

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.05.18

锚固的贯通节理岩体剪切破坏特性分析

宋 洋¹, 张峰源², 李永启², 杜炎齐¹, 王韦颐²

(1. 辽宁工程技术大学建筑与交通学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为了研究节理对锚固岩体力学特征和失稳损伤演化的影响, 采用对锚固贯通节理岩体进行室内剪切试验和 PFC^{2D} 数值模拟的方法, 研究不同节理倾角下锚固贯通节理岩体剪切性能的作用机制和破坏模式, 研究结果表明: (1) 随着节理倾角变化, 贯通节理岩体呈现出不同的破坏形式, 锚固贯通节理岩体的抗剪强度与剪切位移曲线并不是呈线性增长, 而是呈“双驼峰”趋势。(2) 锚固体系在剪切试验的过程中, 节理面颗粒的接触方位角会发生一定程度的改变, 主要集中在锚杆和节理倾角附近。(3) 锚固体系在剪切试验的过程中, 会因为颗粒间黏结键的断裂生成裂纹, 裂纹数生成的越少, 其抗剪强度越高, 裂纹分为张拉裂纹和剪切裂纹, 并且张拉裂纹的数量要远远大于剪切裂纹的数量。研究结论可用于实际工程破坏模式的预测和岩体工程稳定性评价。

关键词: 贯通节理锚固岩体; 节理倾角; 剪切试验; 颗粒流 PFC^{2D}; 破坏模式

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)05-0133-08

Shear failure mode of anchored rock mass with through joints

SONG Yang¹, ZHANG Fengyuan², LI Yongqi², DU Yanqi¹, WANG Weiyi²

(1. School of Architecture and Transportation, Institute of Civil Engineering Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China; 2. School of Architecture and Construction, Institute of Civil Engineering Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: In order to study the influence of joints to the mechanical characteristics of rock mass and the evolution of instability damage, by using anchoring through joint rock PFC^{2D} doing indoor shear test and numerical simulation method, studying the anchoring through joint rock mass under different joint angle shear performance of the mechanism of behaviour and failure mode, the result shows that: (1) with joint angle changing, it presents different failure modes through joint rock samples, and anchor through joint shear strength of rock mass and the shear displacement curve is not a linear growth, but a trend of “double hump”. (2) During the shear test of the anchorage system, the contact azimuth angle of jointed surface particles changes in a certain extent, mainly in the vicinity of the anchor rod and the joint inclination angle. (3) During the shear test the anchorage system, it will generate cracks in the anchorage system due to the fracture of the interparticle bonding bond. The fewer the number of cracks are, the higher the shear strength is. The cracks include tensile crack and shear crack, and the number of tensile crack is much larger than the shear crack's. The results can be used to predict the actual failure mode and evaluate the stability of rock mass engineering.

Keywords: jointed anchored rock mass; joint inclination; shear test; particle flow PFC^{2D}; failure mode

收稿日期: 2019-12-04; 修订日期: 2020-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(51974146); 辽宁省自然科学基金(2019-ZD-0042)

第一作者: 宋 洋(1982-), 男, 辽宁丹东人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方向的研究。E-mail: lgdsongyang@163.com

通讯作者: 张峰源(1996-), 男, 辽宁大连人, 硕士研究生, 主要研究方向为岩土工程。E-mail: 805285659@qq.com

0 引言

岩体作为一种普遍的非连续介质,内部蕴含各种滑动面、裂隙、节理、弱面以及断层等。岩体中的节理对岩体力学特征和失稳损伤演化起着主导作用,在压剪应力作用下岩块沿节理面产生剪切位移导致失稳是最常见的破坏模式。岩体中的节理不仅削弱岩体的稳定性,而且造成岩体内应力分布冗杂。因此锚固节理岩体剪切破坏特征尤其是塑性剪切破碎带的研究具有重要意义。

