

充填节理加锚剪切强度特征及变形规律研究

王 刚^{1,2}, 陆恒源¹, 连 莲¹, 张振松¹

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590;
2. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点试验室培育基地, 山东 青岛 266590)

摘要: 基于含充填节理室内剪切试验数据, 利用 PFC2D 探讨了含充填及加锚节理的数值实现方法, 建立了不同粗糙度形态的含充填节理及其加锚计算模型, 对比研究了含充填节理面在加锚和无锚状态下的强度特征及其应力应变曲线特性。研究表明: 以室内含充填节理剪切试验结果为参数标定基础, 获得准确细观参数, 并可应用于后续含充填节理的加锚剪切模拟, 且效果较好; 加锚情况下含充填节理的剪切强度相比不加锚情况具有一定程度的提高, 且达到峰值强度时的应变增量明显增加, 但锚杆对含充填节理面抗剪强度贡献量不同; 同一充填厚度下, 不同粗糙度的含充填节理面加锚剪切曲线可分为三种不同的曲线形式, 其对应的锚杆贡献量不同; 同一粗糙度下, 不同充填厚度的节理面加锚剪切行为差异较大, 且存在一个临界充填厚度, 此厚度下的加锚充填强度最大, 且不同粗糙度的加锚节理面临界充填厚度不同。

关键词: 含充填节理加锚; 不同粗糙度; 不同充填厚度; 剪切强度; 应力应变曲线

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)02-0184-08

Study of shear strength characteristics and deformation rules of filling and anchored joints

WANG Gang^{1,2}, LU Hengyuan¹, LIAN Lian¹, ZHANG Zhensong¹

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation,
Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and
the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Based on the indoor shear test data of filling joints, this paper uses the PFC2D to explore the numerical implementation method of filling and anchoring joints. By establishing the filling joints of different roughness forms and their anchoring calculation models, the strength characteristics and stress-strain curves of the filled joints under anchored and unanchored conditions were compared. Results show that based on the shear test results of indoor filling joints, the accurate microscopic parameters are obtained, which can be applied to the shear simulation of subsequent anchoring and filling joints with good results. The shear strength of anchoring and filling joint is improved to some extent compared with that without anchoring, and the shear displacement is significantly increased when the strength reaches the peak value, but the contribution of the bolt to the shear strength of the filling joint is different. Under the same filling thickness, the shear curves of anchoring and filling joint surface with different roughness can be divided into three different forms, and the corresponding bolt contribution is also different. Under the same roughness, the shear behavior of anchoring and filling joints with different filling thicknesses is quite different, namely there exists a critical filling thickness, which maximizes the strength of anchoring and filling joints under this thickness, and the critical filling thickness of joint surface with different roughness is different.

Key words: anchored filling joint; different roughness; different filling thickness; shear strength; stress-strain curves

节理作为一种重要的地质结构面, 大量随机分布于岩体中, 从而使岩体各类力学性质(如抗压强度、剪切强度等)表现出各向异性和尺寸效应的

特征^[1]。有些节理岩体的节理面两侧紧密契合, 而有的节理面之间存在一定空隙, 受部分岩体风化作用以及地下水运移的影响, 这些空隙往往会被

收稿日期: 2019-08-15 修改稿日期: 2020-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479108)

第一作者: 王 刚(1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩石力学与工程的科研与教学工作。E-mail: wanggang1110@gmail.com

通信作者: 陆恒源(1997—), 男, 硕士生, 研究方向为岩土工程。E-mail: 1047230910@qq.com

软弱岩土材料所充填, 这些软弱充填物的存在很大程度地影响了节理岩体的剪切特性, 弱化节理的力学性质, 当受到扰动时, 使得岩体很容易沿含充填节理面发生剪切滑移破坏, 随后破坏不断增长、演变至整个岩体失稳灾变^[2], 因此对节理岩体的合理加固在实际工程中尤为重要. 锚杆对岩土体的加固作用已经得到岩土工程界的广泛认可^[3], 施加锚杆后, 通过锚杆杆体自身的抗剪作用增强薄弱面的抗剪性能, 制止或延缓层间错动, 提高岩体节理面的抗剪强度, 进而增强节理岩体的整体性与稳定性^[4], 尤其适用于含有充填节理的裂隙岩体中.

