

DOI: 10.11779/CJGE20230549

不同充填度结构面抗剪强度尺寸效应试验研究

黄 曼^{1,3}, 吴月伟^{1,3}, 刘 丹^{*2}, 洪陈杰², 杜时贵⁴, 罗战友⁴

(1. 绍兴文理学院土木工程学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083; 3. 浙江省岩石力学与地质灾害重点实验室, 浙江 绍兴 312000; 4. 宁波大学岩石力学研究所, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对现有岩体结构面抗剪强度尺寸效应研究较少考虑充填程度差异影响的不足, 首先基于渐进扩大法选取平均起伏差和平均起伏角相近的4种连续尺寸天然结构面形貌, 并通过3D打印技术制作结构面板, 然后结合类岩石材料配制方法和毫米级充填装置制备5种充填度的充填结构面, 最后通过课题组自主研发的大型结构面直剪试验系统开展3种法向应力条件下的室内直剪试验, 获得充填结构面的剪切力学与破坏特征, 并分析临界充填度和抗剪强度尺寸效应特性。结果表明: 随着充填度的增加, 结构面剪切破坏模式主要由“岩-岩”剪断破坏逐渐转变为“岩-土界面”滑动破坏, 且结构面归一化峰值抗剪强度逐渐减小, 直至达到临界充填度时趋于稳定; 随着结构面尺寸的增加, 临界充填度逐渐增加, 变化范围为1.6~2.0; 无充填结构面抗剪强度存在较明显的正尺寸效应, 而充填结构面抗剪强度尺寸效应较不明显。通过尺寸效应机理分析发现, 在不考虑结构面平均起伏角的影响下, 平均起伏高度是影响临界充填度和抗剪强度尺寸效应的主要因素。上述研究可为充填结构面抗剪强度尺寸效应模型建立奠定试验基础。

关键词: 充填结构面; “岩-土界面”破坏; 抗剪强度; 临界充填度; 尺寸效应

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)09-1820-11

作者简介: 黄 曼(1983—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩体结构面力学性质等方面的教学与研究工作。E-mail: hmcadx@126.com。

Experimental study on size effect of shear strength of joints with different infill ratios

HUANG Man^{1,3}, WU Yuewei^{1,3}, LIU Dan², HONG Chenjie², DU Shigui⁴, LUO Zhanyou⁴

(1. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China

University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Rock Mechanics and Geohazards of Zhejiang Province, Shaoxing 312000, China; 4. Rock Mechanics Institute, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: To address the shortcomings of the existing studies on the size effect of shear strength of rock joints, which do not consider the effects of differences in the filling degree. Firstly, four continuous-size natural joint morphologies with the similar average asperity height and average undulation angle are selected based on the progressively magnifying method, and the joint panels are produced by using the 3D printing technology. Secondly, the infilled joints with five infill ratios are prepared by combining the rock-like material preparation method and the millimeter-level filling devices. Finally, using the direct shear test system for large-scale joints independently developed by the authors-research group, the laboratory direct shear tests under three normal stress conditions are carried out to obtain the shear mechanics and damage characteristics of the infilled joints. The size effects of the critical infill ratio and shear strength are analyzed. The results show that as the infill ratio increases, the shear damage mode of the joint is mainly changed from "rock-rock" shear fracture to "rock-soil interface" sliding damage, and the normalized peak shear strength gradually decreases until it reaches the critical infill ratio and tends to be stable. As the size of the joints increases, the critical infill ratio gradually increases, ranging from 1.6 to 2.0. There is a more obvious positive size effect on the shear strength of the unfilled joints, while the size effects on the shear strength of the infilled joints are not obvious. Through the analysis of the size effect mechanism, without considering the influences of the average undulation angle of the joints, it is found that the average undulation height is the main factor affecting the size effects of the critical infill ratio and shear strength. The above research can lay an experimental

基金项目: 国家自然科学基金项目(42272333, 42277147)

收稿日期: 2023-06-15

*通信作者(E-mail: liudanq0609@163.com)

foundation for establishing the size effect model for shear strength of the infilled joints.

Key words: infilled joint; "rock-soil interface" failure; shear strength; critical infill ratio; size effect

0 引言

岩体自身含有诸如节理、断层、裂隙及薄弱层等结构面, 其剪切力学行为与完整岩块差异显著且对岩体结构稳定性起重要作用^[1-3]。由于风化、侵蚀等物理作用和岩壁间剪切错动影响而形成充填结构面, 导致其剪切力学行为极为复杂^[4-5]。因此, 探究充填结构面的剪切力学特性对评价岩质边坡稳定性具有重要理论和现实意义。

充填厚度是决定充填结构面破坏模式和剪切力学行为的关键因素^[6-7]。充填度 λ (充填厚度 t 与平均起伏差 a 的比值) 常用于表征结构面的充填状态^[8], 国内外学者对不同充填度的结构面剪切试验进行了大量研究, 发现当充填度小于 1 时, 其抗剪强度主要受结构面形貌、充填物力学性质等共同作用^[9-10], 破坏模式主要以剪损破坏为主^[11]; 当充填度大于 1 时, 结构面抗剪强度主要受充填物力学性质的影响^[12], 其剪切破坏以充填物与结构面接触部分破坏和充填物破坏两种形式为主^[13-14]。随着充填度的增加, 有学者发现当充填度达到某一临界值时, 最大剪应力与法向应力的比值趋于定值^[15-16], 并且临界充填度范围为 1.0~2.0^[17-20]。目前关于充填结构面临界充填度的研究以充填物破坏为主, 而以充填物与结构面接触部分破坏的研究成果较少, 为此, 有必要进一步开展该破坏模式下的临界充填度研究。

岩体结构面抗剪强度具有尺寸效应特性^[21-23]。目前, 众多学者基于室内试验和数值模拟等方法开展了无充填结构面尺寸效应研究, 如 Bandis 等^[24]、Huang 等^[25]对不同尺寸的模拟岩石天然结构面开展了室内直剪试验, 获得峰值抗剪强度存在负尺寸效应的规律; Johansson^[26]也基于室内直剪试验研究了不同配合比下系列尺寸结构面的峰值抗剪强度, 发现其无明显尺寸效应现象; Bahaaddini 等^[27]针对粗糙岩石结构面开展了数值直剪尺寸效应试验, 得到峰值抗剪强度随着结构面尺寸增加而逐渐减小的变化趋势。总之, 目前抗剪强度尺寸效应的研究对象主要为无充填结构面, 而充填结构面抗剪强度的相关研究一般为小尺寸且具有单一性^[15-20, 28-29]。上述研究为充填结构面尺寸效应研究提供借鉴意义。临界充填度是决定充填结构面抗剪强度的重要因素, 其与尺寸也存在必然联系。因此, 临界充填度的尺寸效应特性仍需深入探讨。

鉴于此, 本文以具有三维形貌特征的模拟岩石结构面为研究对象, 以高岭土为充填材料, 开展了不同

尺寸充填结构面的室内直剪试验, 获得充填结构面的剪切力学特性与破坏特征, 并分析临界充填度和抗剪强度尺寸效应特性, 为后续充填结构面抗剪强度的尺寸效应模型研究奠定良好的试验基础。

