

砂岩直接剪切试验三维离散元分析

杨开新¹, 陈有亮¹, 蒋明镜^{1,2,3,5}, 王华宁⁴

(1. 上海理工大学 土木工程系, 上海 200093; 2. 同济大学 土木工程防灾重点实验室, 上海 200092;
3. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 4. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092;
5. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 为了研究高地应力作用下的深部岩体的剪切力学特性,将半经验半理论胶结接触模型植入离散元软件,模拟了砂岩的直接剪切试验,对砂岩的宏、微观特性进行详细的分析。模拟结果表明:砂岩的直剪数值试验过程可以分为3个阶段,即线性剪切阶段、应力衰减阶段及残余强度阶段;剪切过程中,外界做功主要转化为颗粒摩擦耗能,并始终存在着能量守恒;胶结破坏数目会随着剪应变的增大而增加,胶结拉区破坏数目大于胶结压区破坏数目,胶结破坏形式均由弯破坏形式主导;裂纹首先从剪切面两端产生,拉区裂纹产生于剪切面中间,向剪切面两端以及上、下侧扩展,压区裂纹从剪切面两端向中间扩展,最后拉区裂纹与压区裂纹相互贯通布满整个剪切面,在空间上最终形成一个截面呈椭球状的分布域;本文的直剪数值试验结果与砂岩剪切试验结果基本一致。

关键词: 砂岩; 裂纹扩展机理; 高地应力; 离散单元法; 直接剪切试验

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2020)06-0216-08

Direct shear test analysis of sandstone by 3D discrete element method

YANG Kaixin¹, CHEN Youliang¹, JIANG Mingjing^{1,2,3,5}, WANG Huaning⁴

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 5. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to investigate the shear mechanics of deep rock masses under high ground stress, a semi-empirical and semi-theoretical bonded contact model was implanted into discrete element software to simulate the direct shear test of sandstone, through which the macroscopic and microscopic characteristics of sandstone were analyzed in detail. The simulation results show that the direct shear test of sandstone can be divided into three stages: the linear shear stage, the stress decreasing stage and the residual strength stage. During the shearing process, the external force is mainly converted into particle frictional energy, so energy conservation always exists in the system. The number of bond failures increases with the increasing of shear strain. The number of bond failures in the tensile zone is greater than that in the compressive zone. And the failure modes of bond are dominated by bending failure mode. Cracks start to generate from both ends of the shear plane, cracks of tensile zone first occur in the middle of the shear plane and then propagate to the ends, upper and lower side, whereas the cracks of compressive zone propagate from both ends of the shear plane to the middle. Then, the cracks of tensile and compressive zone connect and penetrate through the entire shear plane, form a distribution domain with an ellipsoid-shaped section. The results of direct shear numerical tests of sandstone are consistent with those of the laboratory test.

收稿日期:2020-01-13; 修回日期:2020-05-30

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB046901)

作者简介:杨开新(1996-),男,安徽六安人,硕士研究生,研究方向为岩土工程。

通讯作者:蒋明镜(1965-),男,江苏如皋人,博士,教授,博士生导师,研究方向为太空土和深海能源土的宏观微观试验、本构模型和数值分析。

Key words: sandstone; crack growth mechanism; high ground stress; discrete element method (DEM); direct shear test

1 研究背景

随着“一带一路”建设的不断推进,交通、水利水电工程和资源开采等正在向深部地层快速发展,超千米深的隧道、矿井、地下洞室等工程越来越普遍。对岩体强度和变形特性以及破坏机理的研究是岩体稳定性分析的基础,进而提高岩体工程设计的合理性^[1]。直接剪切试验能够有效地模拟剪切面的受力状况,并能充分考虑在不同法向应力下的裂纹扩展贯通情况,是研究岩土类材料剪切力学特性的有效手段之一^[2-3]。由于直剪试验结果对试样制备技术和边界加载条件十分敏感,并且试样破坏时裂纹扩展情况等微观信息也无法全面地获取,因而许多研究人员青睐于采用数值方法来研究岩土类材料的剪切特性,其中由 Cundall 等^[4]提出的离散单元法(discrete element method, DEM)是一种研究岩石剪切特性和破坏机理的可行方法。夏才初等^[5]、宋英龙等^[6]采用 PFC2D 生成粗糙节理面并模拟其剪切性质。结果表明:宏观剪切区域的产生主要是由细观剪裂纹的累积形成的,剪切破坏区域集中在爬坡效应显著的位置,剪切过程中形成的剪裂纹数量在出现剪切峰值应力后显著增加,此时粗糙节理面的破坏最为显著。Jiang 等^[7-9]将基于室内试验得到的岩石微观力学模型植入离散元软件,模拟了由化学风化导致的共面非贯通与非共面非贯通节理岩体的直剪试验,分析了预制节理连通率、节理倾角、法向应力和节理间距对岩体力学特性和贯通模式的影响,并揭示了相应的宏微观机制。结果表明:节理岩体的全剪切过程包括弹性剪切、裂缝扩展、岩桥破坏和贯穿不连续 4 个阶段;非贯通非共面节理岩体试样的破坏由节理端点处因拉应力导致的翼裂纹开始,随着剪切位移的增加,翼裂纹朝着最大压力方向扩展,并最终贯通岩桥。Shang 等^[10]基于离散单元法研究了边界条件(恒定法向载荷(constant normal load, CNL)和恒定法向刚度(constant normal stiffness, CNS))对直剪初始岩石不连续面破坏机理的影响。结果表明:CNL 和 CNS 边界条件显著影响初始岩石不连续面的剪切特性;施加相同的法向应力下,与 CNL 直剪的结果相比,CNS 直剪中的峰值剪切应力显著增加,与新产生的微裂纹的开放和岩桥内破裂带的产生有关,导致正应力的急剧增加。

