \sim 15^\circ$  倾角区间试验组为对象, 本研究构建了七级尺寸逐级递增的 SRM 试样模型, 并对应设定了七个差比值。具体而言, 当试样尺寸  $l$  为 100 mm



(a) 不同节理倾角区间岩体抗剪强度尺寸效应



(b) 差比绝对值

图7 不同倾角区间岩体抗剪强度尺寸效应和差比绝对值

Fig. 7 Size effect plots of shear strength of rock bodies in different inclination intervals and absolute values of difference ratios

表3 不同倾角区间在七种尺寸下的抗剪强度

Table 3 Shear strength of different inclination intervals at seven sizes

岩体尺寸 $l/mm$	节理岩体抗剪强度/MPa						
	倾角区间						
	0°~15°	15°~30°	30°~45°	45°~60°	60°~75°	75°~90°	90°~105°
100	4.949	3.650	3.350	5.072	6.965	6.338	4.926
200	3.808	2.695	3.110	5.051	6.110	4.948	3.753
300	3.413	2.375	3.340	4.844	5.376	4.421	3.271
400	2.792	2.448	3.190	4.653	4.742	3.778	2.755
500	2.896	2.576	3.227	4.628	4.845	4.223	3.212
600	2.674	2.423	3.168	4.579	4.580	3.979	2.944
700	2.737	2.562	3.245	4.451	4.421	3.628	2.763