1 多尺寸充填结构面剪切试验

1.1 多尺寸充填结构面模型制作

(1) 三维结构面形貌获取

课题组经过多次野外调查, 获得了 4 块尺度较大且保存完整的石灰岩结构面, 通过三维激光扫描仪 (MetraSCAN 3D, Creaform, Canada) 获取一组尺寸为 1000 mm×1000 mm 的高精度原岩结构面点云数据。根据渐进扩大法, 从中截取 4 种连续尺寸作为结构面样本, 如图 1 所示, 分别为 I 区域、I-II 区域、I-III 区域、I-IV 区域, 对应 100, 200, 300, 400 mm 的取样区域。

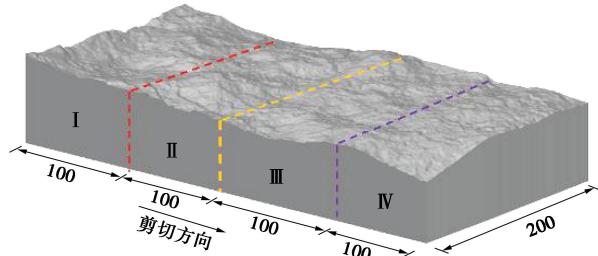


图 1 结构面样本渐进扩大法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of progressively magnifying method for joint sample

结构面上全部坐标点到参考平面的相对平均距离最小, 即为平均起伏差。参考 She 等^[30]提出的计算方法, 公式如下:

$$a = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Ax_i + By_i - z_i + D|}{\sqrt{1 + A^2 + B^2}} \quad . \quad (1)$$

式中: A , B , D 分别为拟合平面方程的控制参数; x_i , y_i , z_i 为结构面表面的数据点坐标; n 为坐标点的数量。为避免系列尺寸三维形貌的平均起伏差差异影响, 设置采样间距为 0.50 mm, 通过软件 MATLAB 计算 4 个连续尺寸相近的平均起伏差, 分别为 5.05, 4.92, 5.03, 4.92 mm, 并统一取为 5.00 mm。

选择普遍认可的三维粗糙参数 $\theta_{\max}^*/(C+1)$ 进行定量评价^[31]不同尺寸三维结构面形貌的粗糙度, 通过计算得到 4 个连续尺寸的平均起伏角分别为 15.46°, 15.23°, 15.08°, 14.48°, 计算式如下:

$$A_{\theta^*} = A_0 \left(\frac{\theta_{\max}^* - \theta^*}{\theta_{\max}^*} \right)^C . \quad (2)$$

式中: A_0 为结构面最大接触面积; θ_{\max}^* 为沿剪切方向粗糙表面的最大有效视倾角; C 为粗糙度拟合参数。

(2) 系列尺寸试样制作

基于课题组对岩石相似材料的研究^[23], 选取水泥、砂、大理石粉、树脂、水等为原料, 制作 5 组尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准试样, 具体材料质量配合比见表 1, 并开展单轴压缩试验, 获得类岩石材料单轴抗压强度平均值为 40.05 MPa。

表 1 类岩石材料配合比

Table 1 Mix ratios of rock-like materials

水泥	砂	大理石粉	树脂	固化剂	促凝剂	保水剂
37%	24%	30%	6%	1%	1%	1%

针对结构面相似几何特征的模拟, 通过 3D 建模软件构建三维形貌, 采用高韧树脂材料 3D 打印结构面板, 设置打印精度为 0.20 mm。对于上下盘结构面试样的制作, 首先将模具组装, 再将 3D 打印的结构面板插入定制的不同尺寸木制模具凹槽中, 并刷上均匀适量的脱模剂, 如图 2 所示; 然后将相似材料浇筑在结构面板两侧并充分捣实抹平, 24 h 后拆除木模。最后, 将上下盘结构面放入恒温 24°C、相对湿度 90%以上的养护室内养护 28 d, 重复上述步骤即可批量制作出不同尺寸上下盘结构面, 如图 3 所示。

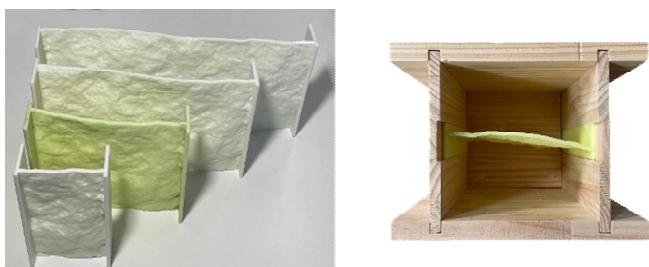


图 2 模型试件制作

Fig. 2 Production of model samples

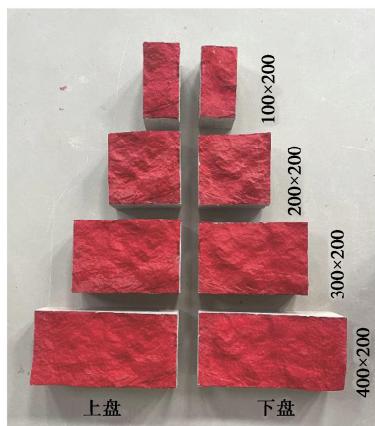


图 3 系列尺寸模型试样

Fig. 3 Model samples with series sizes

(3) 系列尺寸试样充填制备

在制备完成系列尺寸试样后, 采用粒径为 800 目的高岭土作为充填介质, 制备具有不同充填度的充填结构面试件。Ladanyi 等^[8]提出充填度 λ 计算公式:

$$\lambda = \frac{t}{a} . \quad (3)$$

式中: t 为充填厚度; a 为结构面表面平均起伏差。

充填时, 先将 1 mm 厚的“回”型铁片数量确定并组装固定, 保证充填槽厚度达到预定厚度, 再将充分混合且含水率为 18% (相对误差±1%) 的充填材料填入充填槽中, 通过控制质量法压制成型, 确保充填质量统一且均匀, 然后将其紧密贴合于下盘结构面, 最后通过剪切试验装置压实达到实际充填厚度, 如图 4 所示。并开展充填材料的剪切试验, 获得充填材料的黏聚力为 14.32 kPa, 内摩擦角为 19.94°。