目前对含充填节理及其加锚剪切性能的研究相对较少, 由于一定厚度充填物的存在, 使得其剪切破坏机理变得更加复杂. 国内外专家学者分别对不同粗糙度节理面、充填物、锚杆等因素影响下的节理岩体进行了研究. Ferrero^[5]通过加锚节理岩体直剪试验和数值模拟及理论分析研究了锚杆的作用机理, 并探究了锚杆材料、锚固方式以及杆体尺寸等因素对节理岩体抗剪强度的影响规律. Jalalifar 等^[6]基于试验和数值分析表明, 锚杆对节理岩体的作用大小主要取决于锚杆的抗拉强度和岩体强度. 韩立军与宗义江^[7]等基于室内试验研究了破裂岩体节理面的加锚注浆, 指出通过注浆对节理面进行充填后, 节理面的剪切强度、黏聚力等都有不同程度的增大. 张伟等^[8-9]通过对含节理面的模型材料进行加锚剪切室内模拟试验研究, 认为锚杆抗剪作用是在节理面已经发生剪切错动后利用锚杆的销钉作用实现的. 张永政等^[10]利用 PFC2D 对不同粗糙度的锚固节理模型进行剪切模拟, 探讨了 JRC 值和颗粒摩擦因数对锚固节理抗剪强度的影响, 并从宏细观角度分析了不同节理粗糙度的形貌破坏和裂纹扩展演化特征. 王刚等^[11]基于 PFC 模拟, 采用双线性锚杆模型深入研究了岩体结构面-浆体-锚杆之间的相互作用以及锚固体系宏细观力学响应.

在节理岩体锚固效应研究方面取得的大量研究成果中, 不难发现, 研究对象大多是上下节理面闭合的节理, 很少考虑到含充填节理面的存在, 此外, 各项研究对锚固节理剪切特性的影响因素进行了比较多的分析, 而其剪切应力-应变曲线规律方面却很少讨论. 因此本文基于充填型节理室内剪切试验, 结合数值模拟手段, 通过分析其剪切强度及应力-应变曲线特性, 进行含充填节理及加锚剪切行为的对比研究.

1 参数标定

颗粒流数值模拟软件 PFC 在研究岩石节理力学性质方面存在诸多优势, 其可以按不同需求设置模型的多种尺寸, 可重复进行试验, 并且可以追踪节理岩体内部裂纹发展, 便于进行细观层次研究^[12,13]. 此软件基于离散元方法, 将研究对象离散为球形颗粒, 不同颗粒之间通过接触连接, 并采用细观力学参数表征颗粒及接触的力学性质, 因此在数值模型创建以及计算求解时都需要设置合理的细观力学参数, 求解后使得整个模型表现出与实际相符的宏观力学响应. 然而目前并没有完善的力学理论来计算细观参数与宏观参数之间的定量关系, 因此需要进行参数的标定, 通过反复“试错”确定最终准确参数^[14].

1.1 充填节理试验

本研究在含充填节理室内剪切试验的基础上进行, 该数值模型以室内制作的类岩石节理试件为原型进行模拟得到. 模型实验采用水泥砂浆预制节理岩体, 主要选取白色硅酸盐水泥、石膏、中粒径和细粒径石英砂、水作为配料进行配比. 以岩石材料的单轴抗压强度与弹性模量作为控制指标, 依据岩石力学手册的相关岩石参数, 最终确定的各组分配比为白色硅酸盐水泥: 中粒径石英砂: 细粒径石英砂: 石膏: 水=1:0.5:0.5:0.2:0.3.

试验选取 Barton 教授所提出的 10 条标准 JRC 曲线为研究对象, 制作标准 JRC 曲面模具, 如图 1 所示. 不同粗糙度的节理岩体试件分上下两部分浇筑, 如图 2 所示, 将材料按配比称重后搅拌加水, 搅拌均匀后倒入含有下部分节理形态的试件模具中进行振动使材料密实后静置养护 24 h, 然后拆模放入养护箱养护. 浇筑好上半部分后, 采用倒模的方式浇筑下半部分. 试件整体尺寸为 200 mm×100 mm×100 mm.

