

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.0133

基于颗粒流的天然多形貌充填节理剪切特性研究

朱跨丰¹, 罗战友^{1*}, 吴强², 吴晖², 李干¹

(1. 宁波大学 岩石力学研究所, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波市市域铁路投资发展有限公司, 浙江 宁波 315101)

摘要: 节理剪切特性是影响岩体稳定性的重要因素, 因此根据天然原岩节理起伏形貌曲线, 采用颗粒流数值计算方法开展了天然多形貌无充填及充填厚度为 15 mm 和 75 mm 的节理剪切特性试验, 分析节理起伏形貌和充填厚度对剪切特性及抗剪强度的影响。研究表明: (1) 随着充填厚度的增大, 起伏形貌对节理峰前硬化、峰后软化的峰值特征影响降低, 峰后软化程度下降。(2) 同起伏形貌的节理随着充填厚度的增大, 试样由节理剪切破坏向软弱夹层剪切破坏过渡。充填度小于 2 时, 主要是节理剪切破坏和节理-夹层耦合破坏; 充填度大于 2 时, 主要发生软弱夹层剪切破坏。(3) 充填度小于 2 时, 结构面峰值抗剪强度随充填度增大呈减小规律; 当充填度大于 2 时, 结构面峰值抗剪强度无明显变化。

关键词: 充填节理; 抗剪强度; 剪切特性; 数值模拟; 起伏形貌

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2024) 05-0035-06

节理是影响岩体稳定性的重要因素, 其软弱夹层的存在更使节理剪切特性的分析变得复杂, 同样软弱夹层也是导致工程岩体节理产生破坏的主要影响因素。由于充填厚度变化及节理起伏形貌差异, 使充填节理剪切强度参数取值也有变化, 影响了岩体节理稳定性评价, 因此开展不同起伏形貌及充填厚度条件下的节理剪切特性研究具有重要意义。

室内试验是研究充填节理剪切特性最常见方式。Shrivastava 等^[1]开展不同边界条件下锯齿状软弱充填节理剪切试验, 研究恒定法向刚度 (Contant Normal Stiffness, CNS) 和恒定法向载荷 (Contant Normal Load, CNL) 条件下充填节理剪切特性规律。Indraratna 等^[2]进行了规则人工节理室内剪切试验, 分析充填度对节理抗剪强度影响。Mirzaghobanali 等^[3]通过对规则锯齿状模拟岩石节理试件进行试验, 研究了充填节理在不同充填度下的剪胀特性。Han 等^[4]通过对充填石膏和砂混合料的模拟岩石节理进行循环剪切试验, 研究充填节理在法向刚度

条件下的剪切特性。刘婷婷等^[5]采用砂土充填物模拟软弱夹层, 砂浆试样模拟岩石, 研究平直充填节理的剪切实力学性质。肖维民等^[6]以石英砂作为充填物质, 通过剪切试验分析充填度、节理表面粗糙度等因素对薄充填岩石抗剪强度的影响。虽然室内试验在揭示岩体力学性质方面具有一定客观性, 但受到多种因素干扰, 难以获得完全一致的样品, 从而对试验结果造成一定影响。

随着计算机技术的不断发展, 数值模拟^[7]克服了许多室内试验中的不足。连莲等^[8]采用 PFC^{2D} 数值软件分析充填节理的变形特性及破坏行为, 研究了充填厚度对节理剪切强度的影响关系。王刚等^[9]利用 PFC^{2D} 对不同粗糙度的充填节理面进行组合模拟, 研究了异性充填节理的剪切破坏特征。许万忠等^[10]利用 PFC^{2D} 探讨了充填节理粗糙度、充填介质强度、岩壁刚度等对节理剪切特性的影响。Karakus 等^[11]采用 PFC^{3D} 模拟任意三维粗糙节理面充填黏土进行试验, 分析充填厚度、法向应力等对节理抗剪强度的影响, 并提出了相应的抗剪强度

收稿日期: 2024-01-24.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金 (4227147)。

第一作者: 朱跨丰, 硕士研究生, 主要研究方向: 岩体结构面。E-mail: 1026721376@qq.com

*通信作者: 罗战友, 教授, 主要研究方向: 岩体结构面、隧道及桩基工程。E-mail: lzy0395@163.com

经验计算公式. Duriez 等^[12]利用离散元数值模拟方法, 通过对人造理想节理面进行充填, 研究了充填节理的剪切特性. 宋浪等^[13]采用颗粒流数值模拟方法研究不同节理倾角、多条节理数以及不同节理厚度情况下充填节理岩石的力学参数变化规律、微裂纹发育状况和最终破坏形态特点. 尽管已有许多数值模拟用于充填节理剪切试验的研究, 但这些都主要集中在规则锯齿形、平直形节理面或单一起伏形貌等, 缺乏对于天然多形貌充填节理的剪切模拟研究, 这种局限性使得我们难以获得对充填节理剪切特性的全面了解.

