

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.033



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于光弹法的颗粒材料直剪试验剪切滑移区研究

胡文韬¹, 肖劲¹, 尹江灏¹, 耿大新¹, 徐长节¹, 李顺文¹, 吴文兵²

(1. 华东交通大学 江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室; 江西省地下空间技术开发工程研究中心, 南昌 330013; 2. 中国地质大学 工程学院; 岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 武汉 430074)

摘要: 颗粒直剪试验剪切带的发展规律和分布特征决定了颗粒体强度, 但不易观测。采用自制的试验装置对透明聚碳酸酯颗粒进行直剪试验, 基于光弹法原理, 通过对颗粒剪切力学特性、应力链分布、位移场的观测, 研究颗粒的力链发展过程、主接触角及剪切滑移面的发展规律, 并在 PFC^{2D} 离散元软件中进行模拟分析。结果表明: 直剪过程中颗粒体系的力链分布存在应力屏蔽现象; 颗粒体系的强力链、接触角及主应力方向发生了偏转, 且偏转特征基本一致; 颗粒在剪切过程中形成拱形剪切滑移面, 与水平剪切面共同形成拱形滑移剪切区。拱形滑移区在剪切初期形成, 且在整个剪切过程中一直持续。在剪切应力峰值时, 拱形滑移区的高度与初始法向力成正比, 厚度在(13~15) d_{50} 之间。拱形滑移区在应力残余阶段逐渐减小, 趋于稳定状态, 且不同初始法向力下的拱形滑移区在应力残余阶段的高度相差不大, 厚度在(8~9) d_{50} 之间。

关键词: 颗粒物质; 光弹法; 直剪试验; 剪胀(缩); 拱形剪切带

中图分类号: TU411.7 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2025)03-0012-09

Study of shear slip zone in direct shear test of granular materials based on photoelastic method

HU Wentao¹, XIAO Jin¹, YIN Jianghao¹, GENG Dixin¹, XU Changjie¹,
LI Shunwen¹, WU Wenbing²

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering Infrastructure Security and Control; Engineering Research & Development Centre for Underground Technology of Jiangxi Province, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China; 2. Faculty of Engineering; Engineering Research Center of Rock-Soil Drilling & Excavation and Protection of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, P. R. China)

Abstract: The development pattern and distribution characteristics of the shear zone of the particle direct shear test determine the strength of the particle body, but it is not easy to observe. The direct shear test of transparent polycarbonate particles was carried out using a homemade test device. Based on the principle of photoelastic method, the development process of force chain, the development pattern of main contact angle and shear slip surface of particles were studied by observing the shear mechanical properties, stress chain distribution and displacement field of particles, and the simulation analysis was carried out in PFC^{2D}. The tests show that: the stress shielding phenomenon exists in the force chain distribution of the particle system during the direct shear

收稿日期: 2022-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(51968023, 51768021, U1934208, 51878276, 51725802)

作者简介: 胡文韬(1986-), 男, 副教授, 从事地基动力分析研究, E-mail: walter@ecjtu.edu.cn。

Received: 2022-11-23

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 51968023, 51768021, U1934208, 51878276, 51725802)

Author brief: HU Wentao (1986-), associate professor, main research interest: foundation vibration analysis, E-mail: walter@ecjtu.edu.cn.

process; the strong force chain, contact angle and main stress direction of the particle system are deflected, and the deflection characteristics are basically the same; the particles form an arch-shaped shear slip surface during the shear process, and form an arch-shaped slip shear zone together with the horizontal shear surface. The arch slip zone forms at the beginning of shear and continues throughout the shear process. At peak shear stress, the height of the arch-slip zone is proportional to the initial normal force and is between (13-15) d_{50} thick. The arch slip zone gradually decreases during the residual stress phase, and the arch slip zone gradually tends to a steady state, and the height of the arch slip zone under different initial normal forces does not differ significantly during the residual stress phase, while thickness varies between (8-9) d_{50} .