国内外很多学者对岩体进行了大量的宏观研究,取得了卓有成效的研究成果。钱庆波等^[1]总结出在峰值荷载前后新生裂隙扩展表现出明显不同的特点,在峰值荷载之前新生裂隙经受了压密、剪切裂隙增长、拉伸裂隙和剪切裂隙共同增长等阶段;郭朋瑜等^[2]得出试样破裂面可分为翼部拉张区、翼部压剪区、端部拉张区三部分,各区面积所占比例随节理位置变化而波动;张永政等^[3]研究不同粗糙度下锚固节理岩体的破坏特征和锚固机理,得出了当剪切试验中节理面的微凸体没有发生太大的破坏时,锚固体体系的峰值剪切强度随粗糙度的增加而不断变大的结论;连连等^[4]对不同充填厚度下节理面的剪切破坏行为和强度特性进行研究,结果表明在同一粗糙度下,不同厚度充填节理的破坏模式没有明显区别,主要表现为粘结面的破坏;REIK等^[5]对贯通节理岩体试件进行了真三轴压缩试验,得出了当应力与节理走向平行时,中间主应力的影响相对较小;FERRERO^[6]对加锚混凝土及岩石进行了剪切试验指出影响抗剪强度的因素有锚杆材质、杆体尺寸及岩体类型;宋英龙等^[7]通过 PFC^{2D} 软件利用单轴压缩试验标定水泥砂浆试块得出了随着节理形貌错位量的增加峰值抗剪强度不断减小;王刚等^[8]基于颗粒流理论,分别在恒定法向刚度与恒定法向荷载边界下,讨论了不同节理形貌岩石节理面的细观破坏机理与力学性质变化规律;通过以上总结,目前国内外对节理岩体的强度影响因素有一定研究,但是对不同节理倾角下锚固节理岩体宏观剪切破坏还需进一步深入研究,本文考虑不同节理倾角,采取室内试验与数值模拟相结合的办法,分别从宏观和细观的角度对锚固节理岩体的破坏进行分析,研究不同节理倾角锚固节理岩体剪切行为和破坏模式。

1 试验概况

1.1 试验方案与试件制作

由于采集真实锚固节理岩体困难,故选择相似材料制作锚固节理岩体。本文采用的材料是水泥、砂和水并且按照质量比为 1:1:0.45 搅拌制成试件,所得材料的物理性质与岩石比较接近,根据研究目的设计的试验方案如表 1 所示。

表 1 节理岩体实验方案设计

Table 1 Experimentation design of jointed rock mass

	试验方案种类	选用试件情况
节理倾角/(°)	0、30、45、60	贯通节理
锚杆直径/mm	8	

根据表 1 的方案制作岩体试件,并用素水泥浆液黏合试件的两部分,预留直径为 10 mm 贯通的孔洞作为锚杆钻孔放置锚杆,图 1 为制作好的锚固节理岩体。

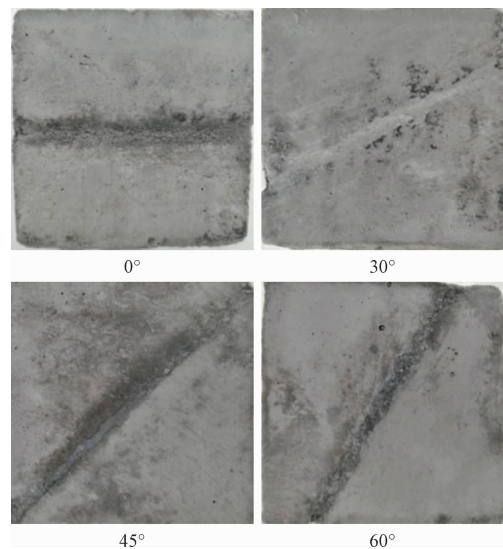


图 1 不同节理倾角下锚固节理岩体试件

Fig. 1 Anchor-added through jointed rock mass specimens at different joint inclinations

1.2 试验内容

本次试验主要研究节理倾角对锚固节理岩体力学特性的影响,对节理倾角为 0°、30°、45°、60°的锚固贯通节理岩体试件进行了剪切试验。采用辽宁工程技术大学岩土实验室的 TAW-2000 电液伺服岩石三轴试验机,为了降低端部效应对试验结果的影响,试验前在试件端面涂适量机油,这样不仅能降低试件与刚性承压板之间的摩擦约束,还能降低加载过程中产生的应力集中,采用位移控制法进行加载,加载速率控制在

0.1 mm/min,并根据应变率进行相应调整,剪切位移达到 5 mm 为试验结束的标志,试验结果由计算机自动采集。



图 2 TAW-2000 电液伺服岩石三轴试验机
Fig. 2 TAW-2000 electro-hydraulic servo triaxial testing machine

2 节理倾角对锚固节理岩体宏观剪切特性的影响

2.1 节理倾角对锚固节理岩体抗剪强度分析

锚固节理岩体主要依靠充填在节理中的素水泥浆液与节理面之间的“胶结作用”和锚杆刚度共同抵抗剪切应力。锚固节理岩体剪切应力—剪切位移曲线如图 4 所示,不同节理倾角锚固节理岩体的曲线略有差别,但趋势相同呈“双驼峰”趋势,随着节理倾角的增加,最大剪切强度变化趋势不是单调的出现的峰值点而且发生的位置出现滞后,说明贯通节理倾角对锚固节理岩体的剪切破坏有影响,节理降低了锚固节理岩体的抗剪强度,由图 4 可知节理倾角为 45°时贯通节