因此, 本文基于天然原岩节理起伏形貌曲线, 利用 PFC^{2D} 颗粒流数值模拟软件建立充填节理剪切模型, 研究多形貌和不同充填厚度对充填节理抗剪强度的影响, 以期获得天然多形貌充填节理剪切特性的变化规律.

1 充填节理剪切模型构建及试验设计

1.1 模型构建及参数标定

PFC^{2D} 是利用显式差分算法和离散元理论开发的力学程序, 被国内外学者广泛接受并用来模拟岩石剪切破坏、裂纹起裂等^[14-15]情况. 其采用平行黏结模型^[16]作为岩石剪切数值模拟试样的黏结方式, 能够同时传递力和力矩, 准确模拟黏结断裂导致的岩石宏观刚度衰减, 更符合岩石材料的力学特性. 本文利用 PFC^{2D} 建立一个 100 mm × 200 mm 剪切盒模型(图 1). 剪切盒由 6 面墙体组成, 其中墙 1、墙 2 和墙 3 体向右施加加载, 墙 4、墙 5 和墙 6 向左施加加载.

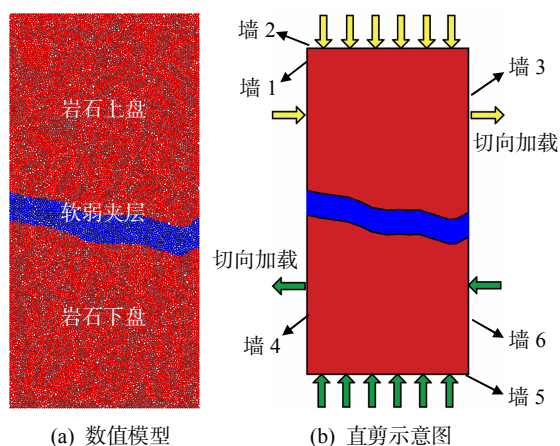


图 1 充填节理剪切模型

根据文献[17]的室内试验数据, 模拟 Hawkesbury 砂岩作为原岩上下盘. 为保证数值模拟准确性, 基于试错法^[18]对计算模型中原岩细观参数进行相应标定, 充填物质根据原岩参数进行弱化处理^[10], 模拟风化、侵蚀后的完整侵入岩. 试验与数值结果参数对比见表 1, 数值模拟细观参数见表 2.

表 1 试验结果与数值结果对比

项目	弹性模量/GPa	泊松比	单轴抗压强度/MPa
试验结果	4.20	0.20	27.40
数值结果	4.28	0.19	27.44

表 2 数值模拟细观参数

参数	数值
接触模量/Pa	1.9×10^9
夹层接触模量/Pa	1.9×10^8
刚度比	1.8
最小粒径/mm	0.5
粒子比	1.2
密度/(kg·m ⁻³)	2 300
平行黏结法向刚度/Pa	1.32×10^7
夹层平行黏结切向刚度/Pa	1.32×10^6
平行黏结切向刚度/Pa	6.8×10^6
夹层平行黏结切向刚度/Pa	6.8×10^5
颗粒间摩擦系数	0.8
局部阻尼	0.7
内摩擦角/(°)	37

1.2 试验方案

为研究同一条连续节理上不同起伏形貌的剪切特性, 将长度为 1 000 mm 的天然原岩节理起伏形貌等距划分, 形成 10 条不同起伏形貌曲线(RJ-1 系列至 RJ-10 系列). 每个系列设置 3 种充填厚度(J-N 组 0 mm、J-L 组 15 mm、J-T 组 75 mm)的试样, 法向荷载均为 1.0 MPa, 具体试验方案详见表 3. 表中的平均起伏是节理形貌二维起伏上下两条切线延长线在节理左右两侧距离的平均值, 充填度是充填厚度与平均起伏的比值^[19].