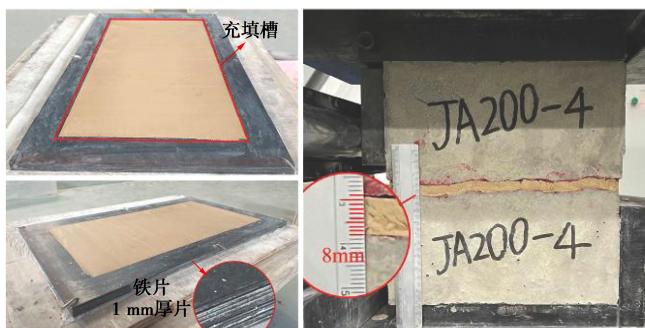


图 4 充填结构面试样制备过程

Fig. 4 Sample preparation process of infilled joints

1.2 试验方案

采用课题组自主研发的结构面抗剪强度尺寸效应试验系统 (MS-DST)^[32]开展充填结构面直剪试验, 如图 5 所示。本试验在常法向应力下开展了 60 组直剪试验, 其中 $Jab-c$ 表示尺寸为 b 的结构面在法向应力 a 和充填度 c 条件下的试验编号, 共 4 种结构面尺寸 (100, 200, 300, 400 mm), 5 种充填度 ($t/a=0, 0.6, 1.0, 1.6, 2.0$), 3 种法向应力 (0.4, 0.8, 1.2 MPa)。当试验加载时, 首先以应力控制方式施加法向应力直至目标值, 加载速率为 0.25 kN/s; 然后切向应力采用位移控制方式, 以恒定速率 1.2 mm/min 施加剪切力, 当剪切达到目标位移时停止试验。

2 多尺寸充填结构面剪切试验结果

2.1 剪应力-剪切位移曲线

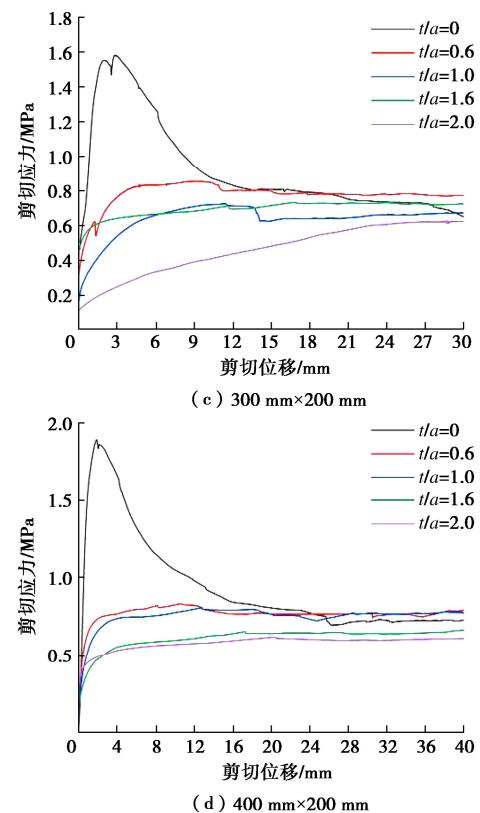
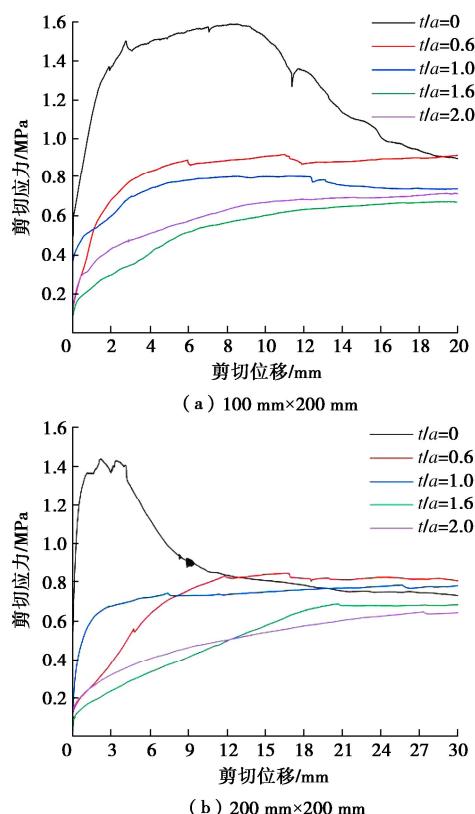
不同充填度下系列尺寸结构面的剪应力-剪切位移曲线如图 6 所示, 以 1.2 MPa 为例。由图 6 可知, 无充填结构面的剪应力-剪切位移曲线存在明显的峰值剪应力和剪应力下降, 其剪应力随剪切位移快速增长, 直至出现弧形段并达到峰值剪应力, 对应的剪切位移



图5 结构面抗剪强度尺寸效应试验系统

Fig. 5 Test system for size effect of shear strength of joints

增量较小, 持续时间较短; 随后进入应力软化阶段, 剪应力随着剪切位移的增加而持续减小或达到残余剪切强度。上下结构面咬合紧密, 随着剪切位移增加, 结构面粗糙凸起体发生剪断, 以结构面上、下表面的滑动摩擦为主, 从而产生明显峰值。充填结构面剪应力-剪切位移曲线无明显的峰值剪应力和剪应力下降。初始时剪应力随着剪切位移增加而持续增加, 当剪切位移增加到一定程度时, 剪应力表现出略微增加或保持恒定。其原因是充填厚度大于平均起伏差时, 上下结构面咬合度偏低, 以充填物的挤压滑动摩擦为主, 表现出无明显峰值。总体而言, 随着充填度的增加, 剪切弹性变形阶段减小, 试件峰值剪应力逐渐下降, 且逐渐趋于一个定值。

图6 $\sigma_n=1.2$ MPa下系列尺寸结构面剪应力-剪切位移曲线Fig. 6 Shear stress-shear displacement curves of joints with series sizes at $\sigma_n=1.2$ MPa

2.2 剪切破坏特征

为了更好地确定不同尺寸结构面的临界充填度(t/a)_{cr}, 可以通过对比分析不同充填度的结构面表面形貌和充填介质的破坏特征确定, 并对充填结构面的剪损区域进行标记, 以1.2 MPa为例, 见表2。不同尺寸结构面的剪切破坏特征存在统一规律: ①针对无充填结构面, 大尺寸与小尺寸的结构面形貌破坏区域存在一定重合; ②随着充填度增加, 结构面表面的剪切磨损面积逐渐减小, 当充填度达到某一值时, 主要沿着充填介质发生滑动破坏。

不同充填度条件下结构面剪切破坏模式存在一定差异, 具体可分为3种:

(1) “岩-岩”剪断破坏, 当充填度 $t/a=0$ 时, 结构面上、下表面的粗糙凸起体产生明显剪切擦痕, 大量微凸体被剪断挤碎而产生灰色颗粒物, 同时沿剪切方向的结构面上边界和右边界上的粗糙凸起体被大面积剪断。

(2) 以“岩-岩”剪损、“岩-土界面”滑动混合破坏为主, 当充填度 $0 < t/a < (t/a)_{cr}$ 时, 结构面上、下表面形成剪切硬化带; 挤压硬化的充填物在剪切过程中, 产生淡红色的滑动摩擦痕迹和剪切磨损, 且摩擦痕迹和剪损面积随着结构面尺寸的增加而增加; 当剪切到某一阶段时, 由“岩-土界面”滑动破坏转化为

表 2 系列尺寸充填结构面剪切破坏模式

Table 2 Shear failure modes of infilled joints with series sizes

充填度 t/a	结构面尺寸/(mm×mm)				破坏模式
	100×200	200×200	300×200	400×200	
0.0					“岩-岩”剪断 破坏
0.6					
1.0					以“岩-岩”剪 损及“岩-土界 面”滑动破坏 为主
1.6					
2.0					以“岩-土界 面”滑动破坏 为主