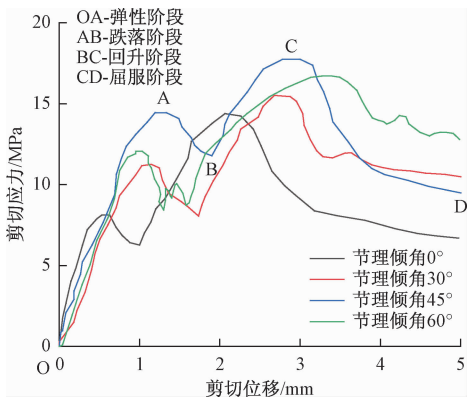


图 4 不同节理倾角加锚贯通节理岩体剪力-位移曲线
Fig. 4 Shear force-displacement curve of rock mass with anchor through joints at different joint inclinations

理锚固岩体的抗剪强度最大,由表 2 可知此时的抗剪强度达到 17.9MPa。

表 2 不同节理倾角最大抗剪强度-剪切位移

Table 2 Maximum strength against shear force-shear displacement at different joint inclinations

节理倾角/(°)	最大抗剪强度/MPa	剪切位移/mm
0	14.4	2.07
30	15.6	2.81
45	17.9	3.21
60	16.7	3.6

综合分析 4 种节理倾角下锚固节理岩体的抗剪强度曲线,曲线呈“双驼峰”趋势,对曲线各阶段的特征分析如下:

OA 段:弹性阶段,该阶段曲线基本呈直线,此阶段由岩体自身和素水泥浆液与节理面之间的“胶结作用”共同抵抗剪切应力。

AB 段:跌落阶段,该阶段剪切应力发生下降,原因在于节理面与岩体和节理面与锚杆交界处的水泥浆液发生破坏,界面胶结力丧失,此阶段锚杆也发挥作用,锚杆抗剪贡献值小于胶结丧失的抗剪值,表现为剪切应力下降。

BC 段:回升阶段,该阶段剪切应力发生回升,原因在于节理与岩体之间的“胶结作用”发生破坏,锚杆发挥主要的抗剪作用,锚杆抗剪贡献值大幅度上升,锚固贯通节理岩体刚度回升。锚杆对节理面抗剪性能有增强效应,使锚固贯通节理岩体抗剪强度仍有一定程度的增长,岩体的稳定性得到提高。

CD 段:残余阶段,该阶段锚杆形状发生改变由初始阶段的“1”字型转化成“之”字形,试验结束锚杆未被剪断发生屈服变形,锚杆的抗剪强度下降导致锚固贯通节理岩体的抗剪强度下降。

2.2 节理倾角对锚固节理岩体裂隙生成的影响

锚固贯通节理岩体的力学特性受节理面倾角的影响非常明显,试验发现当锚固节理岩体变形到一定阶段后,岩体沿节理面产生了明显的相对滑移和错动,岩体表面出现裂纹并逐渐增多,裂纹延伸方向主要沿节理角度方向,锚固节理岩体的抗剪强度由岩体、节理和锚杆共同提供。当节理倾角不同时,锚固岩体将出现两种不同的破坏模式:沿节理面的剪切破坏和沿最大剪切应力方向的张拉破坏,初始阶段锚固节理岩体裂隙发展缓慢,裂隙走向基本都和最大剪切应力方向平行或成一定的夹角,随着剪切位移的逐渐增加裂隙的数量和尺寸不断增涨,剪切一段时间后,初始裂隙得到

充分扩展并且大量新裂隙开始产生,最后裂隙贯通导致试件破坏。在加载初期不同节理倾角的锚固节理岩体,裂隙生成规律大致相同,但是随着剪切位移的增加则出现不同的裂隙生成,锚固节理岩体剪切破坏形态如图 5 所示。



图 5 锚固贯通节理岩体破坏形态图

Fig. 5 Failure pattern diagram of anchoring through jointed rock mass

3 节理倾角对锚固节理岩体细观剪切特性的影响

3.1 模型参数标定

由于在室内试验中颗粒接触模量、黏聚力、法向抗拉强度等力学性质的细观参数无法直接获得,所以采用 PFC 内置的参数标定程序^[9]对岩体材料的弹性模量、抗拉强度等进行标定,为了准确地模拟锚固节理岩体实际的破坏形态,采用的细观参数见表 3。