2 不同充填节理剪切特性的剪切试验

2.1 节理剪切应力与剪切位移关系

节理剪切应力—剪切位移曲线整体呈现峰前硬化、峰后软化的峰值特征, 即在加载初期, 剪切

表3 天然多形貌节理剪切试验方案

系列	起伏形貌	试样尺寸/ (mm×mm)	平均起伏/ mm	J-N 组(0 mm 无充填)		J-L 组(15 mm 薄充填)		J-T 组(75 mm 厚充填)	
				编号	充填度	编号	充填度	编号	充填度
RJ-1		100×200	6.25	J-N1	0	J-L1	2.40	J-T1	12.00
RJ-2		100×200	5.30	J-N2	0	J-L2	2.83	J-T2	14.15
RJ-3		100×200	3.00	J-N3	0	J-L3	5.00	J-T3	25.00
RJ-4		100×200	18.52	J-N4	0	J-L4	0.81	J-T4	4.03
RJ-5		100×200	7.39	J-N5	0	J-L5	2.03	J-T5	10.10
RJ-6		100×200	15.00	J-N6	0	J-L6	1.00	J-T6	5.00
RJ-7		100×200	15.96	J-N7	0	J-L7	0.94	J-T7	4.49
RJ-8		100×200	6.00	J-N8	0	J-L8	2.50	J-T8	12.50
RJ-9		100×200	11.72	J-N9	0	J-L9	1.28	J-T9	6.38
RJ-10		100×200	9.87	J-N10	0	J-L10	1.52	J-T10	7.61

应力随剪切位移的增加呈近似线性增长的峰前硬化现象,并逐渐达到峰值抗剪强度,当进一步加载后,剪切应力开始下降,产生应力跌落的峰后软化现象,最终剪切应力在一定范围内波动。

由表4充填节理抗剪强度及软化程度可知:随着节理充填厚度增大,节理抗剪强度的峰后软化程度下降,无充填节理(0 mm)、薄充填节理(15 mm)和厚充填节理(75 mm)的抗剪强度峰后软化程度分别为74.43%、68.10%和64.49%,呈下降趋势。

表4 充填节理抗剪强度及软化程度

组别	①/MPa	②/MPa	③/MPa	④/MPa	⑤/%
J-N 组(0 mm)	4.13	1.77	2.62	0.67	74.43
J-L 组(15 mm)	2.45	1.32	1.63	0.52	68.10
J-T 组(75 mm)	1.40	1.37	1.38	0.49	64.49

注:①峰值抗剪强度最大值;②峰值抗剪强度最小值;③平均峰值抗剪强度;④平均残余抗剪强度;⑤软化程度。

2.2 节理剪切破坏模式

图2为不同充填节理破坏模式,其中蓝色部分为岩体节理上下盘,绿色部分为充填夹层,红色线条为剪切裂纹。由图2可知:同起伏形貌在不同厚度的充填节理中展现出不同破坏模式。在无充填条件下(图2(a)),裂纹主要集中在节理面交汇处,试样上下盘存在裂纹发育,呈现节理剪切破坏模式;而在薄充填条件下(图2(b)),裂纹更集中在软弱夹层部分,节理面受到轻微的剪切破坏,试样上下盘裂纹较少,呈现出节理-夹层耦合破坏模式;

在厚充填条件下(图2(c)),裂纹同样集中在软弱夹层部分,但试样上下盘并没有明显的裂纹发育,表现出软弱夹层剪切破坏模式。

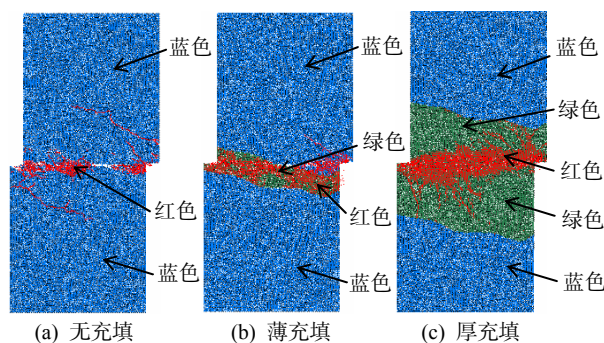


图2 不同充填节理破坏模式

2.3 接触力链及应力分析

充填节理接触力链分布如图3所示,充填节理主应力分布如图4所示。由图3和图4可知,在充填节理剪切加载的演化过程中,初期表现为充填节理整体受载荷,其接触力链分布呈现杂乱态势(图3(a))。随着剪切的进行,接触力链趋向于集中在节理和夹层接触面,最终导致充填节理-夹层的耦合破坏(图2(b)),而颗粒体系接触力链集中方向呈现向右趋势(图3(b)、(c))。与此同时,充填节理主应力偏转方向基本与接触力链偏转方向保持一致。在加载过程中,颗粒体系经历了初期整体受荷载的阶段(图4(a)),中期发生应力偏斜,使倾斜部分成为颗粒体系中承受外荷载的有效部分(图4(b))。随着加载过程的进行,夹层及节理接触面发生破