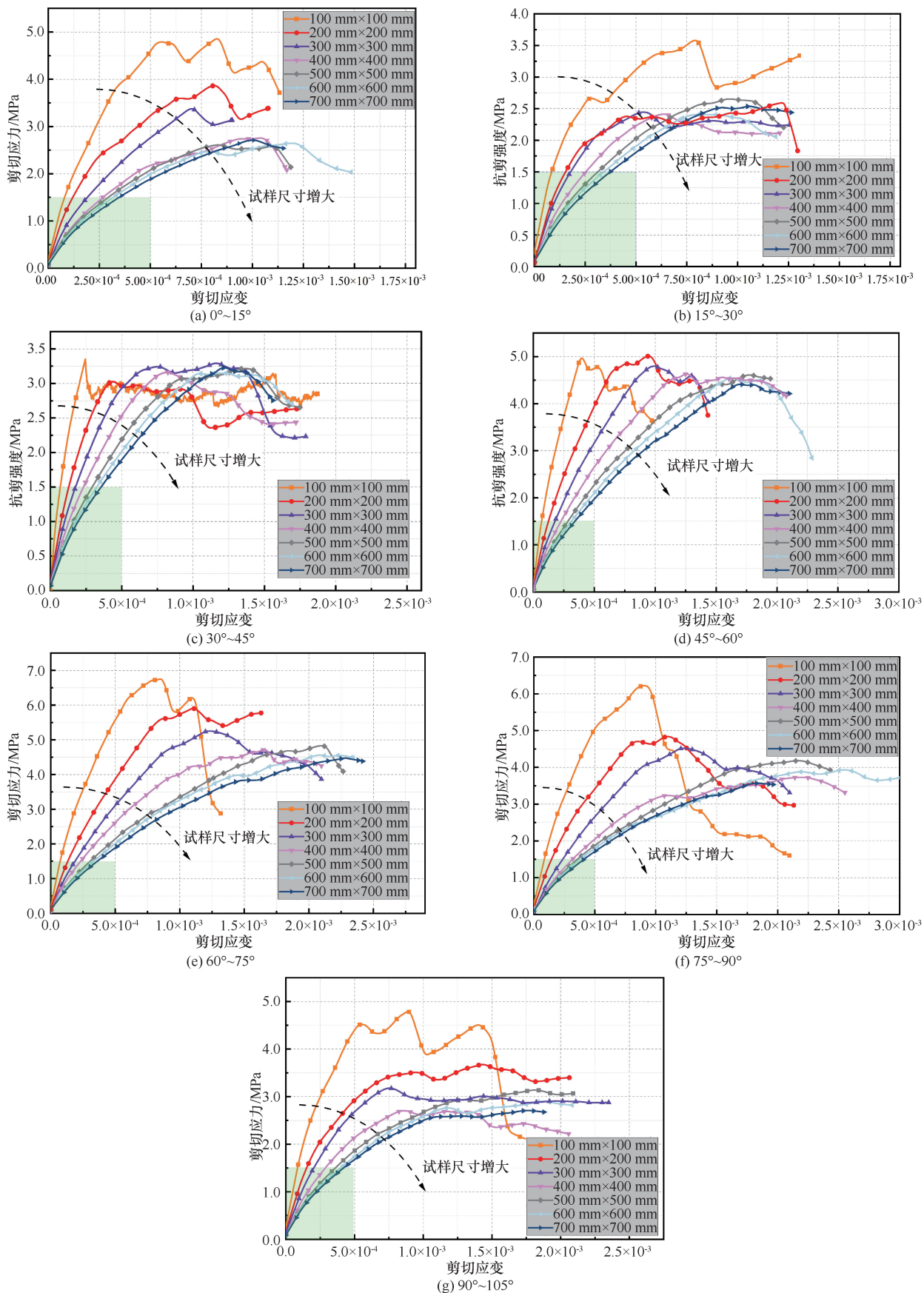


图 8 不同倾角区间在七种试样尺寸下的剪应力-应变曲线

Fig. 8 Shear stress-strain curves at seven specimen sizes for different inclination intervals

时, 其差比值标记为  $C_1$  (默认为 100%); 尺寸  $l$  增至 200 mm 时, 差比值记为  $C_2$ ; 依此类推, 直至最大尺寸 700 mm 对应的差比值  $C_7$ 。

根据表 2 可以进一步绘制出不同倾角区间下的试样模型抗剪强度尺寸效应图。将抗剪强度代入公式 (1) 可计算出七组倾角区间试验的差比值, 进而绘制出差比绝对值曲线图, 其内嵌小坐标系为橙色区域的放大图(见图 7)。

结合表 3 和图 7 可知, 不同倾角区间条件下, 试样抗剪强度均随着试样尺寸增大而先快速降低, 至特定尺寸后趋于稳定, 表现出明显的尺寸效应现象。以  $0^\circ \sim 15^\circ$  倾角区间试验组为例, 当试样尺寸  $l$  从 100 mm 增至 500 mm 时, 岩体抗剪强度和差比绝对值均呈现显著且快速的非线性降低; 当试样尺寸  $l$  达到 500 mm 时, 其中  $C_5 \sim C_7$  均小于 10%, 岩体抗剪强度开始趋于稳定, 据此判定  $0^\circ \sim 15^\circ$  倾角区间条件下, 以抗剪强度为指标的岩体表征单元体尺寸为  $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ , 其对应抗剪强度为 2.90 MPa。同理, 根据图 7(a) 和图 7(b) 结果所示, 可判定在  $15^\circ \sim 30^\circ$ 、 $60^\circ \sim 75^\circ$ 、 $75^\circ \sim 90^\circ$  及  $90^\circ \sim 105^\circ$  倾角区间条件下, 随机节理岩体的表征单元体分别为  $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 、 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 、 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$  及  $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ , 与之相对应的抗剪强度分别为 2.45 MPa、4.85 MPa、3.98 MPa 和 2.94 MPa。

另外, 鉴于  $30^\circ \sim 45^\circ$ 、 $45^\circ \sim 60^\circ$  倾角区间的差比绝对值均低于 10% 的阈值, 依据文献[6]可判定其岩体表征单元体尺寸均为  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ , 此结果与其他倾角区间工况出入大, 较为不合理。若按照文献[29]设定的评定标准, 两种倾角区间的表征单元体均为  $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ , 对应抗剪强度分别为 3.227 MPa 和 4.628 MPa。

### 3.2 倾角区间变化对岩体剪切模量的影响

剪切模量  $G$  指岩石在线弹性范围内剪应力与剪应变的比值, 是评价材料剪切变形特性的关键参数。通过改变试样尺寸和节理倾角区间研究区间变化对岩体剪切模量尺寸效应的影响。

图 8 展示了不同倾角区间条件下, 七种试样尺寸的剪应力-应变曲线局部片段, 曲线包含了峰前完整阶段及峰后部分阶段。在峰值剪切应力前, 曲线呈现较为明显的线弹性特征, 本研究将剪应力-应变曲线的峰值前直线段斜率近似为试样的剪切模量  $G$ 。

由图 8 可知, 小尺寸模型 ( $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 、 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  及  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ ) 的剪应力-应变