表 3 各种材料 PFC 模型细观参数

Table 3 Microscopic parameters of PFC models of various materials

	颗粒半径 $R_{\min}$ /mm	$R_{\max}$ /颗粒接触 模量/Pa	黏聚力 pb_coh	法向抗拉 强度 pb_ten	摩擦角 pb_fa	摩擦 系数 fric
岩石	0.001	1.2	5.00×10^8	4.00×10^6	1.00×10^6	23
锚杆			5.00×10^{10}	4.00×10^9	4.00×10^8	50
节理			2.00×10^6	0	0	0
						23

3.2 锚固节理岩体 PFC 模型的抗剪强度

剪切过程中锚固节理岩体主要处于压剪应力状态,本文采用 PFC 内置的 FISH 语言编程建立直剪试验模型,对含有不同节理倾角的锚固节理岩体的破坏模式进行研究与分析。直剪试验数值模拟模型如图 6

所示,剪切盒基本模型主要由 6 面墙体组成,其中 2 号、4 号、5 号墙体构成上部剪切盒,4 号墙体作为伺服墙体,对模型施加恒定的法向荷载,加载墙体为 2 号和 5 号墙体,使上部剪切盒可以水平运动,下部剪切盒固定不动。本文建立锚固岩体模型的主要部分包括上下块体、锚杆、节理,锚固节理岩体的宽和高均为 100 mm。对不同的节理倾角的锚固节理岩体分别进行直剪模拟试验,得出剪切应力与剪切位移之间的关系,试验数据与模拟数据对比如图 7 所示,数值模拟曲线符合试验所获得曲线的特点,都是呈“双驼峰”的形状,模拟所得节理倾角为 45°时的锚固节理岩体抗剪强度最大,符合实验结果,标定所获得的细观参数可用于模拟室内试验剪切。

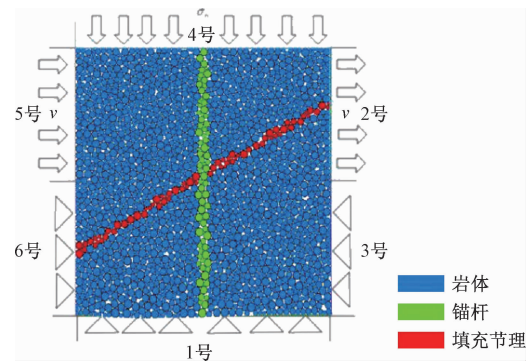


图 6 加锚节理剪切数值模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of shear numerical model of anchor joint