Keywords: particulate matter; photoelastic method; straight shear test; shear expansion (contraction); arch shear zone

离散颗粒的聚集体具有不连续性、各向异性等特殊性质,直剪试验是常用的研究颗粒剪切力学性能的试验方法。一般认为,直剪试验中颗粒的破坏面沿上下两个剪切盒的分界面发生,然而,到目前为止,尚未有研究对颗粒中这一剪切面的存在提出有效证明。传统直剪试验只能测得土体的宏观力学指标,如颗粒抗剪强度、剪胀性,而难以分析颗粒在直剪作用下的细观力学表观特征,如应力场分布和剪切面分布。为此,从微观角度观察直剪过程中颗粒的特性,进而获得直剪试验中颗粒集合体的破坏特征具有重要意义。

为解决这一问题,有学者基于颗粒力学范畴对颗粒体在剪切作用下的细观力学特征进行研究^[1-3]。其中,Meng等^[4]采用离散元方法研究颗粒在直剪作用下的力链方向和特性,认为颗粒摩擦系统的剪切剪胀过程可分为塑性膨胀、整体稳定和塑性压缩3个阶段。而针对岩土这一特定离散颗粒体,秦建敏等^[5]通过孔隙胞元的受力和离散元数值分析发现,致密排列颗粒材料的剪胀性与内部的力链传递方式有关。蒋明镜等^[6]采用PFC离散元软件分析在直剪试验中砂土试样内部的应力偏转和剪切带的微观机制。史旦达等^[7]探讨了颗粒的位移与旋转特征及其剪切带的演化,揭示了细观结构各向异性的演化规律及其与宏观剪切强度之间的宏、细观关联。贾学明等^[8]通过离散元模拟发现,在不同围压下,岩土石混合料颗粒体系表现出不同的剪胀性,并且剪切面不是一个平面。杨升等^[9]采用PFC离散元软件研究剪切带、速度场和力链网络,分析砂土在直剪试验中的宏、细观力学性质。胡峰等^[10]通过在大型直剪试验机上盒试样顶部打孔、灌入干灰、插入柔软铝丝的方法,监测土石混合体剪切带附近颗粒的滑移特征、剪切带厚度等参数,认为块石以剪胀作用为主,块石间发生挤压、棱角剪断与错动重分布现象。房营光^[11]用土矿物颗粒进行直剪试验,从微观和细观的角度解释了颗粒尺度的物理机制,认为

颗粒介质的变形和强度特性与粗细颗粒的比例、粒径变化和粗颗粒体积百分比有关。从以上分析可见,大部分研究是基于离散元模拟来直观地展现颗粒集合体的剪切性能,但数值模拟对真实环境的还原度不能确定。而大型直剪试验观测研究尽管数据真实可靠,但缺失了颗粒间作用力、力链等关键数据,尤其对颗粒在垂直于上下盒分界面方向上的运动观测支撑不足。

为实现对颗粒体位移场以及颗粒间接触力分布规律的全局观测,光弹试验是一种很好的研究颗粒细观特征的试验方法,能够简单直观地展示颗粒间应力场的分布和传递规律。基于这一试验手段,Zhang等^[12]针对不同粒径圆柱体颗粒组合重现了在剪切荷载作用下力链分布规律的演变,发现力链与切应变存在正向相关性。Daniels等^[13]用光弹法对颗粒进行剪切分析时发现,力链进行了排列重组,认为力链的近似共线排列承载了大部分载荷。Lashkari等^[14]采用直剪仪在定容条件下对3种不同状态下的颗粒进行直剪试验发现,颗粒土在不同状态下的应力比和剪切强度有不同的变化规律,该规律受平均颗粒形态特征的影响。为定量描述颗粒间的接触力数值,杨荣伟等^[15]在光弹试验中采用彩色梯度算法分析了直剪作用下颗粒的平均强度力链,认为直剪作用引起颗粒的各向异性,力链在极化角度区间内大量分布。陈琼等^[16]对玻璃-橡胶混合颗粒进行直剪试验发现,颗粒体系在宏观上发生了剪胀-剪缩两种现象的相互转变。从以上研究可见,采用光弹法能有效实现颗粒体在直剪加载过程中的力链、位移场量分析,能准确地观测在直剪加载条件下颗粒体剪切带的发展规律。

基于光弹法原理,笔者采用自制的试验装置对不同粒径配比的透明聚碳酸酯颗粒进行直剪试验,通过对颗粒剪切力学特性、应力链分布、位移场的观测,研究颗粒体剪胀(剪缩)特性、主接触角分布