注：其中充填度 $t/a=1.6$ 时，尺寸为 $100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 、 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的结构面破坏模式以“岩-土界面”滑动破坏为主。

“岩-岩”剪损破坏。

(3) 以“岩-土界面”滑动破坏为主，当充填度 $t/a \geq (t/a)_{cr}$ 时，结构面表面的粗糙凸起体被完全覆盖，结构面形貌未发生剪切破坏，上盘结构面大部分沿着挤压硬化的充填物表面产生滑动摩擦，而仅有小部分镶嵌于结构面形貌中的充填物发生剪切破坏。部分试样如尺寸为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ，充填度 $t/a=1.6$ 时的结构面右侧表面似乎发生剪切磨损，这是由于剪切结束后，在人工分离上下盘结构面过程中，因充填介质间的黏附性较强而导致油漆黏连，同时导致下盘结构面的部分充填介质黏连于上盘结构面。

3 充填结构面抗剪强度尺寸效应

3.1 不同充填度下抗剪强度尺寸效应规律

为了更好地分析结构面峰值抗剪强度尺寸效应规律，对各级应力条件下的峰值抗剪强度取平均值并绘制试验结果曲线（见图 7），并提出参数整体波动率 η' （见式（4））和连续尺寸波动率 η （见式（5））评价尺寸效应，即：当 $|\eta'| \leq 10\%$ 且 $|\eta| \leq 10\%$ 为无明显尺寸效应规律，当 $\eta' > 10\%$ 且 $\eta > 0$ 为正尺寸效应规律，

当 $\eta' < -10\%$ 且 $\eta < 0$ 为负尺寸效应规律。

$$\eta' = \frac{\tau_p^{400} - \tau_p^{100}}{\tau_p^{100}} \times 100\% , \quad (4)$$

$$\eta = \frac{\tau_p^j - \tau_p^{j-100}}{\tau_p^{j-100}} \times 100\% . \quad (5)$$

式中： τ_p 为峰值抗剪强度； η 为连续尺寸峰值抗剪强度统计均值波动率； η' 为统计均值整体增长率，其中正号为增加，负号为减小； j 的取值为 200, 300, 400。

(1) 充填度 $t/a = 0$

由图 7 可知，总体上各尺寸结构面峰值抗剪强度随法向应力的增加而增加。无充填结构面的峰值抗剪强度统计均值随着结构面尺寸的增加而逐渐增加，其整体增长率 η' 为 $+26.83\%$ ，连续尺寸波动率 η 分别为 $+6.93\%$ ， $+13.16\%$ ， $+4.81\%$ ，极差为 0.272 MPa ，呈现正尺寸效应规律。

(2) 充填度 $t/a = 0.6$

充填度 $t/a = 0.6$ 的结构面峰值抗剪强度统计均值随着结构面尺寸增加而略微减小，整体波动率 η' 为 -9.54% ，连续尺寸波动率 η 分别为 -9.63% ， $+5.08\%$ ， -5.25% ，极差为 0.064 MPa ；3 种法向应力的连续尺寸

峰值抗剪强度累计变化量 $\Delta\tau_p$ 分别为 -0.090 , -0.099 , -0.085 MPa(见式(6)), 呈现无明显尺寸效应变化趋势。

$$\Delta\tau_p = \sum_{j=200}^{400} \tau_p^j - \tau_p^{j-100} \quad . \quad (6)$$

(3) 充填度 $t/a=1.0$

充填度 $t/a=1.0$ 的结构面峰值抗剪强度统计均值随着结构面尺寸的增加而略微增加, 整体波动率 η' 为 $+1.05\%$, 连续尺寸波动率 η 分别为 $+1.08\%$, -5.68% , $+5.99\%$, 极差为 0.032 MPa; 3 种法向应力的 $\Delta\tau_p$ 分别为 0.001 , 0.011 , 0.005 MPa, 呈现无明显尺寸效应变化趋势。

(4) 充填度 $t/a=1.6$

充填度 $t/a=1.6$ 的结构面峰值抗剪强度统计均值随着结构面尺寸的增加而略微减小, 整体波动率 η' 为 -5.27% , 连续尺寸波动率 η 分别为 -0.93% , $+3.98\%$, -8.03% , 极差为 0.041 MPa; 3 种法向应力的 $\Delta\tau_p$ 分别为 -0.016 , -0.057 , -0.006 MPa, 呈现无明显尺寸效应变化趋势。

(5) 充填度 $t/a=2.0$

充填度 $t/a=2.0$ 的结构面峰值抗剪强度统计均值随着结构面尺寸的增加而略微减小, 整体波动率 η' 为 -5.61% , 连续尺寸波动率 η 分别为 -1.84% , -2.83% , -1.04% , 极差为 0.030 MPa; 3 种法向应力的 $\Delta\tau_p$ 分别为 0.038 , -0.025 , -0.093 MPa, 呈现无明显尺寸效应变化趋势。

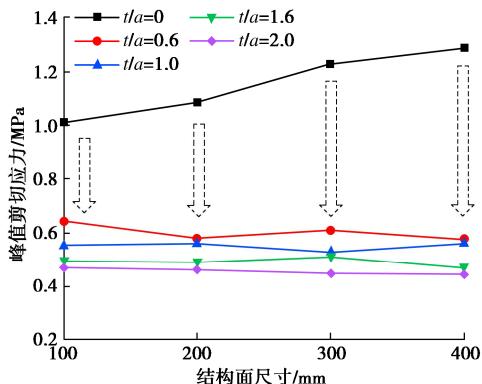


图 7 不同充填度下抗剪强度尺寸效应规律

Fig. 7 Size effect laws of shear strength under different infill ratios

3.2 临界充填度尺寸效应规律

(1) 不同尺寸临界充填度确定

目前, 众多学者通过对充填结构面开展室内直剪试验, 研究发现当达到临界充填度时, 结构面抗剪强度与充填物的抗剪强度相近, 但本文达到临界充填度时, 主要以“岩-土界面”滑动破坏为主, 仅小部分发生充填物剪切破坏, 其抗剪强度大于充填物的抗剪强度, 与 Papaliangas 等^[13]、史玲等^[14]认为当充填厚度大于平均起伏差时, 剪切破坏以充填物与结构面接触部

分破坏、充填物破坏两种形式为主的结论相符。故本文首先将峰值抗剪强度进行归一化处理, 建立其与充填度的负指数关系(见式(7)), 然后将极限值 γ_i 作为临界充填度下的归一化峰值抗剪强度, 与试验强度进行对比确保平均波动率 $\bar{\mu}$ 小于 10% (见式(8)), 并构建其关于法向应力的关系曲线(“岩-土界面”理论强度包络线), 从而获得“岩-土界面”的黏聚力和内摩擦角理论值, 进一步与不同充填度条件下抗剪强度试验值-法向应力的关系曲线(“岩-土界面”试验强度包络线)进行对比, 确定曲线重合度最高且结构面形貌未发生剪损破坏的充填度为临界充填度。

$$\frac{\tau_p}{\sigma_n} = \gamma + \alpha \exp\left(-\beta \frac{t}{a}\right) \quad , \quad (7)$$

$$\bar{\mu} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left| \frac{\tau_{pi}/\sigma_{ni} - \gamma_i}{\gamma_i} \right| \times 100\% \quad . \quad (8)$$