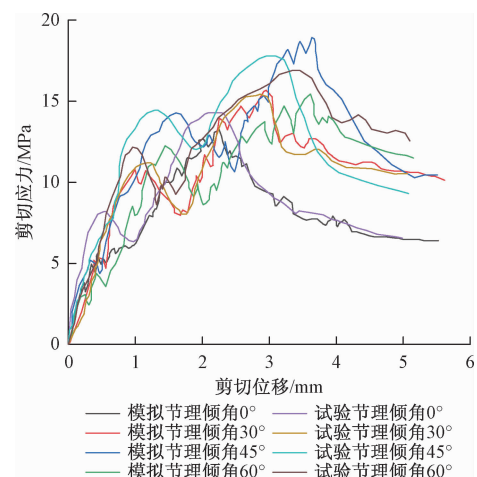


图 7 试验—模拟曲线对比图

Fig. 7 Comparison diagram of test-simulation curve

3.3 锚固节理岩体颗粒间接触方位演化特性

在剪切过程中颗粒间接触力的方向和大小都是不断变化的,本文利用 PFC 内部的 FISH 语言编程对锚

固节理岩体内部颗粒接触方位角进行检测。图8和图9是不同节理倾角下颗粒接触方位演化图,不同节理

倾角下锚固贯通节理岩体内部颗粒间法向接触力变化趋势基本一致的,但颗粒间切向接触力是有差异的。

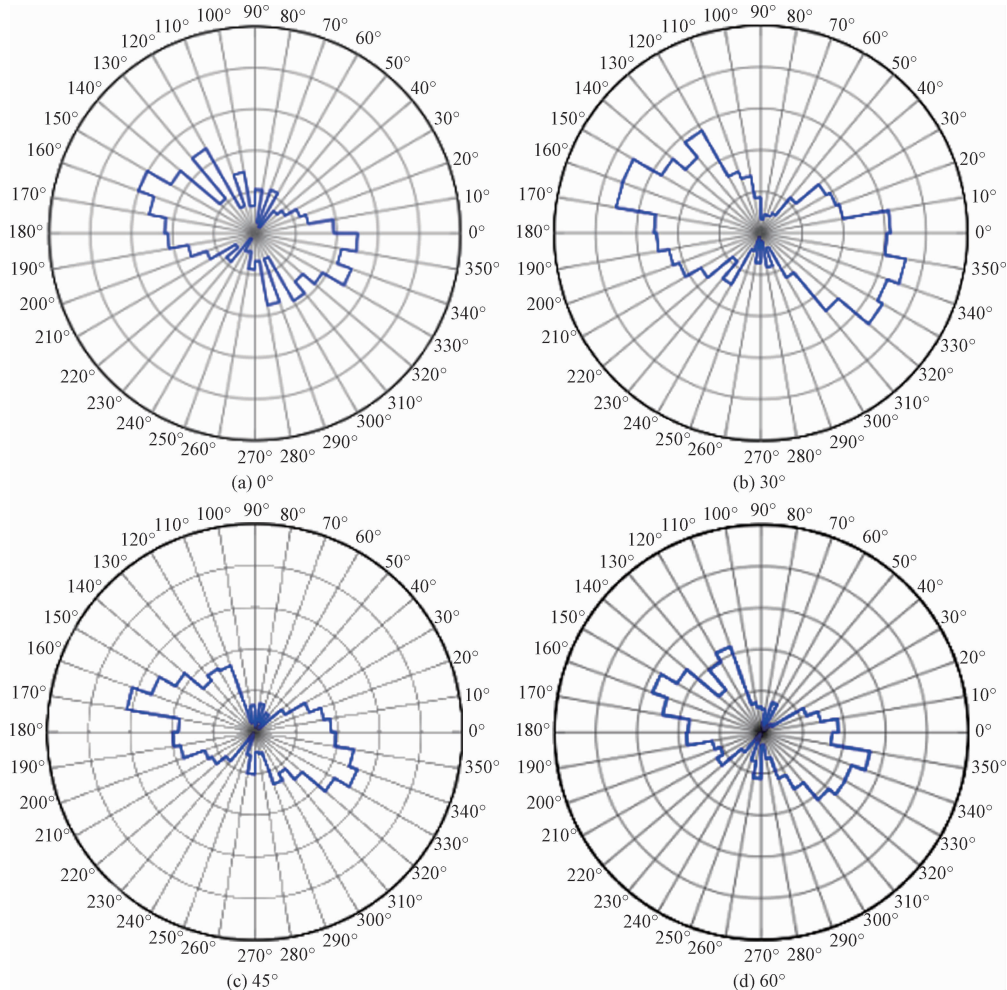


图8 不同节理倾角下加锚贯通节理岩体内部颗粒间法向接触力的统计分布

Fig. 8 Statistical distribution of normal contact force between particles in anchoring through jointed rock mass at different joint inclinations

随着锚固体系受切向荷载作用,颗粒间接触愈发充分,但接触力分布并不均匀,接触方位角也不同:节理倾角为 0° 的锚固体系接触方位角主要集中在 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 、 $100^{\circ} \sim 130^{\circ}$ 、 $200^{\circ} \sim 220^{\circ}$ 和 $280^{\circ} \sim 290^{\circ}$;节理倾角为 30° 的锚固体系接触方位角主要集中在 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 和 $200^{\circ} \sim 220^{\circ}$;节理倾角为 45° 的锚固体系接触方位角主要集中在 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 和 $210^{\circ} \sim 230^{\circ}$;节理倾角为 60° 的锚固体系接触方位角主要集中在 $40^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 和 $210^{\circ} \sim 240^{\circ}$;曲线包围的面积越大接触力越大。从图9可以看出:随着节理倾角的变化,切向接触力的大小和方位角是不断发生变化,并逐渐向节理方向发生一定的偏转,最终切向接触方位角基本偏向节理倾角,这主要是由于剪切过程会导致节理面的剪胀,导致锚

固贯通节理岩体组构发生改变引起的。综上所述,在整个锚固节理岩体剪切过程中随着剪切位移增加,锚固节理岩体的颗粒的接触数量及接触方位角分布区域分布不同,颗粒间接触方位角向节理倾角方向发生偏转。

通过对图9和表4进行分析,节理倾角为 45° 加锚贯通节理岩体颗粒间真实的接触总数最多,切向颗粒接触力最大,说明锚固体系在剪切过程中节理倾角为 45° 时锚固贯通节理岩体抗剪强度效果最好,符合室内试验结果。