Jiang 等^[11]研究了直接剪切试验中砂土的临界状态特性和主应力旋转问题,并分析了作者提出的考虑抗滚动和抗扭转的三维接触模型的影响。结果表明:在剪切应变达到 15% 以后,剪切区域达到临界状态,而整个试样并未达到临界状态;主应力旋转趋势与剪切应力的变化相似;考虑抗滚动和抗扭转的三维接触模型可以很好地反映砂土的剪切力学行为及变形特性。

上述研究多集中于节理岩体的剪切力学行为及变形特性,能够较好地反映节理岩体的剪切特性以及裂纹发展情况,但对于直剪试验过程的宏、微观分析仍不够全面,且多局限于二维数值模拟层面,对于深部高地应力作用下岩石的剪切力学特性的研究明显不足。针对以上问题,本文基于本团队的三维砂岩半经验半理论胶结接触模型,将该模型植入商业软件 PFC3D 中,进行了不同法向应力下的直剪数值试验,对砂岩的剪切特性进行了全面地宏、微观分析,试图探寻岩石在直剪试验过程中的裂纹扩展机制,为研究深部岩体的剪切力学行为与深部岩体工程设计提供借鉴。

2 接触模型与微观参数

为了更加合理有效地模拟出真实岩石地力行为与变形特性,本文微观接触模型的半经验半理论胶结强度准则^[12]曲线如图 1 所示,其中图 1(a)、1(b)和 1(c)分别描述了胶结在单纯法向应力作用下的抗剪、抗弯和抗扭强度。剪-弯-扭耦合强度包面采用 Shen 等^[13]提出的表达式,如图 1(d)所示,其描述了胶结在法向、剪切、弯转和扭转共同作用下的强度。由图 1(d)可知,剪-弯-扭耦合强度包面的大小取决于其 3 个方向的轴长,而这 3 个方向的轴长又取决于胶结的法向应力,因此剪-弯-扭耦合强度包面的大小取决于胶结的法向应力。

本团队在半经验半理论胶结强度准则的基础上,将其引入三维颗粒含抗弯转和抗扭转接触模型^[14]形成新的胶结接触模型,并将该新胶结接触模型命名为半经验半理论胶结接触模型。新模型吸收了双球胶结接触试验的经验,并同时考虑了材料的理论强度,因此与单纯的经验模型和理论模型相比更具合理性也更加可靠。本文参数标定的对象为深部 Berea 砂岩^[15],通过 Bera 等^[16]的 CT 扫描图(图 2)间接获得其颗粒级配曲线(图 3)。本文选择深部

Berea 砂岩为目标岩石主要基于以下几个方面考虑:(1)此种岩石的室内三轴试验资料比较完整,包含 9 个围压的全过程试验数据,并且围压的范围符合高应力的要求;(2)能够获得此种岩石的微观 CT 扫描图;(3)砂岩的成岩过程相对易于模拟,有利于定量模拟的成功实施。为了提高计算效率,在进行参数标定^[12]时采用 1.27×10^4 颗粒的小尺寸试样

来模拟岩石的常规三轴试验。试样长宽高的比例约为 1:1:2.5,参数标定模拟试样如图 4 所示。

以 Berea 砂岩室内三轴压缩试验^[16]分别在 10 和 40 MPa 两种围压下的全过程应力-应变曲线为逼近对象,通过对比分析不断调整微观参数,并以其其他围压下的全过程应力-应变曲线为辅助,最终选定试样的微观参数^[12]如表 1 所示。