式中: σ_n 为法向应力; γ , α , β 为拟合系数; $\bar{\mu}$ 为 3 种法向应力下归一化峰值抗剪强度平均波动率; τ_{pi}/σ_{ni} 为不同法向应力下归一化峰值抗剪强度试验值; γ_i 为不同法向应力下归一化峰值抗剪强度理论值。

a) 100 mm×200 mm

由于充填物的存在导致结构面归一化峰值抗剪强度逐渐下降, 如图 8 所示。以 1.2 MPa 法向应力下 100 mm×200 mm 的结构面为例, 当充填厚度从 0 mm 增加到 10 mm(即 $t/a=0 \sim 2.0$) 时, 充填结构面的峰值抗剪强度分别下降了 42% , 49% , 57% , 55% 。当充填度 $t/a \geq 1.6$ 时, 发现归一化峰值抗剪强度的下降趋势逐渐减小并趋于稳定, 且充填度 $t/a=1.6$ 时 3 种法向应力下归一化峰值抗剪强度平均波动率 $\bar{\mu}$ 为 9.89% ; 进一步研究发现充填度 $t/a=1.6$ 的结构面试验强度包络线与相应的“岩-土界面”理论强度包络线相近(见图 9(a)), 并且结构面形貌未发生剪损。因此, 100 mm×200 mm 的充填结构面临界充填度 $(t/a)_{cr} = 1.6$ 。

b) 200 mm×200 mm

当法向应力为 1.2 MPa 时, 200 mm×200 mm 的结构面随着充填厚度从 0 mm 增加到 10 mm 时, 充填结构面的峰值抗剪强度分别下降了 41% , 45% , 52% , 54% 。当充填度 $t/a \geq 1.6$ 时, 拟合得到的负指数函数曲线逐渐趋于稳定, 且充填度 $t/a=1.6$ 时平均波动率 $\bar{\mu}$ 为 2.38% ; 进一步对比发现充填度 $t/a=1.6$ 的结构面试验强度包络线与相应的“岩-土界面”理论强度包络线相近(见图 9(b)), 并且结构面形貌未发生剪损。因此, 200 mm×200 mm 的充填结构面临界充填度 $(t/a)_{cr} = 1.6$ 。

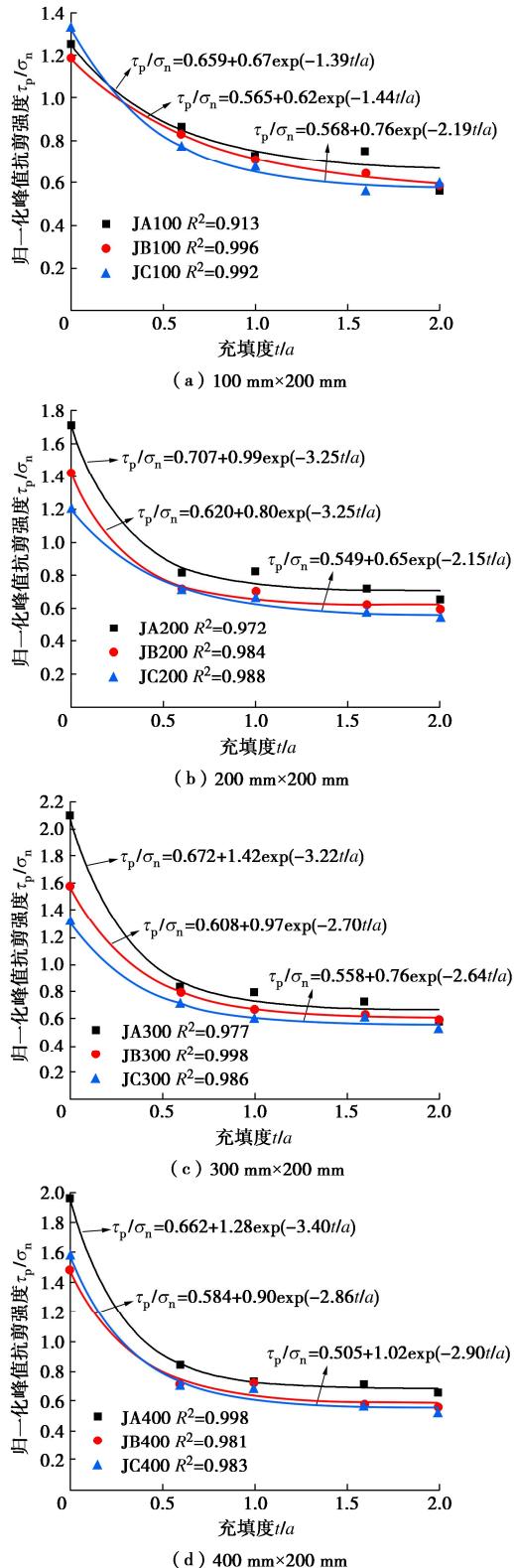


图 8 归一化峰值抗剪强度随充填度的变化规律

Fig. 8 Variation laws of normalized peak shear strength with infill ratios

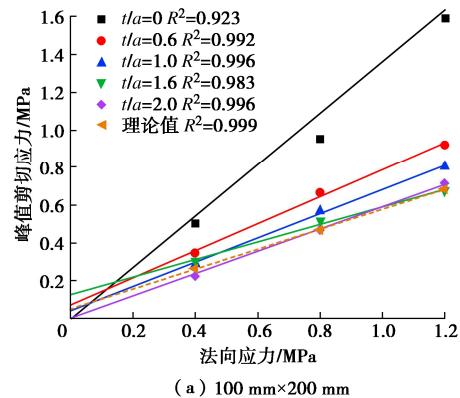
c) 300 mm × 200 mm

针对尺寸为 300 mm × 200 mm 的结构面, 以 1.2 MPa 为例, 当充填厚度从 0 mm 增加到 10 mm 时, 充填结构面的峰值抗剪强度分别下降了 46%, 54%, 54%, 60%。当充填度 $t/a \geq 2.0$ 时, 拟合得到的负指数函数曲线逐渐趋于稳定, 且 $t/a = 2.0$ 时平均波动率