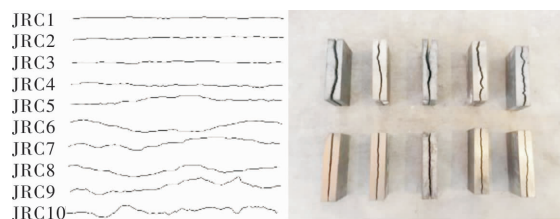


图1 标准 JRC 节理曲线

Fig. 1 Standard JRC joint curves

室内剪切试验主要以节理面形态为单一变量, 主要考虑标准节理面粗糙度的影响, 研究不同粗



图2 试件制作

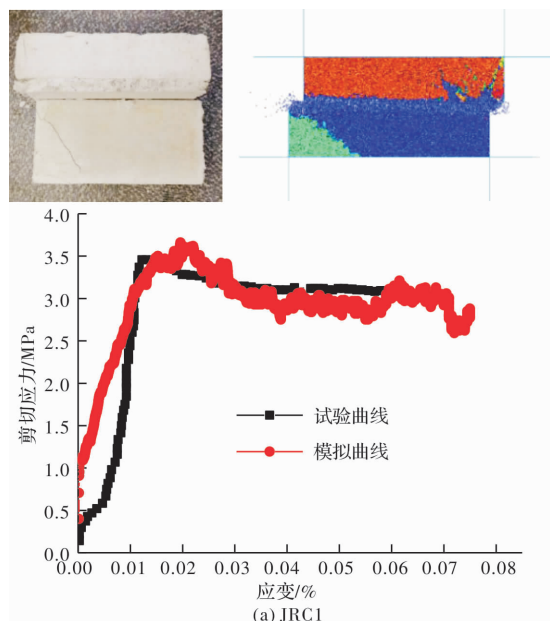
Fig. 2 Making of specimens

糙度的含充填节理面压剪行为, 设置充填厚度 10 mm, 充填过程中保证充填物涂抹均匀, 充填层粘结率大于 90%。试验不考虑法向荷载和剪切速率的影响, 设置法向荷载 1 MPa, 加载方向按节理面曲线方向从左至右, 加载速度控制在 0.6 mm/min, 过程中记录剪切力的大小。

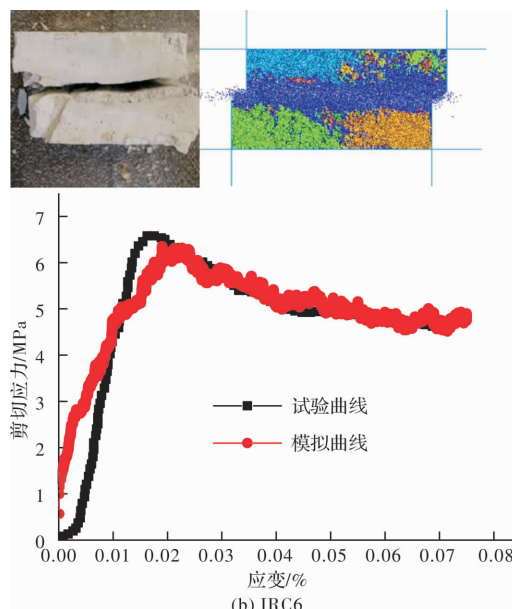
1.2 数值模拟对比

基于含充填节理室内剪切试验, 利用 PFC2D 进行不同粗糙度含充填节理面的剪切数值模拟。在已有的研究成果中, 一般通过单轴试验以及一系列双轴、三轴试验获得材料的抗压强度、弹性模量和泊松比等宏观参数, 进而反演模拟岩石细观参数^[10-11, 13, 15]。本文参数标定首先通过经验公式确定各项细观参数的大致范围, 然后以含充填节理的室内剪切试验所得数据为参数标定基础, 对比数值计算与室内试验得到的剪切应力-应变曲线以及试样宏观力学表现, 如果模拟与试验结果吻合程度较好, 便可将该组细观力学参数应用于后续含充填节理加锚状态下的岩体模型计算中^[16]。以编号为 JRC1、JRC6 的节理面剪切为例, 试验与模拟结果对比如下图 3 所示。

由图 3 中破坏形态对比图可知, 试验破坏形态



(a) JRC1



(b) JRC6

图3 试验与模拟破坏形态及应力-应变曲线对比

Fig. 3 Comparison of failure modes and stress-strain curves between test and simulation

与模拟破坏形态具有较好的吻合性, 粗糙度较小时(JRC1), 试件的破坏形态主要表现为节理面与充填物之间的粘结面破坏, 粗糙度增加(JRC6), 表现为充填物与粘结面的共同破坏。分析应力-应变曲线对比图, 数值曲线与试验曲线大致重合, 这表明此细观参数的选取是相对准确的。由图可知, 试验曲线表现出一小段压密特征, 主要是由于充填物的存在, 导致试验机与试件之间不能紧密接触, 剪切荷载施加使得试验机与节理试件压紧, 此过程位移小, 而模拟曲线不存在此过程, 存在初始应力值。随着剪切进行, 应力-应变曲线均首先表现出明显的弹性变化阶段, 曲线达到峰值强度后, 剪切进入塑性阶段, 直至试件破坏, 进入残余强度阶段。如图 4 所示为不同粗糙度的节理试件试验与模拟强度对比图, 对比强度大致相同。