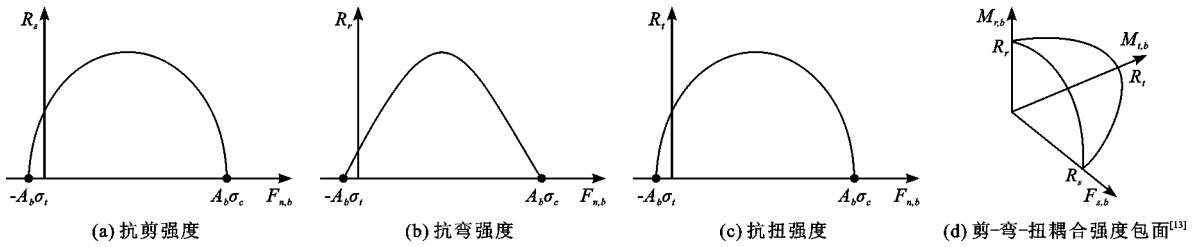


图 1 半经验半理论胶结强度准则曲线^[12]

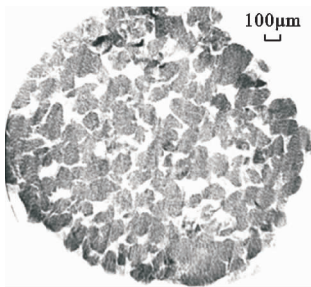


图 2 Berea 砂岩 CT 扫描图^[16]

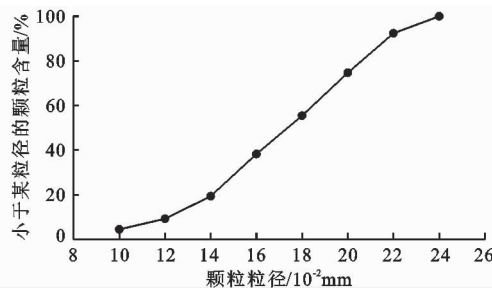


图 3 Berea 砂岩颗粒级配曲线

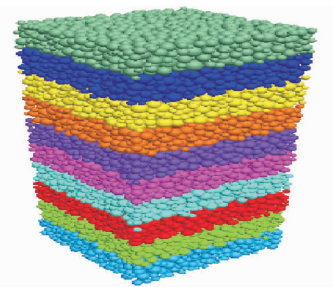


图 4 DEM 参数标定模拟试样^[12]

表 1 Berea 砂岩的微观参数

参数名称	数值	参数名称	数值
试样孔隙比 e	0.78	颗粒与边界抗转动系数	0.0
预压固结压力 p_c /MPa		颗粒与边界的接触弹性模量/($N \cdot m^{-1}$)	3.0×10^{10}
颗粒密度 ρ /($kg \cdot m^{-3}$)	2.65×10^3	局部阻尼系数	0.7
密度放大系数	10^9	胶结弹性模量 E_b /Pa	1.35×10^{10}
颗粒弹性模量 E_p /Pa	3.0×10^{10}	胶结法向与切向刚度比 κ_b	1.5
颗粒法向与切向刚度比 κ	1.5	胶结单位抗拉强度 σ_t /Pa	3.5×10^7
颗粒间摩擦系数 μ	0.3	胶结单位抗压强度 σ_c /Pa	1.4×10^9
颗粒间抗转动系数 β	1.5	胶结宽度系数 λ	1.0
颗粒与边界摩擦系数	0.0	胶结厚度 g_c /m	1.0×10^{-5}

注:预压后试样孔隙比减小是因为在预压固结压力作用下试样被进一步压密。胶结宽度系数 λ 为颗粒间胶结半径与接触半径的比值,即胶结半径等于接触半径与胶结宽度系数的乘积。

3 结果与分析

3.1 直接剪切数值试验模型

岩石的抗剪强度是岩石对剪切破坏的极限抵抗能力,通常用直剪试验测定。本文进行了高应力下砂岩的直剪数值试验,采用正方体试样,包含 4×10^4 颗粒,长、宽、高的比例为 1:1:1,试样尺寸为 5.5

mm \times 5.5 mm \times 5.5 mm,制样时采用与参数标定时一致的颗粒级配,试样模型如图 5 所示。具体直剪试验的 DEM 模拟分为以下 4 个步骤:(1)分层欠压成样。采用分层欠压法^[17]成样,试样分 5 层,每层颗粒数为 8 000,试样目标孔隙比为 0.8,保证了成样后颗粒的重叠量足够小,且考虑了目标岩石为孔隙相对较多的 Berea 砂岩(实测孔隙比为 $0.215 \pm$