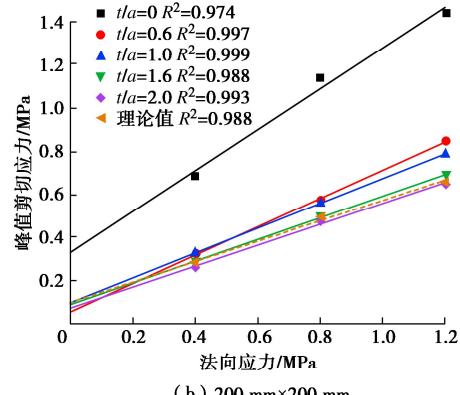
$\bar{\mu}$ 为 6.77%; 进一步研究发现充填度 $t/a = 2.0$ 的结构面试强度包络线与相应的“岩-土界面”理论强度包络线相近(见图 9(c)), 并且结构面形貌未发生剪损。因此, 300 mm × 200 mm 的充填结构面临界充填度 $(t/a)_{cr} = 2.0$ 。

d) 400 mm × 200 mm

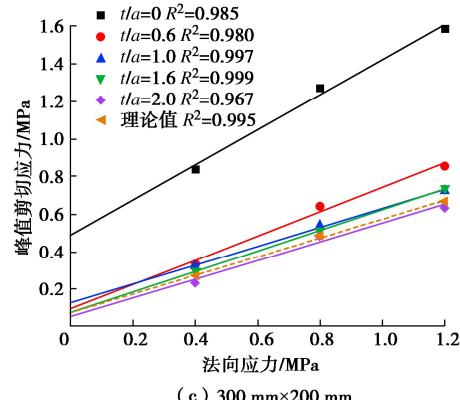
当充填厚度从 0 mm 增加到 10 mm 时, 以 1.2 MPa 为例, 尺寸为 400 mm × 200 mm 的充填结构面的峰值抗剪强度分别下降了 55%, 57%, 64%, 67%。当 $t/a \geq 2.0$ 时, 拟合得到的负指数函数曲线逐渐趋于稳定, 且 $t/a = 2.0$ 时平均波动率 $\bar{\mu}$ 为 2.67%; 进一步对比发现充填度 $t/a = 2.0$ 的结构面试强度包络线与相应的“岩-土界面”理论强度包络线几乎重合(见图 9(d)), 并且结构面形貌未发生剪损。因此, 400 mm × 200 mm 的充填结构面临界充填度 $(t/a)_{cr} = 2.0$ 。



(a) 100 mm×200 mm



(b) 200 mm×200 mm



(c) 300 mm×200 mm

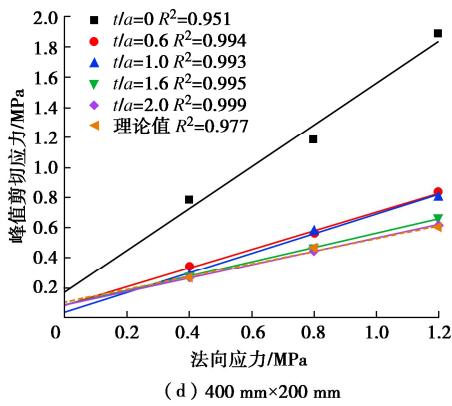


图 9 不同尺寸结构面抗剪强度包络线

Fig. 9 Shear strength envelopes of joints with different sizes

(2) 临界充填度尺寸效应规律分析

图 10 为临界充填度及对应峰值抗剪强度随结构面尺寸变化曲线。可见在不考虑结构面平均起伏角的影响下, 充填结构面的临界充填度呈现出沿剪切方向随着结构面尺寸增加而增加的变化趋势, 变化范围为 1.6~2.0; 同时, 相同临界充填度下结构面尺寸 100 mm 和 200 mm 的峰值抗剪强度统计均值近似相等, 300 mm 和 400 mm 也近似相等, 并且结构面尺寸从 200 mm 增加到 300 mm 的峰值抗剪强度与临界充填度呈负相关性, 其 3 种法向应力下的平均衰减率为 9.7%。

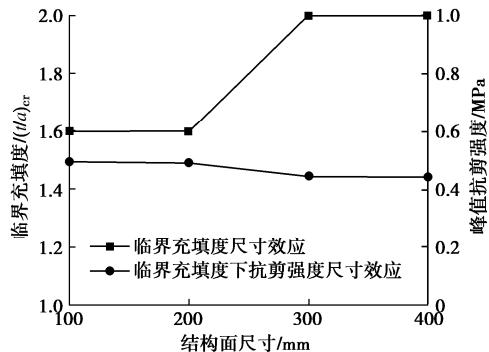


图 10 临界充填度尺寸效应规律

Fig. 10 Size effect laws of critical infill ratio (t/a)_{cr}

4 尺寸效应机理

4.1 不同充填度下抗剪强度尺寸效应机理

(1) 无充填结构面

3 种法向应力下的连续尺寸结构面峰值抗剪强度累计变化量, 均表现为正尺寸效应现象。连续尺寸结构面平均起伏高度随着尺寸的增加而逐渐增加, 分别为 8.36, 12.98, 17.34, 22.02 mm (见式(9))。因此, 在不考虑平均起伏角的影响下, 平均起伏高度是影响抗剪强度尺寸效应的主导因素, 结构面平均起伏高度逐渐增加, 导致抵抗表面抗剪强度增加, 从而表现出正尺寸效应现象。与 Ban 等^[33]认为岩体结构面粗糙度

是由局部粗糙度与整体起伏高度共同决定的结论相符。

$$R_Z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - z_{\min}) \quad . \quad (9)$$

式中: R_Z 为平均起伏高度; z_i , z_{\min} 分别为结构面表面的 z 坐标及 z 坐标上的最低点。

(2) 充填结构面

充填介质在剪切过程中削弱了上下盘结构面粗糙凸起体的相互作用, 随着充填厚度的增加直至粗糙凸起体不发生剪切破坏, 并在结构面表面形成剪切硬化带, 使得表面粗糙凸起体被覆盖从而更加光滑, 局部粗糙度和平均起伏高度的作用被削弱, 导致结构面爬坡效应减弱。不同尺寸结构面的衰减系数 β 变化趋势, 如图 11 所示, 发现衰减系数 β 随着结构面尺寸的增加而逐渐增加, 从而充填厚度对结构面爬坡效应的抑制作用更明显, 使得结构面抗剪强度由正尺寸效应向无明显尺寸效应现象过渡。

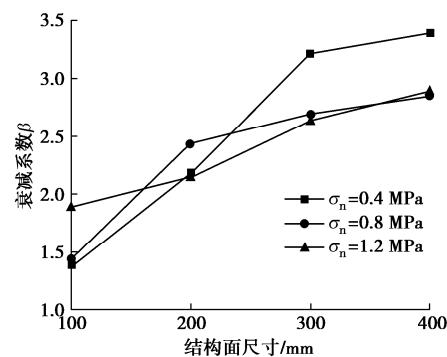


图 11 不同尺寸结构面衰减系数变化趋势

Fig. 11 Variation trend of attenuation coefficient of joints with different sizes

4.2 临界充填度尺寸效应机理

(1) 充填方向的临界充填度尺寸效应机理

结构面抗剪强度均随充填度增加而减小, 直至达到临界充填度时峰值抗剪强度趋于稳定。当充填度小于临界充填度时, 剪切过程中结构面上下岩壁在发生很小的剪切位移时就会产生接触, 表面粗糙凸起体开始参与剪切作用, 发生“岩-岩”剪损及“岩-土界面”滑动混合破坏并且产生剪胀效应, 上下盘结构面表面相对高的粗糙凸起体发生剪切作用后达到峰值抗剪强度, $a-b$ 为混合破坏剪切破坏线, 如图 12 (a) 所示。当充填度大于临界充填度时, 充填介质逐渐隔绝结构面上下岩壁之间的接触作用导致剪胀效应逐渐减弱, 在产生剪切滑移后达到峰值抗剪强度, 结构面主要以“岩-土界面”滑动破坏为主, $c-d$ 为充填物与结构面接触部分剪切破坏线, 如图 12 (b) 所示; 由于受直剪仪器的无侧限剪切盒影响, 剪切力作用在