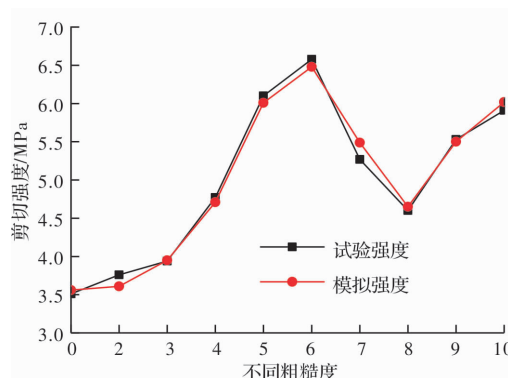


图4 不同粗糙度下剪切试验与数值模拟强度对比

Fig. 4 Comparison of shear strength with test and numerical simulation under different roughness

1.3 细观参数取值

经过反复调试, 基于上述试验与模拟对比分析结果, 最终确定的细观参数值见表 1. 并以此参数进行同等条件的加锚节理剪切模拟过程, 进而分析含充填节理加锚情况下的强度和变形特征.

表 1 部分细观参数取值
Tab. 1 Part of mesoscopic parameter values

细观参数	取值
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2 300
孔隙率	0.05
阻尼系数	0.7
颗粒法向刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	10.8×10^8
颗粒切向刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	5.4×10^8
颗粒间摩擦系数	0.8
墙体刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	1.0×10^7
平行粘结法向刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	10.8×10^8
平行粘结切向刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	5.4×10^8

2 含充填节理加锚剪切模拟

2.1 加锚剪切模型

首先建立剪切盒模型, 定义 8 面墙体, 墙体所围成区域以不同孔隙率及不同半径分别填充岩体颗粒和节理面充填颗粒, 如图 5 所示. 1[#]、3[#]、4[#] 墙体构成剪切盒的上半部分, 其中 1[#] 墙体为伺服控制墙体, 通过不断调整墙体的移动速度来间接逼近模型目标应力值; 3[#]、4[#] 墙体加载, 使上部剪切盒水平运动, 通过施加恒定的加载速率并将其水平位移作为剪切位移实现剪切过程. 2[#]、5[#]、6[#] 墙体构成剪切盒的下半部分, 剪切过程中固定; 7[#]、8[#] 墙体避免生成模型时颗粒逃逸, 在剪切过程前需要先删除此墙体.

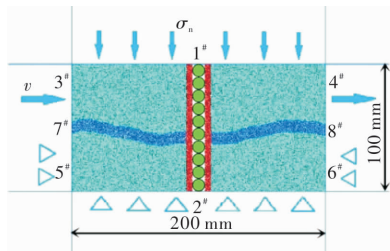


图 5 加锚状态下含充填节理剪切模型

Fig. 5 Anchoring and filling shear model

考虑试样尺寸效应、颗粒大小、宏细观参数等因素的影响, 并为了保证数值模拟的计算过程顺利进行^[17], 将模型尺寸相比于试验试件尺寸进

行了等比例放大, 颗粒尺寸与试件尺寸的比值保持不变. 模型中粗糙节理面的生成主要通过 CAD 绘制含充填节理面轮廓并通过命令流程程序导入其中, 生成节理墙, 对节理墙内外颗粒赋予不同的属性, 最后删除节理墙, 模型计算平衡. 在对模型的细观参数进行赋值时, 岩石的参数采用上述充填剪切模拟确定的参数. 设置充填物与节理岩石采用相同的材料和接触模型, 但其粘结性减小一个量级, 目的在于弱化含充填节理面强度, 而注浆体的粘结性设置为岩体的 1.5 倍. 锚杆同样采用平行粘结模型, 因为此模型既能传递力, 也能传递弯矩, 能较好的模拟锚杆的实际受力状态^[18]. 分别建立不同粗糙度节理面的含充填节理加锚剪切模型, 进行剪切计算并记录相关剪切数据.

2.2 数值计算结果分析

2.2.1 有锚和无锚剪切强度对比

将全部含充填节理加锚剪切模拟结束后, 对比不加锚含充填节理的剪切结果进行分析, 分别分析其峰值抗剪强度和残余强度的变化情况, 计算结果见表 2.