0.007)^[16]。这里造成制样孔隙比的差异是由于离散元中胶结部分是虚拟的,没有计算体积,只考虑了力学响应。(2)预压固结。本文模拟的对象为深部岩石,假定目标试样地应力在垂直方向上为30 MPa,应力状态为 K_0 状态。在分层欠压稳定后,固定左右前后四面墙的位置,通过上下墙伺服施加竖向压力30 MPa并达到稳定。(3)生成胶结。在试样预压固结稳定后,在颗粒之间一次性生成胶结,模拟 Berea 砂岩的胶结形成过程。然后将胶结试样卸载至等向受压应力状态,压应力取1 kPa,模拟岩石的取样卸载过程(理论上压应力应该卸载至0,数值试验中取1 kPa 仅仅是为了便于伺服控制)。(4)加载。令上下墙以0.025%/s的应变速率相向运动,模拟岩石直剪试验的加载过程。

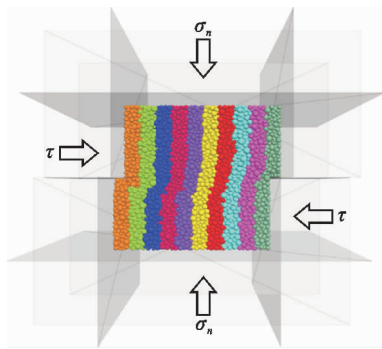


图5 直剪数值试验试样模型图

3.2 宏观结果分析

模拟了法向应力为20、30和40 MPa下的直剪试验全过程,其剪应力-剪应变曲线如图6所示。由图6可知,剪应力-剪应变曲线可以分为3段:(1)线性剪切阶段。剪应力随着剪应变的增大呈线性增大,在此阶段的末端,曲线变为非线性,表明此时剪切面上已经有胶结破坏产生,粗糙的区域开始磨平^[18]。(2)应力衰减阶段。此阶段内,剪应力随着剪应变的增加而减小,对应着胶结破坏继续发生,剪切面上的粗糙区域继续破坏。(3)残余强度阶段。进入此阶段后,剪应力达到一个相对稳定的值,即残余强度,表明试样剪切面上粗糙区域的磨平效应基本结束。

离散元模拟胶结散粒体材料受力变形过程中涉及的能量(功)^[19]包括外界输入功、储存于胶结接触处的胶结弹性能、储存于无胶结接触处的无胶结弹性能、胶结破坏耗散能、黏附型胶结接触处的胶结耗散能、无胶结耗散能、数值阻尼耗散能和颗粒动能,具体含义及表达方式见参考文献[19]。基于上述

基础,将能量划分为颗粒弹性能、颗粒胶结弹性能、颗粒摩擦耗能、颗粒弯转耗能、颗粒扭转耗能、阻尼耗能、颗粒动能。图7给出了直剪试验全过程中各能量(功)的演化情况。分析图7可知,在线性剪切阶段,外界做功主要用于增加颗粒弹性能与颗粒胶结弹性能。随着剪应变的增加,进入应力衰减阶段,颗粒摩擦耗能迅速增加,阻尼耗能也略微增加,表明此时,外界做功主要被颗粒摩擦所消耗,而颗粒弹性能与颗粒胶结弹性能基本达到稳定。在进入残余阶段后,阻尼耗能也基本达到稳定,颗粒摩擦耗能继续增加。整个DEM直剪试验过程中,颗粒弯转耗能、颗粒扭转耗能与颗粒动能(准静态)非常小,可忽略不计,且由能量总和与外界做功近乎相等可知,离散元模拟过程中始终存在着能量守恒。总体而言,整个DEM直剪试验过程中,外界做功主要转化为颗粒摩擦耗能,即剪切过程的本质是剪切面上粗糙区域的磨平,磨平的过程中伴随着大规模的胶结破坏,颗粒间因而产生不平衡力,但整个颗粒体系内部结构处于快速调整状态。

3.3 微观结果分析

基于半经验半理论胶结接触模型,对微观胶结的破坏形式采用了系统的分类^[20]:(1)根据胶结破坏时的法向应力状态,将胶结分为压区破坏和拉区破坏,即当胶结破坏时,如果胶结法向应力为压应力称为压区破坏,如果胶结法向应力为拉应力称为拉区破坏。(2)根据胶结破坏准则耦合强度包面^[13]将胶结破坏形式分为剪破坏、弯破坏和扭破坏,其中剪切项占比最大时称为剪破坏,弯转项占比最大时称为弯破坏,扭转项占比最大时称为扭破坏。结合以上两种分类方法最终可以将胶结破坏分为压应力状态下的剪、弯、扭破坏和拉应力状态下的剪、弯、扭破坏,即压剪、压弯、压扭、拉剪、拉弯和拉扭6种破坏类型。