规律和剪切带发展规律,并在PFC^{2D}离散元软件中进行模拟验证。

1 试验方案设计

1.1 试验装置简介

试验使用自制光弹直剪仪^[17],图1为光弹直剪试验装置图,试验装置主要包括光源、圆偏振光系统、模型加载系统以及图像采集系统4部分,如图1(a)所示。模型加载体系由外框尺寸为0.3 m×0.3 m×0.05 m(长×高×宽)、内框为由普通玻璃间隙6 mm叠合而成的颗粒直剪试验盒,该间隙用以放置5 mm厚的颗粒,颗粒只在立面上摆放1层。光弹直剪试验加载模型如图1(b)所示。

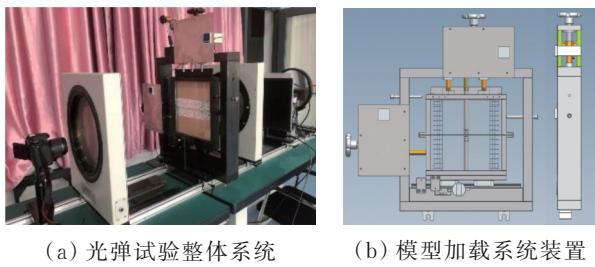


图1 光弹直剪试验模型

Fig. 1 Direct shear model for photoelastic test

模型加载系统能实现垂直加载、水平加载和单个颗粒的标定;将颗粒直剪试验盒移除,只保留垂直加载系统和标定加载杆,能够进行对单个颗粒的标定试验。移除标定加载杆,安装颗粒直剪试验盒,通过垂直加载和水平加载能模拟直剪试验。

加载系统通过旋钮使加载杆运动,加载杆与旋钮装置之间加装应力计,应力计连接到端口电路

$$|\nabla R_{i,j}|^2 = \left[\left(\frac{I_{i-1,j} - I_{i+1,j}}{2} \right)^2 + \left(\frac{I_{i,j-1} - I_{i,j+1}}{2} \right)^2 + \left(\frac{I_{i-1,j+1} - I_{i+1,j-1}}{2\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{I_{i-1,j-1} - I_{i+1,j+1}}{2\sqrt{2}} \right)^2 \right] / 4 \quad (1)$$

再通过式(2)计算出每个像素点(i,j)的彩色梯度均方值。

$$|\nabla I_{i,j}|^2 = |\nabla R_{i,j}|^2 + |\nabla G_{i,j}|^2 + |\nabla B_{i,j}|^2 \quad (2)$$

统计每个颗粒内的像素点,再通过式(3)计算得到每个颗粒的平均彩色梯度 $\langle G^2 \rangle$ 。

$$\langle G^2 \rangle = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |\nabla I_{i,j}|^2 \quad (3)$$

式中:N为颗粒体系的像素点个数。

1.4 直剪试验方案设计

做4组不同初始法向力的剪切试验,初始法向力分别为100、200、300、400 N;试验盒分上下两半部分,上半盒固定不动,上端施加法向荷载,以此改变不同围压;下半盒左侧横向施加剪切力,使得试

中,通过数值面板对加载过程中加载力的数值进行实时读显。

1.2 颗粒材料

试验采用的颗粒材料为Lexan*9030聚碳酸酯,形状为圆柱体,厚度均为5 mm,直径为两种不同的尺寸混合填充,分别为1 832颗直径6 mm的颗粒和558颗直径8 mm的颗粒,颗粒总数2 390颗。颗粒体系用两种粒径混合填充,以避免颗粒的规律性分布对力链发展有影响。此外,聚碳酸酯圆盘颗粒在加工过程中会有残余应力,在试验前需消除,试验的颗粒浸泡在植物油和甘油中,以30 °C/h的幅度升温至165 °C,并恒温7~8 h,再以15 °C/h的幅度降温至室温,最终消除残余应力。Lexan*9030聚碳酸酯材料参数见表1。

表1 颗粒参数^[18]

Table 1 Particle parameters^[18]

| 密度/(g/cm ³) | 泊松比 | 弹性模量/Pa | 滑动摩擦系数 | 滚动摩擦系数 |
|-------------------------|------|-------------------|--------|--------|
| 1.2 | 0.36 | 2.4×10^9 | 0.5 | 0.02 |