坏, 最终导致加载后期应力集中在模型试样右侧颗粒堆积处(图 4(c)).

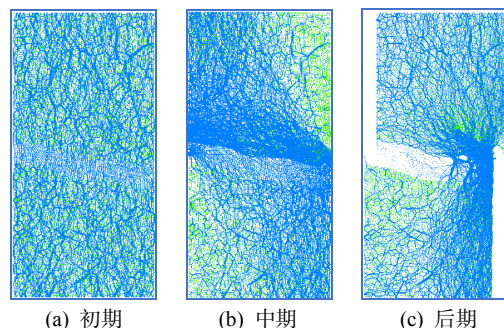


图 3 充填节理接触力链分布

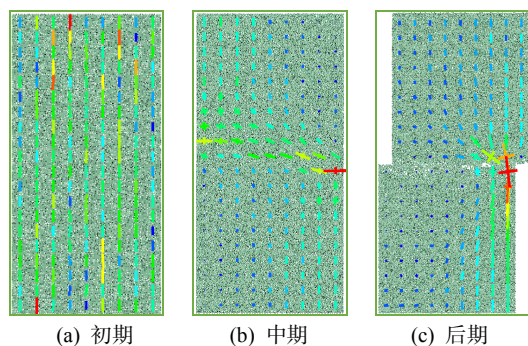


图 4 充填节理主应力分布

3 不同起伏形貌充填节理的剪切特性

3.1 起伏形貌对节理剪切裂纹的影响

图 5 为平均起伏对节理裂纹数量的影响. 由图可见, 试样裂纹数量受到起伏形貌的显著影响, 随着节理形貌平均起伏的增大, 无充填及薄充填试样的裂纹数量呈逐渐上升趋势, 而厚充填试样的裂纹数量增长并不明显. 随着充填厚度的增长, 充填节理的破坏由节理转移至充填部分, 同时风化、

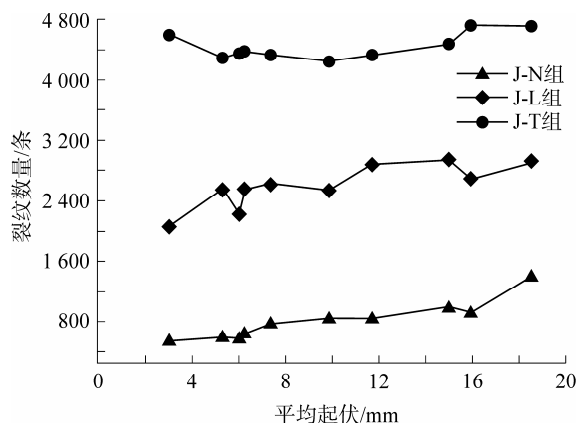


图 5 平均起伏对裂纹数量的影响

侵蚀后的充填物质强度更低, 裂纹更加容易产生, 其裂纹数量增加. 由表 5 可见, 以无充填节理(J-N 组)为例, 裂纹数量最大值与最小值之间差值为 859, 标准差为 261.2; 薄充填节理(J-L 组)裂纹数量最大值与最小值间差值为 893, 标准差为 288.9; 而在厚充填节理(J-T 组)条件下, 裂纹数量最大值与最小值间差值为 472, 标准差为 172.9.

表 5 充填节理裂纹数量统计及标准差

组别	①/条	②/条	③/条	④
J-N 组(0 mm)	1 393	534	803	261.2
J-L 组(15 mm)	2 930	2 037	2 580	288.9
J-T 组(75 mm)	4 697	4 225	4 419	172.9

注: ①裂纹数量最大值; ②裂纹数量最小值; ③裂纹数量平均值;

④标准差 $S = \sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 / (n-1)}$, 其中 X_i 为单个试样裂纹数量, $\bar{X}$ 为每组裂纹数量平均值, n 为每组试样数量.