图8给出了直剪数值试验中各破坏类型的胶结破坏数与剪应变的关系曲线。由图8可知,在线性剪切阶段,胶结破坏数目增长迅速,表明剪切面上粗糙区域的磨平会产生大量胶结破坏;在应力衰减阶段,胶结破坏增长率较小,胶结破坏数目略微增多;进入残余阶段时,胶结破坏数目随着应变的增加近似呈线性增加,此时剪切面上粗糙区域的磨平基本完成,但胶结破坏总数目会随着剪应变的增加而不断增加。直剪数值试验全过程中,胶结破坏形式按上述(1)分类时,胶结破坏形式主要是拉区破坏;按(2)分类时,胶结破坏形式主要是弯破坏,其次是剪破坏,扭破坏最小。结合来看,胶结拉区破坏数目远

远大于胶结压区破坏数目,无论在拉应力或压应力状态下胶结的破坏形式均由弯破坏形式主导。

为了研究直剪数值试验过程中的裂纹扩展机理,本文主要采用格里菲斯强度理论^[21]来解释岩石内部的裂纹扩展现象,说明岩石的剪切破坏机理。格里菲斯认为在外力作用下,微裂纹的存在改变了材料内部的应力状态,随着外力的逐渐增大,裂纹将沿着与最大拉应力成直角的方向扩展。

图9展示了直剪数值试验剪应变为7%时的试样裂纹扩展情况。图9中位于中央的为试样裂纹的3D显示状态,将其按图中箭头显示方式旋转0°、90°、180°、270°后得到其平面裂纹显示状态,左上与右下分别为其上视图与下视图,图中黑色裂纹为压

区破坏裂纹,红色裂纹为拉区破坏裂纹。从图9中0°与180°视图来看,裂纹沿x-z平面呈对称分布,剪切面两端分布裂纹较少,中间区域分布裂纹较多,形状近似一个扁平的椭圆;从90°与270°视图来看,裂纹沿y-z平面呈对称分布,裂纹在剪切面上呈矩形分布,存在着明显的破碎带,即中间剪切面是压区破碎带,剪切面上下方是拉区破碎带;从上视图与下视图来看,整个剪切面上均存在裂纹,这是二维显示不能达到的效果,也说明直剪数值试验的裂纹扩展在残余强度阶段分布于整个剪切面,且裂纹沿x-y平面呈对称分布。综合来看,试样直剪数值试验的裂纹扩展具有明显的空间对称性,分布形状近似呈椭球状,且对称分布于剪切面。

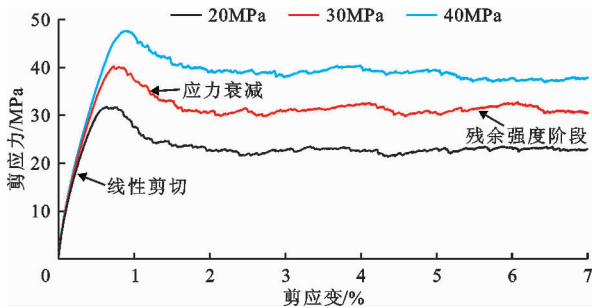


图6 不同法向应力下直剪试验应力-应变曲线

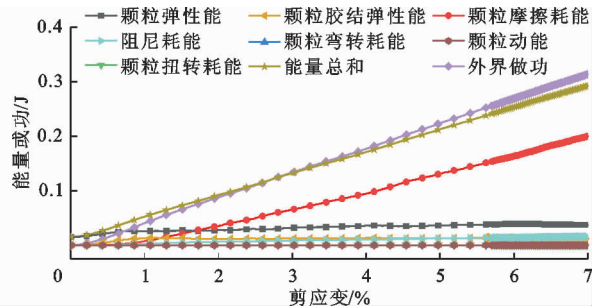


图7 直剪试验全过程中各能量(功)的演化曲线

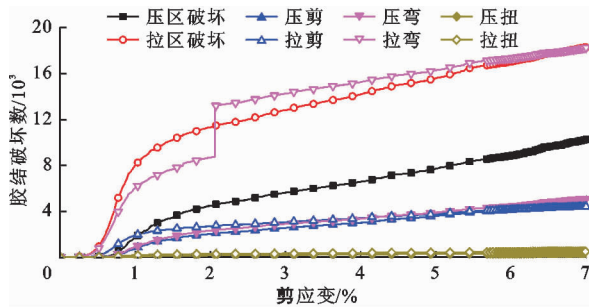


图8 各破坏类型的胶结破坏数与剪应变的关系曲线

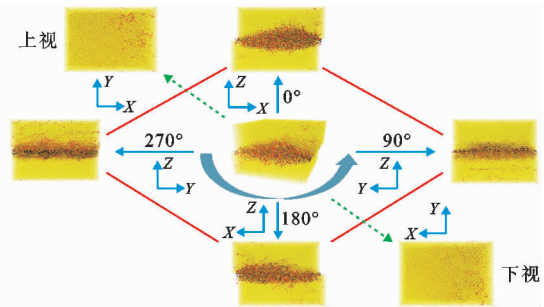


图9 直剪数值试验试样裂纹扩展状态(剪应变为7%)