3.4 锚固节理岩体颗粒间裂隙特征

利用PFC内部的FISH语言对锚固节理岩体因剪切生成的裂隙进行了动态监测。图10为当剪切位移

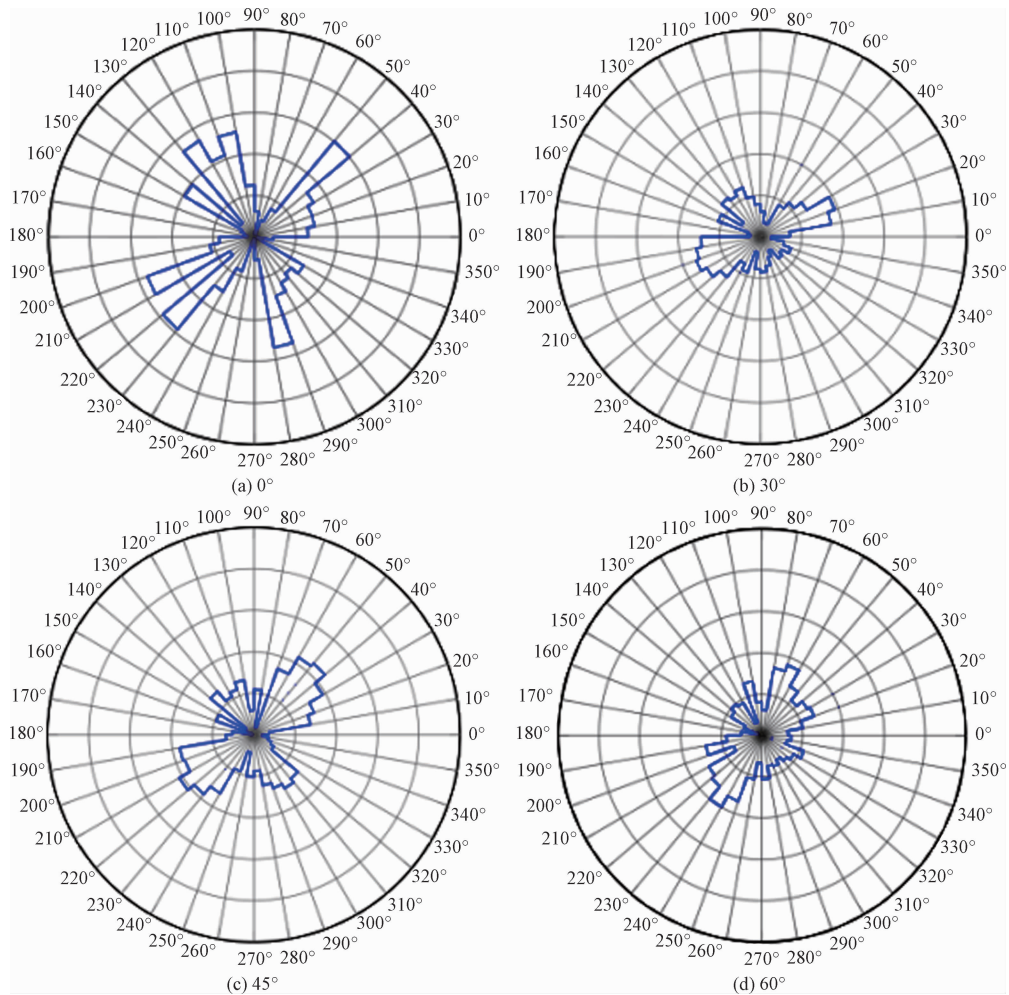


图 9 不同节理倾角下加锚贯通节理岩体内部颗粒间切向接触力的统计分布

Fig. 9 Statistical distribution of tangential contact forces between particles in anchoring through jointed rock mass at different jointed inclinations

表 4 颗粒间力链统计

Table 4 Force chain statistics between particles

节理倾角/(°)	颗粒间真实接触总数	法向平均接触力/N	法向最大接触合力/N	切向平均接触力/N	切向最大接触合力/N
0	4 610	1 334 969	2 951 394	395 139	1 594 584
30	4 786	1 396 724	3 230 908	430 815	1 489 936
45	4 909	1 411 890	3 429 526	465 173	1 698 299
60	4 667	1 242 912	2 766 671	410 173	1 457 687