1.3 平均彩色梯度 $\langle G^2 \rangle$ 法

光弹颗粒在受到挤压时会发生色彩变化,杨荣伟等^[15]采用平均彩色梯度 $\langle G^2 \rangle$ 法建立了颗粒产生的光强信息与接触力的关系。试验采用平均彩色梯度 $\langle G^2 \rangle$ 法定性分析颗粒与颗粒之间的接触力。平均彩色梯度 $\langle G^2 \rangle$ 法基于灰色梯度均方值法,RGB彩色图像像素点的光强信息 $I_{i,j}$ 由 $R_{i,j}$ 、 $G_{i,j}$ 和 $B_{i,j}$ 三个分量组成,每个分量的灰色梯度均方值由式(1)计算得到。

$$|\nabla R_{i,j}|^2 = \left[\left(\frac{I_{i-1,j} - I_{i+1,j}}{2} \right)^2 + \left(\frac{I_{i,j-1} - I_{i,j+1}}{2} \right)^2 + \left(\frac{I_{i-1,j+1} - I_{i+1,j-1}}{2\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{I_{i-1,j-1} - I_{i+1,j+1}}{2\sqrt{2}} \right)^2 \right] / 4 \quad (1)$$

验装置上下部分产生相对错动。

试验采用控制切向位移s的方式逐级加载切向力,分级位移为0.3 mm左右;由于光弹颗粒粒径较大,剪切过程中切向力的变化波动较大,为了试验数据的完整,通过反复试验,确定以水平剪切位移达到30 mm为终止条件。每次分级加载后拍摄颗粒图像,从试验得到的图像可以观察到切向力的变化和直剪试验内部颗粒体的力链发展过程。

2 试验结果讨论

2.1 直剪试验的宏观特征

在不同初始法向力作用下,逐步增加切向位移,颗粒受到的剪切力和竖向位移发生变化,图2是剪切应力和剪切位移的关系曲线。

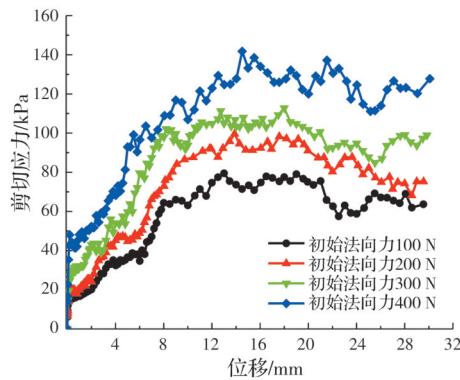


图2 剪切应力与剪切位移的关系曲线

Fig. 2 Curves of shear stress and shear displacement

从图2中可以看到,剪切应力先增大到达峰值,之后逐渐趋于稳定不变,最后略有下降。在剪切过程中,剪切应力有上下小幅度波动,原因是颗粒较大,剪切时颗粒与颗粒之间咬合、攀爬再跌落的循环过程使得剪切应力有所波动。初始法向力越大,颗粒的抗剪强度越大。

图3是剪切盒上部竖向位移与剪切位移的关系曲线。竖向位移为正表示颗粒体系剪胀,为负则表示剪缩。试验颗粒体系在剪切初期的极小范围内出现剪缩现象,A点为剪缩峰值,初始法向力越大,剪缩现象越不明显。出现剪缩现象是由于剪切初期颗粒相互挤密,颗粒排列位置发生重分布。随着剪切位移的增大,颗粒开始剪胀,B点对应剪切力达到峰值状态。颗粒剪切应力达到峰值之后,剪胀速率减缓,趋于稳定,C点对应剪切残余阶段。

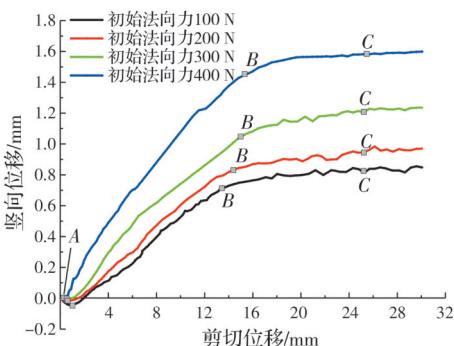


图3 竖向位移与剪切位移的关系曲线

Fig. 3 Curves of vertical displacement and shear displacement

以法向力为横坐标,剪切应力峰值为纵坐标,线性拟合出抗剪强度线,如图4所示,根据拟合出的函数可得,颗粒的内摩擦角 $\varphi=20.05^\circ$ 。颗粒具有假性黏聚力 $c=60.5\text{ kPa}$,可能是颗粒直剪的上下盒之间有摩擦导致的。