曲线表现出脆性破坏特征, 曲线突然下降。

随着试样尺寸的增加, 这种脆性破坏逐步过渡为延性破坏。这一转变归因于试样尺寸增加导致模型内嵌随机节理数量增多, 内部多条贯通张拉裂隙带的交错扩展引起的。在尺寸增大的过程中, 试样剪应力-应变曲线峰值前直线段斜率随试样尺寸递增而显著降低, 特别是试样尺寸为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \sim 400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$  时, 峰值前直线段斜率下降幅度最大, 若继续增大试样尺寸, 则直线段斜率降幅趋于平缓。

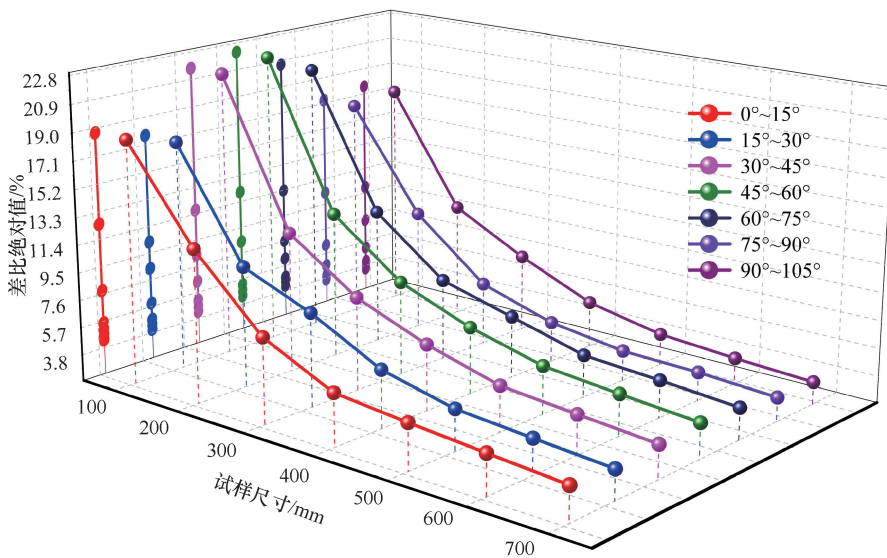
在单一变量条件下, 以图 8 的绿色区域 ( $1.5 \text{ MPa} \times 5.0 \times 10^{-4}$ ) 曲线峰前直线段斜率近似估算岩体剪切模量  $G$ 。对七组倾角区间试验组的  $G$  值进行整合, 并代入公式 (1), 计算相应的差比值, 最终可以绘制出岩体剪切模量尺寸效应图及相应的差比绝对值曲线(见图 9)。

当试样尺寸  $l$  从 100 mm 增大至 700 mm 时, 试样剪切模量  $G$  均随着试样尺寸增大而先快速降低, 至特定尺寸后趋于稳定, 表现出明显的尺寸效应现象。对比图 7(a) 与图 9(a) 结果可知, 相较于抗剪强度, 剪切模量  $G$  随着试样尺寸增大而呈现出更为显著且较高一致性的负指数式的非线性减小趋势。对比图 7(b) 与图 9(b) 结果可知, 在达到表征单元体尺寸前, 岩体剪切模量  $G$  的差比绝对值(不包括  $C_1$ ) 波动为 9.18% ~ 85.69%, 这一范围大于抗剪强度的波动 (0.42% ~ 45.23%)。差比绝对值曲线的变化趋势侧面表明了剪切模量  $G$  的尺寸效应呈现负指数减小, 其表现优于抗剪强度的尺寸效应。

结合图 9(a) 和图 9(b), 以  $0^\circ \sim 15^\circ$  倾角区间试验组为研究对象, 随试样尺寸  $l$  从 100 mm 递增至 700 mm 时, 岩体剪切模量  $G$  的差比绝对值呈减小趋势。当试样尺寸  $l$  达到 500 mm 时, 差比绝对值  $|C_5|$  低于 10%, 且此后更大尺寸的差比绝对值均保持在此阈值以下。以文献[6]的  $C_i$  评判标准, 可以判定以剪切模量  $G$  为指标的  $0^\circ \sim 15^\circ$  倾角区间条件下岩体表征单元体为  $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ , 相对应的剪切模量  $G$  为 5.12 GPa。同理, 可得到在其余倾角区间条件下, 以剪切模量为指标的岩体表征单元体均为  $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ , 对应的剪切模量  $G$  分别为 4.39 GPa、4.68 GPa、4.82 GPa、4.56 GPa、3.95 GPa 及 3.79 GPa。