上盘结构面，对充填材料产生偏应力，导致上盘结构面沿着充填物表面产生滑动摩擦，但结构面表面粗糙凸起体未发生剪损破坏；因此，其抗剪强度相比于侧限土体剪切试验获取的剪切强度偏大，与以往学者的纯充填物剪切破坏存在一定差异。后续将开展不同尺寸“岩-土界面”剪切特性研究，获取其黏聚力和内摩擦角试验值，进一步验证由“岩-土界面”抗剪强度确定的临界充填度。

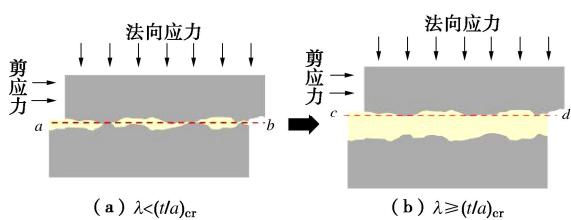


图 12 不同破坏模式示意图

Fig. 12 Schematic diagram of different failure modes

(2) 剪切方向的临界充填度尺寸效应机理

充填结构面的临界充填度呈现出随着结构面尺寸的增加而增大的变化趋势，临界充填度受法向应力、结构面形貌特征等影响，但试验结果显示在低法向应力 0.4, 0.8, 1.2 MPa 下的临界充填度无明显变化规律。随着结构面尺寸的增加，临界充填度受形貌特征变化影响显著，剪切过程中界面处充填物不断被结构面的粗糙界面铲刮压密，形成硬化剪切带，相对低的粗糙凸起体被充填物完全填充而产生“岩-土界面”滑动，相对高的粗糙凸起体产生爬坡效应，剪切更难推进从而导致部分充填物以塑性流动方式挤出，当充填厚度小于临界充填度时，破坏模式逐渐由“岩-土界面”滑动破坏转变为“岩-岩”剪损破坏。

结合等高线云图分析渐进扩大区域的平均起伏高度变化，如图 13 所示，I 区域和 II 区域平均起伏高度相对较低，故充填度 $t/a = 1.6$ 时达到临界值；I-III 区域、I-IV 区域分别受 III、III-IV 渐进扩大区域平均起伏高度增加的影响，产生更明显的爬坡效应，从而临界充填度增加到 2.0。

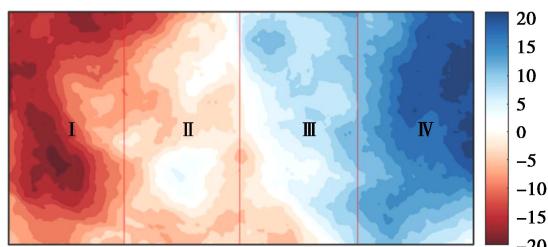


图 13 结构面表面形貌等高线云图

Fig. 13 Contour cloud map of surface morphology of joints

5 结 论

本文利用自主研制的结构面抗剪强度尺寸效应试验系统，开展了具有三维形貌特征的充填结构面剪切力学与破坏特征试验研究，分析了临界充填度和抗剪强度尺寸效应规律及机理，主要得到以下 3 点结论。

(1) 系列尺寸无充填和充填结构面的剪应力-剪切位移曲线主要区别在于有无明显的峰值剪应力和剪应力下降；随着充填度的增加，结构面剪切破坏模式主要由“岩-岩”剪断破坏逐渐转变为“岩-土界面”滑动破坏，而其破坏模式不受尺寸影响。

(2) 结构面抗剪强度均随充填度增加而减小，直至达到临界充填度时趋于稳定；并且临界充填度沿剪切方向随着结构面尺寸的增加而逐渐增加，变化范围为 1.6~2.0，主要原因是平均起伏高度随着结构面尺寸的增加而逐渐增加，导致充填结构面的局部凸起体剪损区域逐渐向渐进扩大区域转移。

(3) 无充填结构面的峰值抗剪强度呈现正尺寸效应现象，整体增长率为 26.83%；充填结构面峰值抗剪强度呈现无明显尺寸效应的变化趋势，不同充填度下整体波动率的绝对值均小于 10%。主要是由于充填物的存在而削弱结构面爬坡效应；同时，衰减系数 β 随着结构面尺寸的增加而逐渐增加，使得充填厚度对结构面爬坡效应的抑制作用更明显。

参 考 文 献：

- [1] JIANG Q, SONG L B, YAN F, et al. Experimental investigation of anisotropic wear damage for natural joints under direct shearing test[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, **20**(4): 04020015.
- [2] ZHOU D, ZHAO Z H, LI B, et al. Permeability evolution of grout infilled fractures subjected to triaxial compression with low confining pressure[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, **104**: 103539.
- [3] 祝艳波, 张宇轩, 李文杰, 等. 粗糙度对硅质板岩-泥岩界面强度与变形特性影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, **41**(7): 1358-1372. (ZHU Yanbo, ZHANG Yuxuan, LI Wenjie, et al. Experimental study on effect of roughness on strength and deformation characteristics of interface between siliceous slate and mudstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, **41**(7): 1358-1372. (in Chinese))
- [4] ZHAO Z H, LIN T, CHEN Y D, et al. Shear behaviors of natural rock fractures infilled with cemented calcite[J]. Computers and Geotechnics, 2022, **141**: 104493.