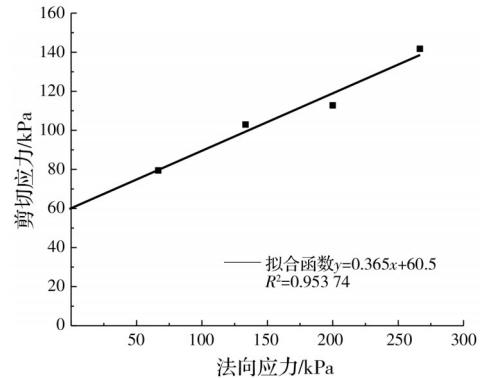


图4 抗剪强度拟合线

Fig. 4 Fitting curve of shear strength

2.2 颗粒力链分析

在密集分布的颗粒体系中,颗粒与颗粒之间相互挤压,形成可以传递法向接触力的力链。光弹试验能直观地观察到颗粒体系在剪切过程中的力链分布特征。不同初始法向力下的力链分布特征相同,图5是初始法向力300 N下颗粒体系中部区域从开始剪切到剪切破坏过程中经历的3种状态(状态A、B、C)的力链图。剪切开始阶段(状态A),在竖向法向外力作用下,颗粒体系链方向主要为竖直方向;强化至峰值阶段(状态B、C),力链数增多,并形成多条倾斜方向的力链。力链的变化是颗粒体系在抵抗剪切变形,在剪切过程中颗粒体系法向接触力会发生倾斜。

力链分为承受较大外力的强力链和承受较小外力的弱力链,强力链较为稳定,是颗粒体系传递外力的主要形式,因此,试验对强力链进行分析。通过式(1)~式(3)可计算出每个颗粒的 $\langle G^2 \rangle$ 值,采用整个颗粒体系的 $\langle G^2 \rangle$ 平均值作为强力链的阈值,单个颗粒的 $\langle G^2 \rangle$ 值大于颗粒体系的 $\langle G^2 \rangle$ 平均值则为强力链体系。通过Matlab软件识别颗粒间的接触,并用蓝色直线标识颗粒间圆心的连



图5 剪切发展过程中的颗粒力链图

Fig. 5 Particle force chain diagrams during shear development

线,红色线段标识强力链颗粒圆心的连线,如图 6 所示。统计出强力链的接触角,并绘制强力链玫瑰云图,如图 7 所示。图 7 中长度最长的方向是颗粒体系中接触最多的方向,为主接触角方向。玫瑰云图表现出颗粒体系是各向异性的,接触角开始在 90°~

110°分布最多,随着剪切的进行,90°~110°方向的接触角分布逐渐减小,而 30°~60°方向的接触角分布逐渐增多。达到剪切峰值时,主接触角大致在 30°~60°方向,变化与力链一致,说明剪切力作用下强力链发生偏转的角度大致在 30°~60°方向。