### 3.3 尺寸效应程度分析

以抗剪强度和剪切模量  $G$  作为评判指标, 探究倾角区间变化对岩体尺寸效应明显程度的影响。本研究定义  $\Delta\tau$  来描述岩体抗剪强度尺寸效应的明显程



(a) 不同节理倾角区间岩体剪切模量尺寸效应图

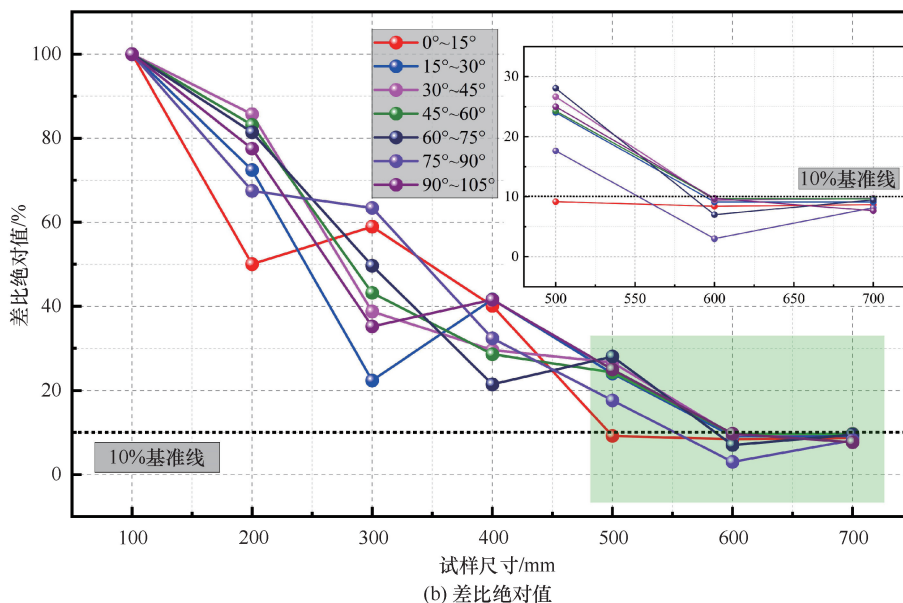


图 9 不同倾角区间岩体剪切模量尺寸效应图及差比绝对值

Fig. 9 Size effect plots of rock shear modulus and absolute value of difference ratio for different dip interval

度。当  $\Delta\tau$  越大时其尺寸效应程度越明显，反之则反。 $\Delta\tau$  的计算公式(2)如下

$$\Delta\tau = \tau_{100} - \tau_{700} \quad (2)$$

式中,  $\tau_{100}$  表示试样尺寸  $l$  为 100 mm 的岩体抗剪强度;  $\tau_{700}$  表示试样尺寸  $l$  为 700 mm 的岩体抗剪强度。

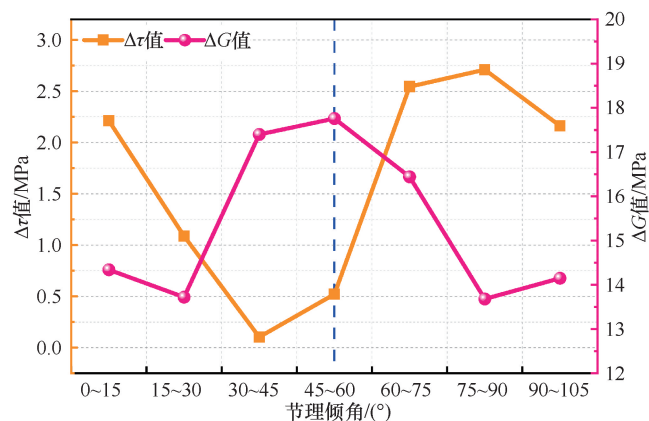
定义  $\Delta G$  来描述岩体剪切模量  $G$  尺寸效应的明显程度, 其相关公式同  $\Delta\tau$  计算公式相似。从图 7(a) 和图 9(a) 中提取出试样尺寸  $l$  为 100 mm 和 700 mm 的抗剪强度和剪切模量  $G$ , 代入公式(2)计算得到七组倾角区间试验的  $\Delta\tau$  和  $\Delta G$ , 整合得到表 4, 并以图 10 的形式直观呈现。