3.2 充填厚度对节理抗剪强度的影响

图 6 为起伏形貌对无充填节理抗剪强度的影响, 图 7 为充填厚度对节理抗剪强度的影响, 图 8 为充填度对节理抗剪强度的影响. (1)由图 6 可知, 起伏形貌会影响无充填节理的抗剪强度, 随着节理形貌平均起伏的增大, 无充填节理峰值抗剪强度也逐渐增大. (2)由图 7 和图 8 可知, 相同起伏形貌的节理, 随着充填厚度的增加, 节理的峰值抗剪强度呈逐渐降低并趋于稳定的规律. 当充填度小于 2 时, 充填节理的峰值抗剪强度随着充填度的增加呈现负增长趋势; 当充填度大于 2 时, 充填节理的峰值抗剪强度相对稳定, 无明显变化. (3)结合不同充填节理的破坏模型分析, 随着充填度的增加, 试样的破坏从节理向软弱夹层过渡. 在无充填情

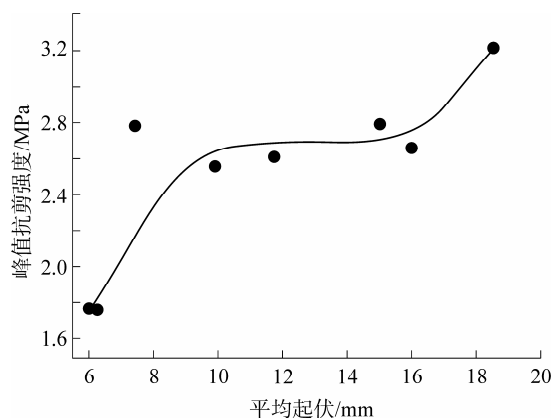


图 6 起伏形貌对无充填节理抗剪强度的影响

况下,试样呈现出节理剪切破坏;当充填度小于2时,试样主要表现为节理-夹层耦合破坏,随着充填度的增加,破坏模式发生改变,峰值抗剪强度逐渐降低;当充填度大于2时,试样呈现软弱夹层剪切破坏,并且随着充填度的增加,破坏模式保持不变,峰值抗剪强度趋于稳定。

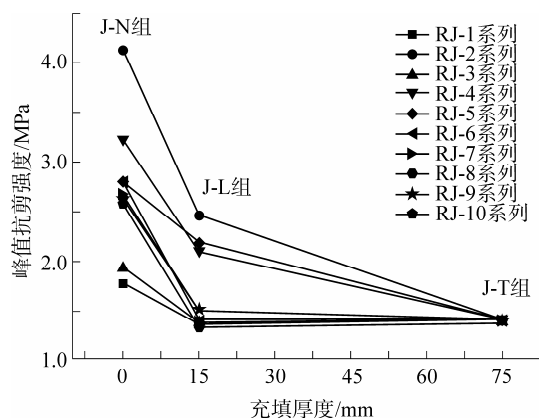


图7 充填厚度对节理抗剪强度的影响

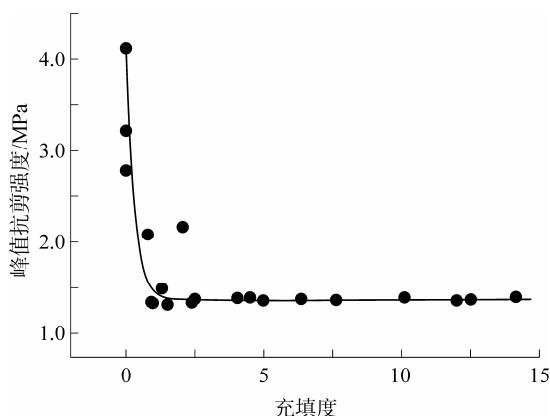


图8 充填度对节理抗剪强度的影响

4 结论

本文采用天然原岩节理起伏形貌曲线,利用PFC^{2D}颗粒流数值计算方法对天然多形貌充填节理的剪切特性进行数值模拟研究,主要结论如下:

(1)同起伏形貌、不同充填厚度的节理剪切应力—剪切位移曲线整体呈现峰前硬化、峰后软化的特征,且随着充填厚度的增大,节理形貌对峰值特征的影响有所降低;同时,当节理峰值抗剪强度减小后,峰后软化程度下降。