表 2 无锚与加锚状态下强度模拟数据
Tab. 2 Simulated data of shear strength with no-anchoring and anchoring

不同粗糙度	峰值强度/MPa		残余强度/MPa	
	不加锚	加锚	不加锚	加锚
JRC1	3.56	4.76	3.01	4.21
JRC2	3.61	4.72	3.25	3.68
JRC3	3.95	4.33	3.48	3.52
JRC4	4.71	5.23	4.25	4.51
JRC5	6.01	6.37	5.08	5.73
JRC6	6.48	7.02	4.98	5.82
JRC7	5.49	5.53	4.75	4.93
JRC8	4.65	6.02	3.81	5.05
JRC9	5.50	5.96	4.58	5.49
JRC10	6.02	6.25	4.41	4.75

由表可知, 含充填节理的剪切强度随着粗糙程度的增加而提高, 但并不是粗糙度越高强度越大, 而是呈现两种变化趋势. 当节理面粗糙程度较低时, 峰值剪切强度随着粗糙度的增加而增大, 且近似线性发展, 当粗糙程度较高时, 节理面起伏度高, 充填后的节理剪切峰值强度呈现不同程度的降低. 残余强度与峰值强度变化趋势相同.

分析加锚条件下含充填节理的剪切强度, 加

锚后剪切强度有不同程度的提高,但提高幅度不同,即锚杆对含充填节理的综合抗剪强度贡献量不同。当节理面粗糙度较小时,充填物分布较规则,节理面与岩石的粘结性较大,锚杆贡献量相对较大,而且最大贡献量不超过充填强度的40%。当节理面粗糙度较大时,曲线存在较多的小凸体,充填物分散,导致节理面与节理岩体之间的粘结性较低,此外节理面小凸体易被剪碎,因此导致施加锚杆后的节理面综合抗剪强度提高程度较小。

由于含充填节理的加锚剪切行为复杂,包含锚杆、注浆体、充填物、节理岩体之间相互作用、相互影响,因此本文着重宏观上分析锚杆对节理岩体剪切强度的贡献值,对于细观作用机理还有待进一步研究。

2.2.2 剪切应力-应变曲线

应力-应变曲线是试件剪切过程得到的剪切强度及变形行为的最直观的反映^[19]。本文选取锚杆贡献量不同的代表性节理剪切曲线进行分析,当充填厚度较大时,在同一充填厚度下不同粗糙度的节理剪切应力应变曲线出现三种不同的曲线形式,如下图6所示。

图6(a)所示,剪切初期,剪切应力近似呈线性增加,且有锚与无锚状态的变化趋势相同,发生沿节理面充填物的挤压堆积,以及沿锚杆轴向长度的颗粒挤压,此阶段主要由含充填节理面来承受剪切作用,锚杆还没有发挥其作用;随着剪切位移的增加,锚杆发生变形逐渐发挥其抗剪作用,但由于充填厚度远大于节理面的平均起伏高度,此时充填物很大程度上影响锚固充填节理的剪切性能,导致曲线斜率降低,剪应力增加缓慢;当剪应力达到峰值强度时,节理面剪切破坏,进入残余阶段。此时锚杆对节理面的综合剪切强度贡献值较小,锚杆并不能充分发挥其作用。

图6(b)中对于有锚和无锚状态,剪切应力应变曲线在达到峰值强度前基本重合,表现为接近直线的充填后弹性阶段。无锚状态的曲线达到峰值强度后,表现为较明显的应变软化特征,剪切进入充填后塑性阶段,破坏不可逆,这主要是由于剪切位移加大导致颗粒之间的粘结破坏,剪切强度降低,当粘结完全破坏后,试样沿节理面发生滑动,此时的剪切强度主要由节理面与岩体之间的颗粒摩擦提供,因此出现滑移曲线,此时的剪切强度称为试样的残余强度。而充填锚固曲线有个小的转折点,剪切应力稍有降低,而后继续增加,此时锚杆已经发生剪切变形,锚杆逐渐充

分发挥其抗剪作用,剪切位移增加,剪切应力缓慢增加;曲线达到峰值强度后试样发生滑移,此时锚杆变形加大,产生相应的拉拔力和剪切力,有效抑制节理面的层间错动和滑动,使节理面的峰值强度得到提高,而且达到峰值强度时的剪切位移增加,最终进入加锚残余强度阶段。