表 4 和图 10 结果表明, 倾角区间变化对岩体抗

剪强度和剪切模量  $G$  的尺寸效应有着显著影响。 $\Delta\tau$  值曲线的形状与前文岩体抗剪强度随倾角区间改变而变化的曲线相似, 皆呈现出减小-增大-减小的“S”型形状。倾角区间为  $30^\circ \sim 45^\circ$  时,  $\Delta\tau$  为 0.11 MPa, 为曲线最小值, 表明此倾角区间的内嵌随机节理对岩体抗剪强度尺寸效应弱化程度最大, 此时抗剪强度尺寸效应不明显; 倾角区间为  $75^\circ \sim 90^\circ$  时,  $\Delta\tau$  为 2.71 MPa, 为曲线最大值, 其尺寸效应最为明显。 $\Delta G$  曲线则呈现出中间凸起单峰值, 而两头双极小值的形式(大致为关于蓝色虚线对称的“W”型)。节理倾角区间为  $15^\circ \sim 30^\circ$  和  $75^\circ \sim 90^\circ$  时对应着曲线两处极小值,  $\Delta G$  分别为 13.72 GPa 和 13.68 GPa, 二者相

表 4 不同倾角区间的  $\Delta\tau$  值和  $\Delta G$  值Table 4 Values of  $\Delta\tau$  and  $\Delta G$  for different inclination intervals

倾角区间	0°~15°	15°~30°	30°~45°	45°~60°	60°~75°	75°~90°	90°~105°
$\Delta\tau$ /MPa	2.21	1.09	0.11	0.52	2.54	2.71	2.16
$\Delta G$ /GPa	14.34	13.72	17.40	17.76	16.44	13.68	14.15

图 10 不同倾角区间的  $\Delta\tau$  和  $\Delta G$ Fig. 10 Values of  $\Delta\tau$  and  $\Delta G$  for different inclination intervals

差 0.29%，可认为内嵌两倾角区间的随机节理对岩体抗剪强度尺寸效应弱化程度近似且明显程度均为最小；倾角区间为 45°~60°时， $\Delta\tau$  为 17.76 GPa，为曲线最大值，剪切模量尺寸效应最为明显。

整体而言， $\Delta\tau$  最大值与最小值相差 95.94%，而  $\Delta G$  相差 22.97%，表明了倾角区间变化对抗剪强度尺寸效应的影响大于对剪切模量尺寸效应的影响。

### 3.4 讨论

本研究所设置数值模型的细观参数是通过数值模型与特定配合比的类岩石物理模型的研究结果校正过程所得，具有一定的局限性。但总体而言，上述抗剪强度和剪切模量的尺寸效应的发展规律与张春生、ZHOU 等<sup>[2,6]</sup>的 PFC 数值模拟研究结果较为一致，均有负指数函数关系规律。且 ZHOU<sup>[6]</sup>的研究内容是以滨莱高速隧道为研究背景，其研究结果与工程实测具有高度的一致性。这说明，本研究结果具有较好的可信度，可以为边坡开挖、基坑支护及浅埋隧道建设等实际岩体工程的表征单元体及预测随机节理岩体的抗剪强度提供研究思路，具有一定的参考价值。具体方法为：首先，从工程现场获取完整岩体和节理岩体的单轴抗压强度、黏聚力、内摩擦角等力学参数，根据参数建立 PFC 试样模型；其次，获取现场施工面的结构面产状信息（结构面倾角区间、结构面长度、结构面间距）用于编写 Fish 函数以生成符合现场结构面产状的随机节理分布；最后，构建合理的 SRM 试样

模型，以研究直剪条件下工程节理岩体的尺寸效应。

## 4 结论

利用 PFC<sup>2D</sup> 离散元软件的 SRM 技术，结合分形理论和 Monte Carlo 方法，在试样模型内生成不同节理倾角区间的内嵌随机节理，模拟了多组尺寸下不同节理倾角区间的类岩石数值模拟直剪试验，研究了随机节理区间变化对岩体破坏特征、抗剪强度和剪切模量尺寸效应的影响，得到以下结论。