达到 5 mm 时不同节理倾角下锚固体系中裂隙分布情况,锚固节理岩体在加载过程中产生的宏观裂隙是由产生的微观裂隙不断增加并且最终贯通引起的,在同等剪切位移的条件下岩体抗剪强度越高所生成的裂隙越少。图 10 中黑色部分代表的是因剪切生成的裂隙,红色线条代表的是锚杆,裂隙主要在剪切、节理以及锚杆附近生成,在剪切之后锚杆呈明显的“之”字形,这也与室内试验相吻合,裂隙生成的位置也与试验产生

的裂隙位置相符合。四组试验模拟除了节理倾角不同其余模拟条件一致,模拟结果说明不同的节理倾角对岩体抗剪强度会产生不同的影响。综合图 10 与图 11 可以得出结论:在节理倾角为 45°时,锚固贯通节理岩体的抗剪强度最高,产生裂隙数量最少,抵抗剪切变形的效果最好,不同节理倾角的锚固贯通节理岩体产生的张拉裂隙的数量远大于剪切裂纹的数量,这是由于锚杆与周围的颗粒挤压十分剧烈,导致颗粒黏结发生断裂,符合挤压导致张拉裂纹作用机理。

3.5 锚固节理岩体颗粒间裂隙发展规律

利用 PFC 内部的 FISH 语言对处于剪切试验状态下的锚固节理岩体内部细观裂隙的生成进行了动态监测,对节理倾角是 45°的锚固节理岩体进行检测。结合宏观试验对模拟结果进行分析,检测点 1、2 是处于弹性阶段,此阶段有岩体和素水泥浆液与节理面之间

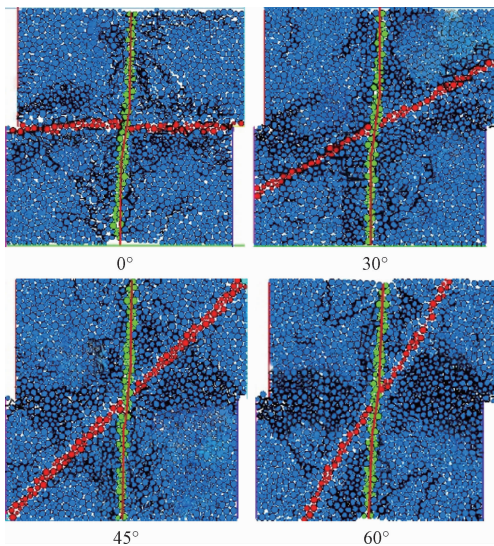


图 10 不同节理倾角下加锚贯通节理岩体内部裂隙分布
Fig. 10 Distribution of internal fractures in rock mass with anchor through joints at different joint inclinations

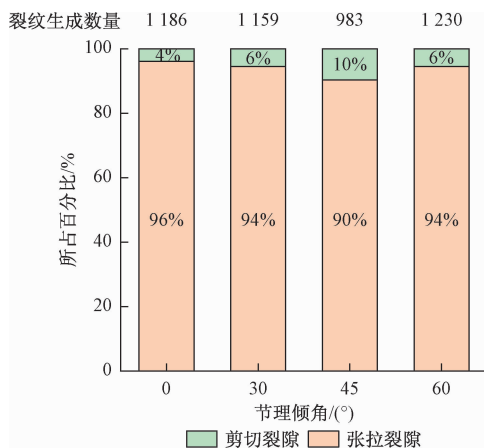


图 11 锚固贯通节理岩体剪切裂隙图
Fig. 11 Shear fracture table of anchored through jointed rock mass

的“胶结作用”抵抗剪切应力,可以看出裂隙主要在节理附近产生;监测点 3、4 是处于跌落阶段的监测点,此阶段节理面上下盘之间或节理面与锚杆交界处的水泥浆发生破坏,锚杆发挥抗剪作用,节理附近继续生成裂隙,锚杆附近也开始产生裂隙并逐渐增多;监测点 5、6 是处于回升阶段的监测点,此阶段素水泥浆液与节理面之间的“胶结作用”发生破坏,锚杆发挥主要的抗剪作用,此时裂隙主要生成的位置是锚杆附近,节理附近也有裂隙生成,但数量没有锚杆附近裂隙多;监测点 7 是处于残余阶段的监测点,锚杆发生屈服变形,节理和锚杆附近均生成裂隙;裂隙发展阶段情况符合宏观试验破坏阶段。