- [5] HAN G S, JING H W, JIANG Y J, et al. Effect of cyclic loading on the shear behaviours of both unfilled and infilled rough rock joints under constant normal stiffness conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, **53**(1): 31-57.
- [6] WU D Y, CHEN F, TANG L, et al. Influence of weak interlayer filling state on the failure patterns of natural rock joints[J]. International Journal of Geomechanics, 2022, **22**(7): 04022086.
- [7] 许万忠, 林杭, 曹日红. 充填粗糙节理直剪数值模拟宏观分析[J]. 西南交通大学学报, 2018, **53**(3): 548-557. (XU Wanzhong, LIN Hang, CAO Rihong. Simulation and macro-mesoscopic parameter analysis for direct shear of filled rough joints[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, **53**(3): 548-557. (in Chinese))
- [8] LADANYI B, ARCHAMBAULT G. Shear strength and deformability of filled indented joints[C]//Proceedings of International Symposium on Geotechnics of Structurally Complex Formations, Capri, Italy, 1977.
- [9] TANG J Z, YANG S Q, ZHAO Y L, et al. Experimental and numerical modeling of the shear behavior of filled rough joints[J]. Computers and Geotechnics, 2020, **121**: 103479.
- [10] 肖维民, 余欢, 朱占元, 等. 薄层充填岩石节理剪胀特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(8): 1499-1508. (XIAO Weimin, YU Huan, ZHU Zhanyuan, et al. Experimental study on shear dilatancy characteristics of thinly-infilled rock joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(8): 1499-1508. (in Chinese))
- [11] 肖维民, 余欢, 李锐, 等. 薄层充填岩石节理抗剪强度特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(增刊2): 3420-3428. (XIAO Weimin, YU Huan, LI Rui, et al. Experimental research on the shear strength of thinly-infilled rock joints during shearing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(S2): 3420-3428. (in Chinese))
- [12] KARAKUS M, LIU Y, ZHANG G C, et al. A new shear strength model incorporating influence of infill materials for rock joints[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2016, **2**(3): 183-193.
- [13] PAPALIANGAS T, HENCHER S R, LUMSDEN A C, et al. The effect of frictional fill thickness on the shear strength of rock discontinuities[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1993, **30**(2): 81-91.
- [14] 史玲, 蔡美峰, 赵坚. 充填节理破坏机理及实验[J]. 北京科技大学学报, 2012, **34**(3): 253-259. (SHI Ling, CAI Meifeng, ZHAO Jian. Fracture mechanism and experiment of infilled rock joints[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, **34**(3): 253-259. (in Chinese))
- [15] ZHAO Y L, LI Y, CHANG L, et al. Shear behaviors of clay-infilled joint with different water contents: experiment and model[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, **14**(17): 1-16.
- [16] PHIEN-WEJ N, SHRESTHA U B, RANTUCCI G. Effect of infill thickness on shear behaviour of rock joints[C]//Proceedings of the International Conference on Rock Joints, Loen, 1990: 289-294.
- [17] INDRARATNA B, WELIDENIYA H S, BROWN E T. A shear strength model for idealized filled joints under constant normal stiffness[J]. Géotechnique, 2005, **55**(3): 215-226.
- [18] SHRIVASTAVA A K, RAO K S. Physical modeling of shear behavior of infilled rock joints under CNL and CNS boundary conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, **51**(1): 101-118.
- [19] JAHANIAN H, SADAGHIANI M H. Experimental study on the shear strength of sandy clay infilled regular rough rock joints[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, **48**(3): 907-922.
- [20] ZHAO Y L, ZHANG L Y, WANG W J, et al. Experimental study on shear behavior and a revised shear strength model for infilled rock joints[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, **20**(9): 04020141.
- [21] WEI Y, MING M. Investigation on the scale dependence of shear mechanical behavior of rock joints using DEM simulation[J]. Computational Particle Mechanics, 2023, **10**: 1613-1627.
- [22] JEFFERY M, HUANG J, FITYUS S, et al. A large-scale application of the stochastic approach for estimating the shear strength of natural rock discontinuities[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, **56**(8): 6061-6078.
- [23] 罗战友, 杜时贵, 黄曼. 岩石结构面峰值摩擦角应力效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(6): 1142-1148. (LUO Zhanyou, DU Shigui, HUANG Man. Experimental study of stress effect on peak friction angle of rock structural plane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(6): 1142-1148. (in Chinese))
- [24] BANDIS S C, LUMSDEN A C, BARTON N R. Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock

- joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 1981, **18**(1): 1-21.
- [25] HUANG M, HONG C J, DU S G, et al. Experimental technology for the shear strength of the series-scale rock joint model[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, **53**(12): 5677-5695.
- [26] JOHANSSON F. Influence of scale and matedness on the peak shear strength of fresh, unweathered rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, **82**: 36-47.
- [27] BAHADDINI M, HAGAN P C, MITRA R, et al. Scale effect on the shear behaviour of rock joints based on a numerical study[J]. Engineering Geology, 2014, **181**: 212-223.
- [28] KANG Y S, HOU C C, LIU B, et al. Influence of water content on the shear strength of rock joints with clay-rich fillings[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, **56**(2): 1437-1449.
- [29] MENG F Z, ZHOU H, WANG Z Q, et al. Influences of shear history and infilling on the mechanical characteristics and acoustic emissions of joints[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, **50**(8): 2039-2057.
- [30] SHE C X, SUN F T. Study of the peak shear strength of a cement-filled hard rock joint[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, **51**(3): 713-728.
- [31] TATONE B, GRASSELLI G. An investigation of discontinuity roughness scale dependency using high-resolution surface measurements[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, **46**(4): 657-681.
- [32] 杜时贵, 吕原君, 罗战友, 等. 岩体结构面抗剪强度尺寸效应联合试验系统及初级应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(7): 1337-1349. (DU Shigui, LÜ Yuanjun, LUO Zhanyou, et al. Combined test system for size effect of rock joint shear strength and its primary application research[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(7): 1337-1349. (in Chinese))
- [33] BAN L R, DU W S, QI C Z, et al. Modified 2D roughness parameters for rock joints at two different scales and their correlation with JRC[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, **137**: 104549.

第三十一届全国土工测试学术研讨会（第1号通知） (中国·新疆·乌鲁木齐 2025年7月25日)

为了推动“一带一路”战略实施，促进新疆地区的岩土工程技术发展，加强国内外专家学者的交流与合作，第三十一届全国土工测试学术研讨会将于2025年7月25日—7月27日在乌鲁木齐举行，本次会议主题为“携手共建“一带一路”，促进新疆岩土发展”。会议将汇聚国内外著名专家，进行特邀报告和主题演讲，并展示最新的土工测试设备和技术。我们诚挚邀请国内外的专家、学者和工程技术人员参与此次会议，共同探讨解决新疆及“一带一路”沿线岩土工程难题的创新技术和解决方案。

主办单位：中国土木工程学会土力学及岩土工程分会；中国水利学会岩土力学专业委员会。

会议主题：冻土地质条件勘察和基本性质测试技术；盐渍土原位测试和基本性质测试技术；风积沙基本性质测试技术；冻融环境下土工物理模型试验技术；盐胀环境下土工物理模型试验技术；地震活动区土工原位测试技术；膨胀土性质测试技术；粗粒土性质测试技术；混合土性质测试技术；土工测试新

型技术设备。

论文征集：欢迎就本届研讨会交流内容提交论文，论文将通过组委会审查、专家遴选推荐到《岩土工程学报》(增刊)(EI收录)、《新疆大学学报(自然科学版)》、《水力发电》等期刊发表。论文篇幅一般在5页以内，格式请参考《岩土工程学报》。此外部分论文会被推荐到《应用基础与工程科学学报》(EI收录)、《长江科学院院报》、《人民长江》和《水利水电快报》进行发表，其中《应用基础与工程科学学报》、《长江科学院院报》和《人民长江》会以专栏形式发表，《水利水电快报》会以专辑形式发表。论文征集邮箱：geotest2025@126.com。2024年11月30日前提交论文全文，2024年12月31日前返回论文录用通知，2025年2月31日前返回修改后论文。

联系方式：地址：新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市水磨沟区华瑞街777号新疆大学(博达校区)建筑工程学院；邮编：830047；联系人：刘欢 15241828240，秦溯 15160925936，王存根 15299051092。

(会议组委会 供稿)