(1) 在系列尺寸条件下，不同倾角区间的随机节理显著影响岩体抗剪强度。其抗剪强度随倾角区间变化的曲线均呈典型的“S”型非线性特征，且抗剪强度最大值、最小值几乎均分别出现在倾角区间 15°~30°、60°~75°。

(2) 不同尺寸的随机节理倾角区间变化对岩体破坏特征的影响方式相似。随着倾角区间增大，A-B 连线区域内应力集中由节理尖端向节理中部转移，这导致了优势破坏面和次优势破坏面随着倾角区间增大而发生优势转换。

(3) 随机节理倾角区间的变化显著影响岩体抗剪强度的尺寸效应，且其影响效果各异。按照两套 REV 的判定标准，可分别确定七组倾角区间试验的岩体表征单元体尺寸及相对应的抗剪强度。

(4) 在七组倾角区间条件下，在小尺寸模型中，剪应变-应力曲线呈现出脆性破坏特征，当试样尺寸逐渐增大，整体上破坏模式由脆性破坏向延性破坏过渡。剪切模量  $G$  呈现负指数式非线性减小的曲线效果，优于抗剪强度的曲线效果，但倾角区间变化对岩体抗剪强度尺寸效应的影响大于对剪切模量尺寸效应的影响。

## 参考文献 (References):

- [1] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2013.  
CAI M F, HE M C, LIU D Y. Rock Mechanics and Engineering (2nd Edition)[M]. 2nd Edition. Beijing: Science Press, 2013.
- [2] 张春生. 岩体力学特性尺寸效应与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 2019.  
ZHANG C S. Size effect on the mechanical properties of rock masses and its engineering practice[M]. Beijing: Science Press, 2019.