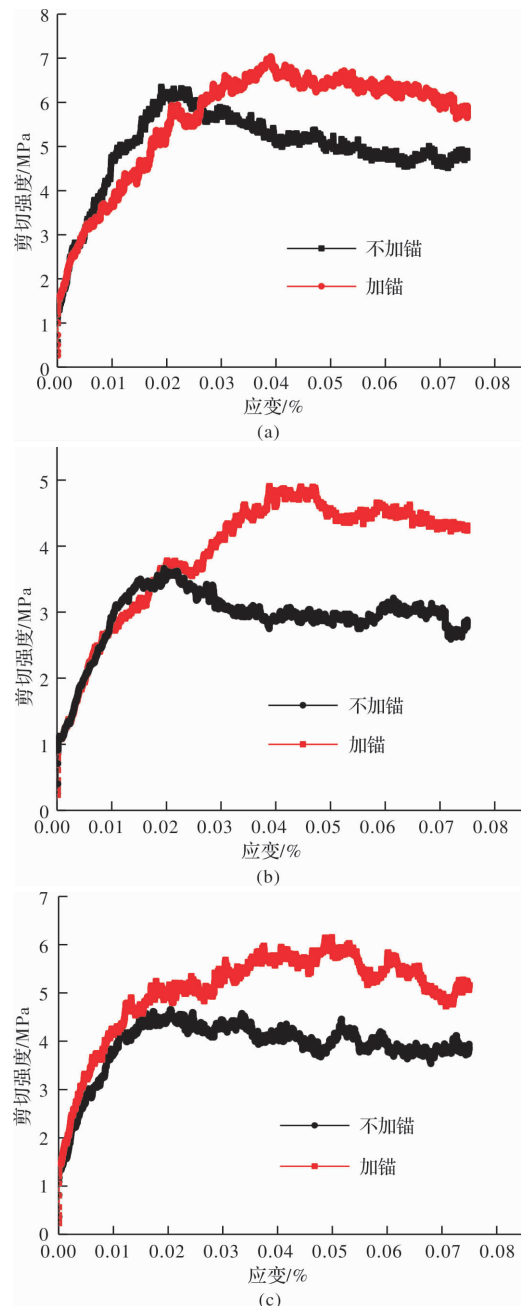


图6 不同粗糙度含充填节理无锚与加锚剪切对比曲线

Fig. 6 Comparison of no-anchoring and anchoring shearing curves of filling joints under different roughness

图6(c)与(b)区别在于锚杆能否立即发挥其作用,在经历较小的剪切位移下剪力迅速增加。此时主要考虑节理面的粗糙度不同,锚杆在节理面处的约束不同,当约束较大时,在剪切力作用下锚杆变形逐渐加大,有利于锚杆抗剪性能的充分

发挥, 加锚节理面的剪切刚度高于不加锚情况, 锚固条件下节理面所能承受的极限荷载更大, 锚杆贡献量更大. 曲线表现出的波动状态主要是因为节理面粗糙度较大, 凸起较多, 剪切过程中先后剪断数个凸起而表现出的变形特征.

综上分析, 图 6(a)形式的曲线, 锚杆贡献量较小, 锚杆并不能充分发挥其作用; 图 6(b)、6(c)锚杆贡献量较大, 锚杆能有效提高节理面的综合抗剪性能. 此外, 含充填节理加锚剪切破坏时的应变量大致在 0.04% 左右, 而不加锚情况下的剪切应变量在 0.02% 左右, 加锚情况下达到峰值强度时的剪切位移明显增加.

3 不同充填厚度节理加锚剪切模拟

本文针对不同充填厚度的节理面加锚剪切进行了数值模拟, 模拟条件与室内含充填节理剪切条件一致, 分别设置充填厚度为 3 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 来探究不同充填厚度下含充填节理加锚剪切曲线特性和强度变化规律.

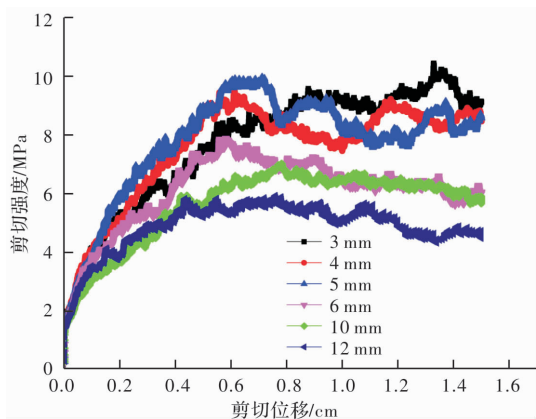


图 7 不同充填厚度节理加锚剪切曲线
Fig. 7 Shear curves of anchorage joints with different filling thicknesses

如图 7 所示为不同充填厚度下含充填节理加锚剪切应力-应变曲线, 可以看出, 不同充填厚度下加锚节理剪切行为表现出明显的差异性. 曲线分析知, 当充填厚度较小时, 剪切应力曲线可划分为三个阶段: 弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段. 弹性阶段发生剪切位移较小, 接触力变化大, 由于含充填节理面的复杂特性, 节理岩体内部结构在剪切过程中会出现小程度的局部破坏, 导致弹性阶段的应力应变曲线出现局部变化, 但整体上呈线性; 随着剪切位移增加, 曲线进入塑性阶段, 节理面不规则的锯齿形态逐渐破坏并加剧, 剪应力下降, 此阶段不可逆, 直至节理面不规则起伏

完全被破坏, 曲线进入破坏阶段. 当充填厚度较大时, 曲线的屈服阶段逐渐减小直至消失, 因为充填厚度较大导致剪切过程中锯齿状起伏易从根部被剪断, 或者主要充填物剪切破坏, 因此屈服阶段越来越不明显.