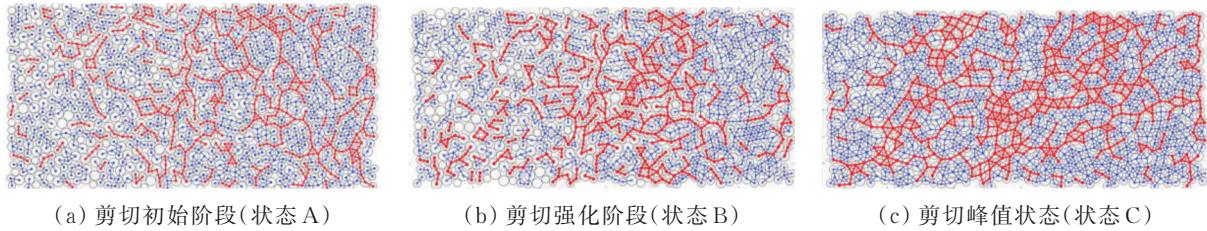


图 6 剪切发展过程中的强力链图

Fig. 6 Strong chain diagrams during shear development

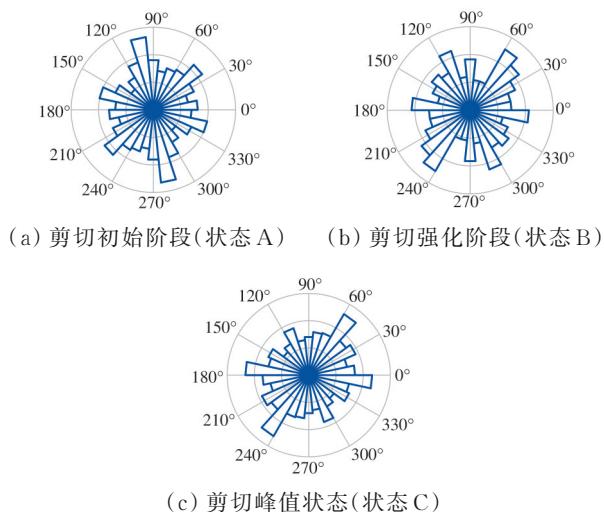


图 7 剪切发展过程中的接触角玫瑰云图

Fig. 7 Contact angle rose cloud map during shear development

2.3 位移场分析

颗粒的剪胀性广义上是指剪切引起的体积变化,实质上是由于剪应力引起土颗粒间相互位置的变化使颗粒间的孔隙发生变化,从而发生体积变化。位移场数据图像的获取是在同一坐标系下选取部分颗粒作为测点进行位移前后的标定,采用 Matlab 软件的 `indindcircles` 命令读取测点位移前后的位置,再采用 `sortrows` 命令将测点位移前与位移后一一对应,得到测点的前后位置坐标,图 8 是颗粒体系选取的测点位置图。

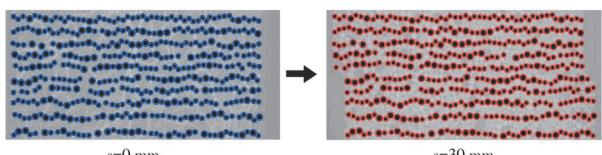


图 8 颗粒位移测点布置图

Fig. 8 Layout of particle displacement measuring points

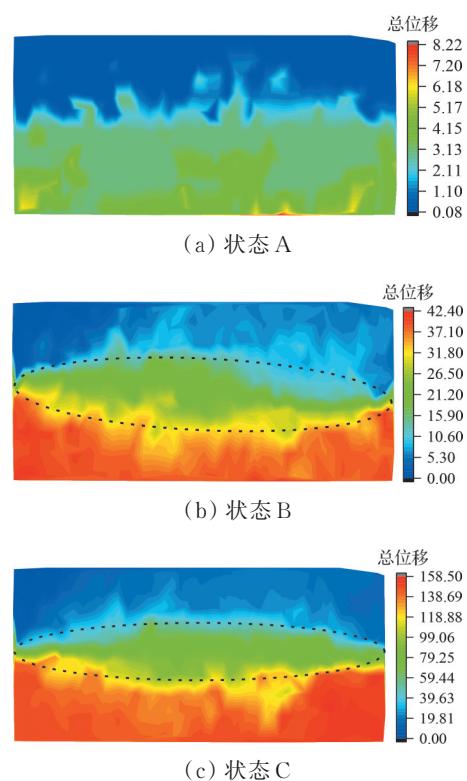


图 9 颗粒位移云图

Fig. 9 Particle displacement vector diagrams

颗粒体系发生不均匀位移,在剪切盒左右位移和颗粒体系的上下错动下,颗粒会形成一个倾斜的滑移面,这个滑移面呈拱形,因此,称为拱形剪切滑移面,这种成拱现象是紧密颗粒体剪胀效应的体现^[20]。

3 数值模拟

通过光弹试验观察到颗粒体系在直剪过程中形成了拱形滑移区,为了更加准确地分析滑移区的特征,采用PFC^{2D}软件进行模拟分析。为了更好地模拟光弹试验,PFC^{2D}的建模是通过光弹试验图像获取颗粒的位置坐标和半径以及墙体端点的坐标,将数据导入到PFC^{2D}中,保证颗粒尺寸与位置与光弹试验相同。

以光弹直剪试验结果为参考,基于表1中的已知参数,对数值模拟中所需细观参数进行标定。经过多次调试,最终确定的数值模拟中颗粒微观参数见表2。图10给出了数值模拟得到的不同初始法向