将本文直剪数值模拟试样裂纹扩展状态与Zhu等^[22]得出的砂岩剪切力学行为试验结果相比较,如图10所示,图10(b)中红色虚线内部为裂纹扩展区域。

由图10可看出,尽管两者加载的法向应力大小不一致,但处于高法向应力下的砂岩剪切破坏特性基本一致,即最终形成一个截面呈扁平的椭圆状分布的裂纹域,这与低法向应力下的砂岩剪切破坏特性明显不同。

为了进一步了解剪切面上裂纹扩展演化情况,对试样剪切面进行不同剪应变阶段的切片观测,结果如表2所示。由表2可知,在线性剪切阶段,裂纹随着剪应变的增加而增加。在剪应变为0.2%时,即准静态加载初期,裂纹还未产生;在剪应变为0.4%时,出现少量裂纹分布于剪切面的一端;在剪应变为0.6%时,裂纹进一步发展,压区裂纹主要分

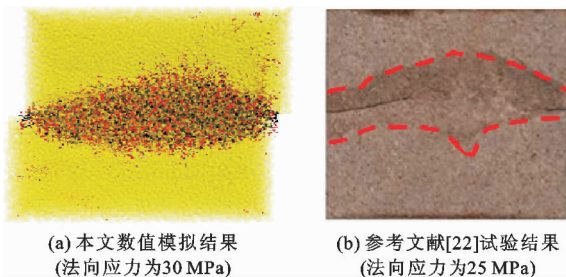
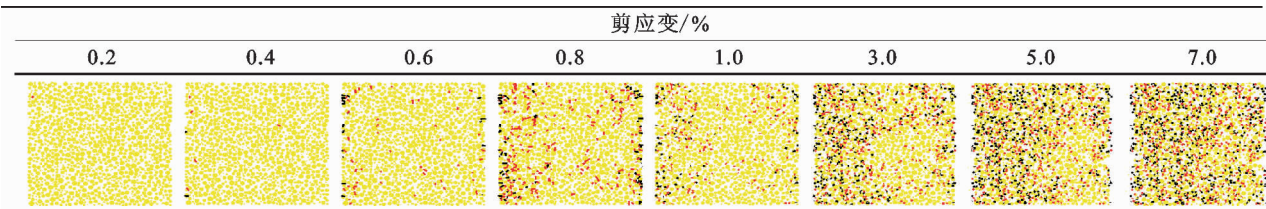


图10 本文直剪数值试验试样裂纹扩展状态与参考文献[22]试验结果比较

布于剪切面两端,而此时拉区裂纹主要分布于剪切面内部;在剪应变为 0.8% 时,裂纹大量产生,分布规律与剪应变为 0.6% 时呈现的分布规律一致,主要是由于在直剪试验的应力状态下,最大拉应力近乎沿剪切面方向。进入应力衰减阶段,裂纹数量而

继续增加。进入残余强度阶段(应变为 3% ~7%),裂纹数量随着剪应变的增加逐渐增加,这与图 9 显示的裂纹扩展规律一致,在整个剪切面上无论是两端还是中间,均分布着大量的压区和拉区的裂纹,布满整个剪切面。

表 2 直剪数值试验试样剪切面裂纹随剪应变扩展演化状况



为了更加细致地研究直剪试验全过程中的裂纹扩展情况,试验输出了剪应变为 0.4%、0.6%、1%、3% 和 7% 时的岩体破碎、裂缝发展、力链及颗粒位移场状态图,如表 3 所示。根据前文直剪试验应力-应变曲线分析结果,剪应变为 0.4%、0.6% 时属于线性剪切阶段,剪应变为 1% 时属于应力衰减阶段,剪应变为 3%、7% 时属于残余强度阶段。由表 3 可见,在剪应变为 0.4% 时,岩体试样部分区域发生破碎,但破碎区域分布比较零星,多分布于试样边界处;在剪应变为 0.6% 时,破碎继续发展,但规模不大;在剪应变为 1% 时,进入应力衰减阶段,此时大规模胶结破坏已经发生,剪切面处的破碎面也已经初步形成;随着剪应变不断增加到达残余强度阶段(7%)时,剪切面呈椭球状的破碎区域基本稳定。