表 3 不同充填厚度节理面加锚剪切强度
Tab. 3 Shear strength of anchorage and filling joints with different filling thicknesses

不同充填厚度/mm	峰值强度/MPa	残余强度/MPa
3	9.15	9.01
4	9.20	8.95
6	10.05	8.94
8	7.82	6.05
10	6.75	5.98
12	5.81	4.83

由表 3 可知, 随着充填厚度的增加, 剪切强度表现出先增加后减小的变化形势. 当充填厚度大于节理面的平均起伏高度(即 ≥ 3 mm, JRC6 曲线平均起伏高度为 2.43 mm)时, 随着充填厚度的增加, 存在一个临界厚度(6 mm), 此时峰值强度达到最高, 锚杆所能承受的极限荷载最大. 当充填厚度较小(≤ 6 mm)时, 锚固剪切强度随着充填厚度的增加而增加, 剪切模量具有一定程度的增加, 而其残余强度随着充填厚度的增加基本趋于稳定. 当充填厚度大于 6 mm 时, 随着充填厚度的继续增加, 峰值强度逐渐减小, 残余强度也减小, 主要由于充填物厚度较大, 导致锚杆在与含充填节理面接触处受到的约束作用逐渐减弱, 在剪切过程中使得锚杆在较小的剪切力作用下就能产生较大的变形, 进而完全失效, 这不利于锚杆抗剪性能的充分发挥. 当充填厚度增加到 12 mm 时, 剪切强度接近不加锚状态下的充填强度, 此时强度主要由充填物质控制.

综上可知, 充填厚度对锚杆抗剪性能的发挥具有较大的影响. 同一粗糙度下, 当充填厚度较小时, 锚杆能及时充分发挥其抗剪作用, 有效提高节理面的综合抗剪性能, 当充填厚度较大时, 充填厚度影响锚杆性能的充分发挥, 锚杆贡献量较小, 因此寻求最佳充填厚度下锚杆性能的充分发挥对实际工程具有重要的参考价值.

4 结论

本文基于含充填节理室内剪切试验, 并在与

试验相同条件下进行含充填节理面及加锚剪切模拟研究,主要得到以下几点结论:

(1)不同粗糙度下,含充填节理的剪切强度整体上随着粗糙度的增加而提高,当粗糙度增加到一定程度后,主要发生充填物的剪切破坏,因此剪切强度有一定程度的降低;加锚后含充填节理面综合抗剪性能提高,且随着粗糙度的增加表现出与不加锚状态下近似的规律,但锚杆对节理面抗剪强度的贡献量不同,这与节理面的粗糙度和充填厚度有关。

(2)同一充填厚度下,不同粗糙度的含充填节理面加锚剪切曲线可分为三种不同的曲线形式,其对应的锚杆贡献量不同,且由剪切曲线知,含充填节理面加锚后,试样达到峰值强度时的剪切位移明显增大,表明加锚有效抑制节理面的剪切错动。正确认识节理剪切应力-应变曲线发展趋势对于节理面锚固机理的研究以及实际工程中注浆加固岩体具有重要的参考价值。

(3)同一粗糙度下,不同充填厚度的含充填节理加锚剪切行为存在较大差异。分析曲线知,充填厚度较小时,剪切曲线可分为弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段,充填厚度增加,屈服阶段逐渐减小直至消失;分析强度知,当充填厚度大于节理面的平均起伏高度时,随着充填厚度的增加,剪切强度先增加后减小,即存在一个临界充填厚度,使得此厚度下的剪切强度最大,且不同粗糙度的节理面临界充填厚度不同。