- [3] 郑文珂, 赵玉凯, 刘煜辉. 岩石尺寸效应研究现状[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(2): 97-100.  
ZHENG W K, ZHAO Y K, LIU Y H. Research status of rock size effect[J]. Technological Innovation and Application, 2024, 14(2): 97-100.
- [4] HARRISON J P, HUDSON J A, POPESCU M E. Engineering rock mechanics: Part 2. Illustrative worked examples[J]. Appl. Mech. Rev., 2002, 55(2): B30-B31.
- [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. Study on the characterization element volume of fractured rock mass based on three-dimensional fracture network[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3775-3780.
- [6] ZHOU Z, SUN J, LAI Y, et al. Study on size effect of jointed rock mass and influencing factors of the REV size based on the SRM method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 127: 104613.
- [7] MA C, YAO W, YAO Y, et al. Simulating strength parameters and size effect of stochastic jointed rock mass using DEM method[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22: 4872-4881.
- [8] YIOUTA-MITRA P, DIMITRIADIS G, NOMIKOS P. Size effect on triaxial strength of randomly fractured rock mass with discrete fracture network[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(1): 8.
- [9] 栗东平, 李军, 孙荣荣. 基于 UDEC 岩体抗压强度尺寸效应的数值研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(4): 1098-1105.  
LI D P, LI J, SUN R R. Numerical study on size effect of rock mass compressive strength based on UDEC [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(4): 1098-1105.
- [10] 陈银红, 伍法权, 乔磊, 等. 小尺寸岩样尺寸效应特性研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(2): 460-468.  
CHEN Yinhong, WU Faquan, QIAO Lei, et al. Study on size effect characteristics of small-sized rock samples[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(2): 460-468.
- [11] 罗国立, 张科, 齐飞飞, 等. 基于 3D 打印的裂隙岩体力学特性尺寸效应及各向异性初探[J]. 岩土力学, 2023, 44(S1): 107-116.  
LUO G L, ZHANG K, QI F F, et al. Preliminary study on size effect and anisotropy of mechanical properties of fractured rock mass based on 3D printing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(S1): 107-116.
- [12] LI N, ZHANG K, LUO G, et al. Experimental study on the size effect and anisotropy in mechanical properties of fractured rock mass based on 3D printing [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2024, 129: 104224.
- [13] 黄达, 白天宇, 钟助. 含走向异面断续裂隙岩体破裂行为及裂隙延伸尺寸效应研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(6): 1881-1890.  
HUANG D, BAI T Y, ZHONG Z. Study on fracture behavior and fracture extension size effect of rock mass with discontinuous fissures of heterogeneous strike[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(6): 1881-1890.
- [14] ZHAO D, XIA Y, ZHANG C, et al. A new method to investigate the size effect and anisotropy of mechanical properties of columnar jointed rock mass[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(4): 2829-2859.
- [15] 蒲成志. 单轴压缩下类岩体裂隙材料断裂破坏机制的实验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.  
PU C Z. Experimental Study on Fracture and Failure Mechanism of Rock-like Materials with Cracks under Uniaxial Compression [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [16] 曹平, 蒲成志. 单压下有序多裂隙脆性材料破坏机制及其简化模型[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2659-2668.  
CAO P, PU C Z. Failure mechanism and simplified model of brittle materials with ordered multiple cracks under uniaxial compression [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2659-2668.
- [17] 傅姜平, 杜时贵, 胡高建, 等. 岩桥倾角对岩石力学性质尺寸效应规律的影响研究[J]. 绍兴文理学院学报, 2022, 42(10): 18-25.  
FU J P, DU S G, HU G J, et al. Study on the influence of rock bridge inclination angle on the size effect law of rock mechanical properties [J]. Journal of Shaoxing University ( Natural Science Edition), 2022, 42(10): 18-25.
- [18] 傅姜平. 岩桥倾角对岩体强度及其尺寸效应影响研究[D]. 绍兴: 绍兴文理学院, 2021.  
FU J P. Study on the Influence of Rock Bridge Inclination on Rock Mass Strength and Its Size Effect [D]. Shaoxing: Shaoxing University, 2021.
- [19] 宋盛渊, 黄迪, 隋佳轩, 等. 基于三维裂隙网络的岩体剪切特性尺寸效应分析[J/OL]. 哈尔滨工业大学学报, 1-11 [2024-03-14].  
SONG S Y, HUANG D, SUI J X, et al. Analysis of size effect on shear properties of rock mass based on three-dimensional fracture network [J/OL]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1-11 [2024-03-14].
- [20] 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(2): 219-244.
- [21] 霍海龙, 陈正乐, 张青, 等. 新疆西昆仑 509 道班西锂矿伟晶岩石英变形特征、温度及其对伟晶岩就位的约束[J]. 地质力学学报, 2024, 30(1): 72-87.  
HUO H L, CHEN Z L, ZHANG Q, et al. Quartz deformation characteristics, deformation temperature, and their constraints on pegmatites of the 509 Daobanxi lithium deposit in the West Kunlun area, Xinjiang[J]. Journal of Geomechanics, 2024, 30(1): 72-87.
- [22] 刘远明. 基于直剪试验的非贯通节理岩体扩展贯通研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.  
LIU Y M. Study on extended penetration of non-penetrating jointed rock body based on straight shear test [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.

- [23] 麻景瑞, 董元滨. 顺向节理高陡岩质边坡破坏机理研究[J]. 铁道勘察, 2023, 49(4): 114-121.  
MA J R, DONG Y B. Study on the failure mechanism of high steep rock slope with bedding joints [J]. Railway Investigation and Surveying, 2023, 49(4): 114-121.
- [24] 王唯. 不共面非贯通节理岩体的扩展贯通研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.  
WANG W. Study on the Propagation and Connection of Non-coplanar Discontinuous Jointed Rock Mass[D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [25] 王唯, 刘远明. 基于平行黏结模型的类岩石材料宏观细观参数影响[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(22): 9155-9162.  
WANG W, LIU Y M. Influence of macro-micro parameters of rock-like materials based on parallel bond model[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(22): 9155-9162.
- [26] 陈庆芝, 张玉石, 刘远明, 等. 节理起伏角对非贯通节理岩体力学特性的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(2): 351-358.  
CHEN Q Z, ZHANG Y S, LIU Y M, et al. Effect of joint fluctuation angle on mechanical properties of non-penetrating jointed rock mass [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(2): 351-358.
- [27] 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(S2): 5686-5692.  
XIANG W F, ZHOU C B. Research progress on the characteristic element volume of fractured rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5686-5692.
- [28] GEHLE C, KUTTER H K. Breakage and shear behaviour of intermittent rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(5): 687-700.
- [29] KANIT T, FOREST S, GALLIET I, et al. Determination of the size of the representative volume element for random composites: statistical and numerical approach [J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(13/14): 3647-3679.

(责任编辑 王海锋)