剪应变为 0.4% 时,岩体试样开始出现裂纹,主要分布于试样左下与右上区域,剪切面上出现少许裂纹;在剪应变为 0.6% 时,裂纹继续扩展,试样左下与右上区域的裂纹数量增加并不明显,但是剪切面上的裂纹明显增加,且拉区裂纹占主导地位。在应力衰减阶段,剪应变为 1% 时,剪切面裂纹区域基本形成,可知直剪数值试验中裂纹的扩展机制先是从剪切面周围应力集中区域发生,然后剪切面上由于拉应力的影响也开始产生裂纹,最后剪切面上的裂纹之间相互贯通,形成一片裂纹区域。在残余强度阶段,剪应变为 3% 时,裂纹从剪切面开始沿垂直于最大拉应力方向且平行于大主应力方向发展,即按照格里菲斯强度理论所示方向发展(图 9);在剪应变为 7% 时,裂纹发展基本达到稳定。

表 3 直剪数值试验不同剪应变时岩体试样破碎、裂缝发展、力链与颗粒位移场状态

剪应变/%	岩体破碎	裂缝发展	力链	位移场
0.4				
0.6				
1.0				
3.0				
7.0				

表 3 给出了直剪数值试验全过程的力链和颗粒位移场的发展情况,力链中黑色表示压力链,红色表示拉力链。随着剪应变的增加,压力链由竖直状态逐渐向着小主应力方向发生偏转,而拉力链向着大主应力方向偏转,剪应变越大,偏转现象越明显。颗粒位移场显示的是试样中间沿 $y-z$ 平面的一个薄长方体。颗粒位移场是反映颗粒位移方向以及大小的一个矢量场,是研究裂纹扩展的一个重要手段,本研究不考虑颗粒位移的大小,只考虑颗粒位移方向,即裂纹发展趋势,来揭示直剪数值试验中岩石内部裂纹扩展机理。下面将依据表 3 分析直剪数值试验全过程中试样颗粒位移场的发展情况。在线性剪切阶段,剪应变为 0.4% 时,试样内部发生以剪切方向为主导的偏转,试样上下两端偏转程度较小,而剪切面处的偏转程度较大,偏转中心为剪切面的中心区域;在剪应变为 0.6% 时,试样内部偏转程度加剧,且偏转中心发生倾斜,倾向于大主应力方向。在应

图 9 已经展示了残余阶段剪应变为 7% 的裂纹扩展情况,下面将依据表 3 分析直剪数值试验全过程中试样的空间裂纹扩展情况。在线性剪切阶段,

力衰减阶段,剪应变为1%时,大规模胶结破坏已产生,剪切面处的破碎带已经基本形成,位移场中与之对应的是弧形滑动面的基本形成。在残余强度阶段,剪应变为3%时,贯通的滑动面的形状十分稳定,但在剪应变达到7%时,贯通的滑动面的宽度变大,滑动面开始从剪切面分别向上、下发展,这与岩体破碎、裂纹扩展所表现的趋势一致,说明利用颗粒位移场来研究试样内部位移场也不失为一种良好的手段。

图11给出了本文直剪数值试验及参考文献[22]中砂岩剪切试验所得出的峰值剪应力与法向应力的关系曲线。由图11可知,峰值剪应力随着法向应力的增加而近似呈线性增加,采用莫尔库伦强度准则对其拟合,发现拟合效果较好。与参考文献[22]中砂岩的试验结果拟合曲线相比,两条强度包线近似平行,本文砂岩内摩擦角拟合结果小4.82%,黏聚力大28.87%。由此可知,本文砂岩直剪数值模拟结果与试验结果在定性上基本一致,在定量上有较小差值。

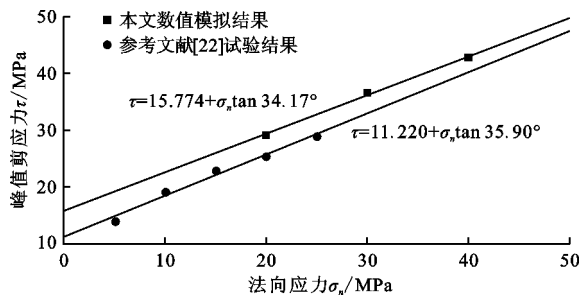


图11 直剪数值试验峰值剪应力-法向应力变化曲线

基于上文的研究可以得出,高应力下砂岩的剪切力学行为表现出应力软化的特质,与室内试验结果^[21]一致性较好。而不同应力下的裂纹扩展存在区别,高法向应力下,砂岩在剪切荷载作用下,会形成一个截面呈扁平椭圆状分布的裂纹域,而低法向应力下,会形成沿剪切面的宽度较小的裂纹域^[21],使得深部岩体的剪切破坏机制明显区别于浅层岩体。