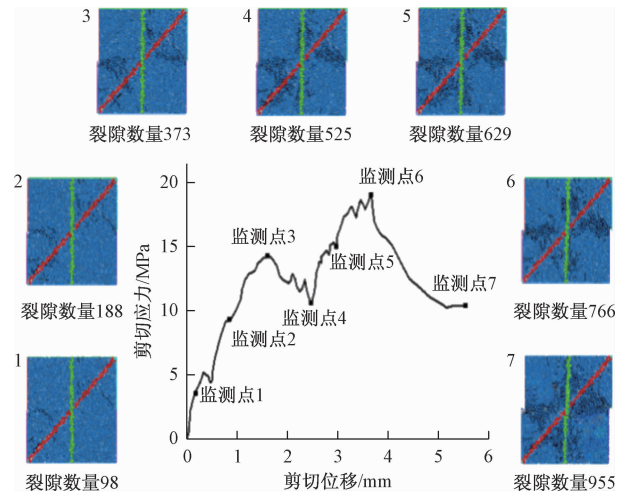


图 12 节理倾角 45°锚固岩体裂隙发育图
Fig. 12 Fracture development of rock mass with joint inclination angle of 45°

4 结论

(1)随着节理倾角的改变,锚固贯通节理岩体的抗剪强度曲线并不是呈线性增长,而是趋向于“双驼峰”趋势,当节理倾角为 45°时,锚固贯通节理岩体的抗剪强度最大,当节理倾角为 0°时,锚固贯通节理岩体抗剪强度最小。

(2)锚固节理岩体在剪切试验的过程中,颗粒间的接触方位角会向节理倾角方向发生转动,接触力的方向并不均匀,但是分布区域还是有一定规律,主要集中在节理附近。

(3)锚固节理岩体在剪切试验的过程中,会因为颗粒间黏结键的断裂生成裂纹,裂纹数生成的越少,其抗剪强度越高,当节理倾角为 45°时,因剪切生成的裂纹数最少,所以抗剪强度最高,裂纹数量多为张拉裂隙,且高于剪切裂纹。

(4)室内试验与 PFC 数值模拟的宏观结合得到整体、连续的裂隙分布,能够用不同阶段下的细观裂隙表征不同阶段下的试件宏观破碎,从而揭示锚固节理岩体内部裂隙演化规律,使其可以运用到实际工程破坏模式的预测和岩体工程稳定性评价中。

参考文献:

- [1] 钱庆波, 徐金明, 黄继忠. 基于 PFC^{2D}的花岗岩新生裂隙萌生扩展过程分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(5): 122 - 130. [QIAN Q B, XU J M, HUANG J Z. Analysis on the initiation and propagation of newly-generated cracks in granite using

- PFC^{2D} [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(5):122–130. (in Chinese)]
- [2] 郭朋瑜, 吉锋, 何双, 等. 节理分布位置对岩体剪切破裂特征影响试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3):81–87. [GUO P Y, JI F, HE S, et al. An experimental study of the influence of discontinuous structural planes at different locations on the shear fracture characteristics of rock mass [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 81–87. (in Chinese)]
- [3] 张永政, 王刚, 马明, 等. 不同粗糙度下锚固节理破坏机理宏观细观研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(12):3373–3383. [ZHANG Y Z, WANG G, MA M, et al. Macro-micro study on failure mechanism of rock mass anchorage joints under different roughness [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(12):3373–3383. (in Chinese)]
- [4] 连莲, 张书博, 王扬, 等. 不同充填厚度节理面剪切破坏宏观细观机理研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(3):756–764. [LIAN L, ZHANG S B, WANG Y, et al. Macro-microscopic study on shear failure behavior of joint s under different filling thicknesses [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2019, 44(3): 756–764. (in Chinese)]
- [5] REIKG, ZACAS M. Strength and deformation characteristics of jointed media in true triaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979, 16(2):24.
- [6] FERRERO A M. The shear strength of reinforced rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1995, 32(6):595–605.
- [7] 宋英龙, 夏才初, 唐志成, 等. 不同接触状态下粗糙节理剪切强度性质的颗粒流数值模拟和试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 2028–2035. [SONG Y L, XIA C C, TANG Z C, et al. Numerical simulation and test validation for direct shear properties of rough joints under different contact states[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 2028–2035. (in Chinese)]
- [8] 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细观机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(4):1442–1453. [WANG G, ZHANG X P, JIANG Y J, et al. Meso-mechanism research on shear failure of rock joint based on particle discrete element method[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(4):1442–1453. (in Chinese)]
- [9] Itasca Consulting Group Incorporation. PFC^{2D} augmented Fish Tank [R]. Minnesota: Itasca Consulting Group Incorporation, 2004.