参考文献 References

- [1] 周喻, MISRA A, 吴顺川, 等. 岩石节理直剪试验颗粒流宏观分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1245-1256.
ZHOU Yu, MISRA A, WU Shunchuan, et al. Macroscopic and microscopic analysis of particle flow in rock joint direct shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1245-1256.
- [2] 郭冠龙. 吴锦源煤矿含充填节理巷道围岩控制技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2015.
GUO Guanlong. Controlling technology of roadway surrounding rock containing infilled joints in Haojinyuan coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [3] 张伟. 基于预应力锚杆模型的节理岩体稳定性非连续分析[D]. 武汉:中国科学院研究生院武汉岩土力学研究所, 2010.
ZHANG Wei. Discontinuous analysis of joint rock mass stability based on prestressed bolt model[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [4] 刘泉声, 雷广峰, 彭星新, 等. 锚杆锚固对节理岩体剪切性能影响试验研究及机制分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(S1): 27-35.
LIU Quansheng, LEI Guangfeng, PENG Xingxin, et al. Experimental study and mechanism analysis of influence of bolt anchorage on shear behavior of jointed rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S1): 27-35.
- [5] FERRERO A M. The shear strength of reinforced rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1995, 32(6): 590-600.
- [6] JALALIFAR H, AZIA N. Experimental and 3D numerical simulation of reinforced shear jointes[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(1): 95-103.
- [7] 韩立军, 宗义江, 韩贵雷, 等. 岩石结构面注浆加固抗剪特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2570-2576.
HAN Lijun, ZONG Yijiang, HAN Guilei, et al. Study of shear properties of rock structural plane by grouting reinforcement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2570-2576.
- [8] 张伟, 刘泉声. 基于剪切试验的预应力锚杆变形性能分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2231-2240.
ZHANG W, LIU Q S. Deformation performance analysis of prestressed bolt based on shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(8): 2231-2240.
- [9] 张伟, 刘泉声. 节理岩体锚杆的综合变形分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1067-1074.
ZHANG Wei, LIU Quansheng. Comprehensive deformation analysis of jointed rock bolt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1067-1074.
- [10] 张永政, 王刚, 马明, 等. 不同粗糙度下锚固节理破坏机理宏观研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(12): 3373-3383.
ZHANG Yongzheng, WANG Gang, MA Ming, et al. Macro-micro study on failure mechanism of anchorage joints under different roughness[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2017, 48

- (12): 3373-3383.
- [11] 王刚, 袁康, 蒋宇静, 等. 剪切荷载下岩体结构面-浆体-锚杆相互作用机理宏观研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(6): 2207-2215.
- WANG Gang, YUAN Kang, JIANG Yujing, et al. Macro-micro mechanical on joint-grout-bolt interaction in rock mass subjected to shear loading[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(6): 2207-2215.
- [12] 周喻, 张怀静, 吴顺川, 等. 节理连通率对岩体力学特性影响的细观研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 29-36.
- ZHOU Yu, ZHANG Huaijing, WU Shunchuan, et al. Mesoscopic study on the influence of joint connectivity on mechanical properties of rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2): 29-36.
- [13] 夏才初, 宋英龙, 唐志成, 等. 粗糙节理剪切性质的颗粒流数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1545-1552.
- XIA Caichu, SONG Yinglong, TANG Zhicheng, et al. Particle flow numerical simulation for shear behavior of rough joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1545-1552.
- [14] 石崇, 徐卫亚. 颗粒流数值模拟技巧与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- SHI Chong, XU Weiya. Numerical simulation techniques and practice of particle flow[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2015.
- [15] 王刚, 袁康, 蒋宇静, 等. 基于颗粒离散元法的锚固节理剪切行为宏观研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(12): 2381-2389.
- WANG Gang, YUAN Kang, JIANG Yujing, et al. Macro-micro mechanical study on bolted joint subjected to shear loading based on DEM[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2381-2389.
- [16] Itasca Consulting Group. PFC2D(particle flow code in 2 dimensions) fish in PFC2D[R]. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group, 2008: 20-22, 83-85.
- [17] 王晓卿. 节理煤体模型重构及其力学响应特征研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.
- WANG Xiaoqing. Model reconstruction of jointed coal and its mechanical response characteristics[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2017.
- [18] 袁康, 蒋宇静, 初振云, 等. 基于颗粒离散元法的岩体结构面锚固机理细观研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2014, 33(6): 76-84.
- YUAN Kang, JIANG Yujing, CHU Zhenyun, et al. Microscopic research on anchorage mechanism of bolted rock joint based on DEM[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 33(6): 76-84.
- [19] 腾俊洋, 张宇宁, 唐建新, 等. 锚固方式对节理岩体剪切性能影响试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2279-2285.
- TENG Junyang, ZHANG Yuning, TANG Jianxin, et al. Experimental study on the influence of anchoring method on the shear behavior of jointed rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2279-2285.

(编辑 桂智刚)