(2)同起伏形貌的节理随着充填厚度的增大,试样由节理剪切破坏向软弱夹层剪切破坏过渡。充填度小于2时,主要是节理剪切破坏和节理-夹

层耦合破坏;充填度大于2时,主要发生软弱夹层剪切破坏。

(3)同起伏形貌的节理在充填厚度逐渐增加情况下,呈现出峰值抗剪强度逐渐降低并趋于稳定的规律。当充填度小于2时,随着充填度增加,充填节理峰值抗剪强度表现为负增长趋势;而在充填度大于2的情况下,充填节理的峰值抗剪强度随充填度的增加而趋于稳定,并未呈现出明显的变化规律。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] INDRARATNA B, PREMADASA W, BROWN E T. Shear behaviour of rock joints with unsaturated infill[J]. Geotechnique, 2013, 63(15):1356-1360.
- [3] MIRZAGHORBANALI A, NEMCIK J, AZIZ N. Effects of cyclic loading on the shear behaviour of infilled rock joints under constant normal stiffness conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(4):1373-1391.
- [4] HAN G S, JING H W, JINAG 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.
- [5] 刘婷婷, 李建春, 李海波, 等. 剪切速率对平直充填节理的剪切力学特性影响研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1967-1973, 1989.
- [6] 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.
- [7] 何忠明, 彭振斌, 曹平, 等. 层状岩体单轴压缩室内试验分析与数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(5):1906-1912.
- [8] 连莲, 张书博, 王扬, 等. 不同充填厚度节理面剪切破坏宏观机理研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(3):756-764.
- [9] 王刚, 张振松, 张贤达, 等. 异形充填节理剪切破坏宏观机理及强度模型[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2020, 39(1):133-140.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] DURIEZ J, DARVE F, DONZÉ F V. A discrete modeling-based constitutive relation for infilled rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(3):458-468.
- [13] 宋浪, 柴少波, 宋博阳, 等. 充填节理特性对岩石静态压缩力学行为影响的颗粒流模拟[J]. *中山大学学报(自然科学版)(中英文)*, 2023, 62(5):145-156.
- [14] 黄达, 岑夺丰. 单轴静-动相继压缩下单裂隙岩样力学响应及能量耗散机制颗粒流模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(9):1926-1936.
- [15] PARK J W, SONG J J. Numerical simulation of a direct shear test on a rock joint using a bonded-particle model [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(8):1315-1328.
- [16] ITASCA CONSULTING GROUP. PFC^{2D} (partical flow code in 2 dimensions) theory and background[M]. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group, Inc., 2002: 77-78.
- [17] BAHAAADDINI M, HAGAN P C, MITRA R, et al. Parametric study of smooth joint parameters on the shear behaviour of rock joints[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(3):923-940.
- [18] 王刚, 张学朋, 蒋宇静, 等. 基于颗粒离散元法的岩石节理面剪切破坏微观机理[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(4):1442-1453.
- [19] BARTON N. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1978, 15(6):319-368.

The shear characteristics of fill joints in natural polyhedral morphology based on particle flow

ZHU Kuafeng¹, LUO Zhanyou¹, WU Qiang², WU Hui², LI Gan¹

(1.Institute of Rock Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Shiyu Railway Investment Development Co., Ltd., Ningbo 315101, China)

Abstract: The shear characteristics of joints is an important factor affecting the stability of rock masses. Based on the natural joint surface undulation profiles, numerical simulations using the Discrete Element Method (DEM) are conducted to investigate the shear characteristics of joints with natural and filled surfaces at thicknesses of 15 mm and 75 mm. The study analyzes the effects of joint undulation and filling thickness on shear characteristics and shear strength. The research findings indicate the following: (1) With the increase in filling thickness, the influence of undulation on the peak hardening and post-peak softening features of joints decreases, and the degree of post-peak softening decreases. (2) For joints with the same undulation profile, as the filling thickness increases, the failure mode transitions from joint shear failure to shear failure in the weak interlayer. When the filling ratio is less than 2, the primary failure modes are joint shear failure and joint-interlayer coupling failure. When the filling ratio is greater than 2, the predominant failure mode is shear failure in the weak interlayer. (3) When the filling ratio is less than 2, the peak shear strength of the structural surface decreases with the increase in filling ratio. However, when the filling ratio is greater than 2, there is no significant change in the peak shear strength of the structural surface.

Key words: filling joint; shear strength; shear properties; numerical simulation; undulating morphology

(责任编辑 章践立)