对于砂岩三维直剪数值试验的裂纹显示问题,本文还存在不足,未能更加清晰地给出直剪过程中岩石试样内部中裂纹在空间的具体扩展模式,将在以后进一步研究。

4 结论

本文通过离散单元法,采用基于本团队的半经验半理论胶结接触模型,模拟了砂岩的直接剪切试验全过程,对数值试验结果进行了详细的宏、微观分

析。主要结论如下:

(1)砂岩的直剪数值试验全过程可分为3个阶段:线性剪切阶段、应力衰减阶段和残余强度阶段。

(2)砂岩的直剪数值试验过程中,外界做功主要转化为颗粒摩擦耗能,离散元模拟过程中始终存在着能量守恒;胶结破坏数目会随着剪应变的增加而增加,胶结拉区破坏数目大于胶结压区破坏数目;在拉或者压应力状态下胶结的破坏形式均由弯破坏形式主导。

(3)砂岩直剪数值试验得出的岩体裂纹扩展机制是:裂纹首先从剪切面两端产生,拉区裂纹产生于剪切面中间,向剪切面两端以及上、下侧扩展,压区裂纹从剪切面两端向中间扩展,最后拉区裂纹与压区裂纹相互贯通布满整个剪切面,在空间上最终形成一个截面呈椭球状的分布域。

(4)砂岩直剪数值试验的裂纹扩展结果、峰值剪应力结果与砂岩剪切试验结果一致性较好。

参考文献:

- [1] 蔡美峰,何满潮,刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] ROWE P W. The relation between the shear strength of sands in triaxial compression, plane strain and direct[J]. Geotechnique, 1969, 19(1): 75-86.
- [3] JEWELL R A, WROTH C P. Direct shear tests on reinforced sand[J]. Geotechnique, 1987, 37(1): 53-68.
- [4] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] JIANG Mingjing, SUN Chao, RODRIGUEZ-DONO A, et al. Influence of time-dependence on failure of echelon rock joints through a novel DEM model[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2015, 19(S1): 108-118.
- [8] JIANG Mingjing, LIU Jun, SUN Chao, et al. DEM analyses of shear behaviour of rock joints by a novel bond contact model[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Bristol: IOP Publishing, 2015.
- [9] 蒋明镜,孙亚,陈贺,等. 非贯通非共面节理岩体直剪试验 DEM 数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 3667-3675.

- [10] SHANG Junlong, ZHAO Zhiye, MA Shuqi. On the shear failure of incipient rock discontinuities under CNL and CNS boundary conditions: Insights from DEM modelling [J]. *Engineering Geology*, 2018, 234:153 – 166.
- [11] JIANG Mingjing, LIU Jun, SHEN Zhifu, et al. Exploring the critical state properties and major principal stress rotation of sand in direct shear test using the distinct element method[J]. *Granular Matter*, 2018, 20(2):25.
- [12] 李磊, 蒋明镜, 张伏光. 深部岩石考虑残余强度时三轴试验离散元定量模拟及参数分析[J]. *岩土力学*, 2018, 39(3):1082 – 1090 + 1099.
- [13] SHEN Zhifu, JIANG Mingjing, RICHARD W. Numerical study of inter-particle bond failure by 3D discrete element method[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2016, 40(4):523 – 545.
- [14] JIANG Mingjing, SHEN Zhifu, WANG Jianfeng. A novel three-dimensional contact model for granulates incorporating rolling and twisting resistances [J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, 65:147 – 163.
- [15] RUTTER E H, GLOVER C T. The deformation of porous sandstones; are Byerlee friction and the critical state line equivalent? [J]. *Journal of Structural Geology*, 2012, 44:129 – 140.
- [16] BERA B, MITRA S K, VICK D. Understanding the micro structure of Berea sandstone by the simultaneous use of micro-computed tomography (micro-CT) and focused ion beam – scanning electron microscopy (FIB – SEM) [J]. *Micron*, 2011, 42(5):412 – 418.
- [17] JIANG Mingjing, KONRAD J M, LEROUEIL S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies [J]. *Computers and geotechnics*, 2003, 30(7):579 – 597.
- [18] 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.
- [19] 申志福. 深海能源土力学特性三维多尺度数值模拟[D]. 上海:同济大学, 2015.
- [20] 李磊. 高应力下深部岩石宏微观力学特性离散元模拟及强度准则研究[D]. 上海:同济大学, 2019.
- [21] GRIFFITH A A. The theory of rupture[C]//In *First Int. Cong. Appl. Mech*, 1924.
- [22] ZHU Tantan, HUANG Da. Experimental investigation of the shear mechanical behavior of sandstone under unloading normal stress[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 114:186 – 194.