力下剪切应力与剪切位移曲线,从图10可以看出,由于颗粒较大,模拟结果的剪切应力变化也是波动的,整体与光弹试验较为吻合。

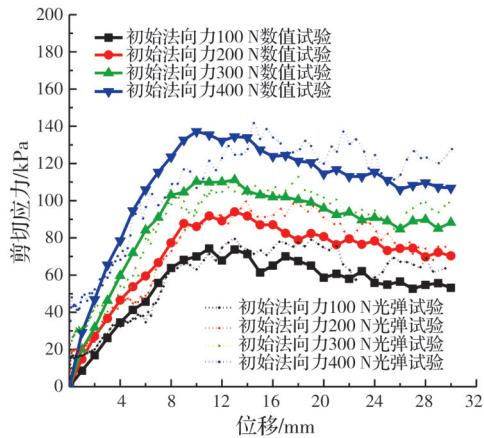


图10 不同初始法向力下的试验曲线对比

Fig.10 Comparison of test curves under different initial normal forces

表2 模型参数

Table 2 Model parameters

| 密度/(g/cm ³) | 摩擦系数 | 法向刚度/(N/m) | 切向刚度/(N/m) | 临界法向阻尼比/(N/m) |
|-------------------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1 200 | 0.3 | 1.0×10^8 | 1.0×10^8 | 0.2 |
| 平行黏结力/(N/m) | 平行黏结半径扩大系数 | 平行黏结法向刚度/(N/m) | 平行黏结切向刚度/(N/m) | 平行抗拉强度/(N/m) |
| 1.0×10^6 | 0.8 | 1.0×10^8 | 1.0×10^8 | 1.0×10^6 |

3.1 应力分布

对颗粒剪切应力峰值时的法向接触力链和主应力进行分析,图11为初始法向应力300 N的颗粒力链分布图,剪切开始时力链呈“环状力链”,分布杂乱,随着剪切的进行,剪切盒左上角和右下角的力链变淡,颗粒体系的强力链变化为由左下至右上的倾斜力链。越靠近剪切面的力链倾斜程度越大,剪切盒上下边缘处的力链倾斜不明显。

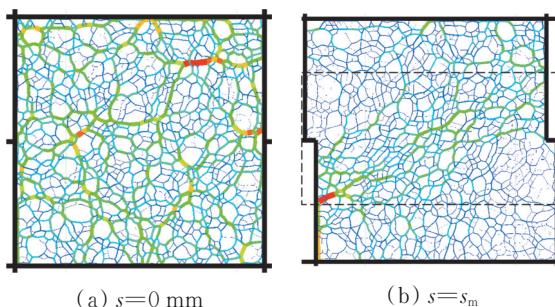


图11 法向接触力链分布图

Fig.11 Normal contact force chain distribution diagrams

图12是使用应力圆方法测得的颗粒主应力分布图,十字架的指向为两个主应力的方向。在剪切初期,颗粒体系主应力分布在整个直剪盒区域,说明颗粒体系内部整体受荷,而颗粒体系达到切峰值

时的主应力分布不均匀,主应力方向呈现左下右上的倾斜方向,主应力较大值集中在该倾斜区域内,说明剪切过程中该倾斜区域是颗粒体系承载外荷载的主要有效部分。主应力偏转方向与力链方向基本相同,颗粒在剪切过程中发生了主应力偏转,偏转方向大致也是30°~60°方向,与光弹试验的结果类似,强力链方向、主接触角方向和主应力方向三者之间的变化一致。

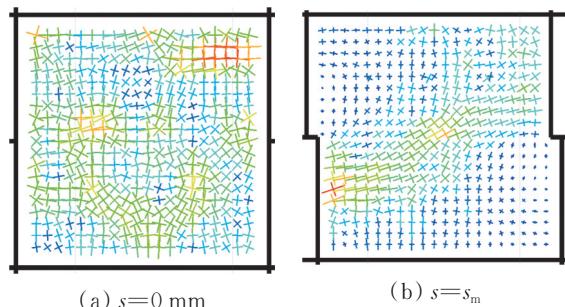


图12 主应力分布图

Fig.12 Diagrams of principal stress distribution

3.2 位移场分析

PFC2D自带监测颗粒的位移量,通过ball displacement可以观察颗粒的位移云图。图13是颗粒到达剪切应力峰值时的位移图,图14是颗粒到达

应力残余阶段时的位移图。通过对对比分析发现,在不同初始法向力作用下,颗粒都会形成拱形滑移区,且上下盒的拱形相同,拱形滑移区的起点和终点为剪切盒边缘,形态类似二次抛物线。初始法向力作用增大,剪切应力峰值时的拱角略有减小。应力残余阶段时的拱角明显小于剪切应力峰值时的拱角,且在不同初始法向力下的拱角相差不大,说明拱形滑移区的形态会随着剪切位移的变化而变化,最后趋于稳定。

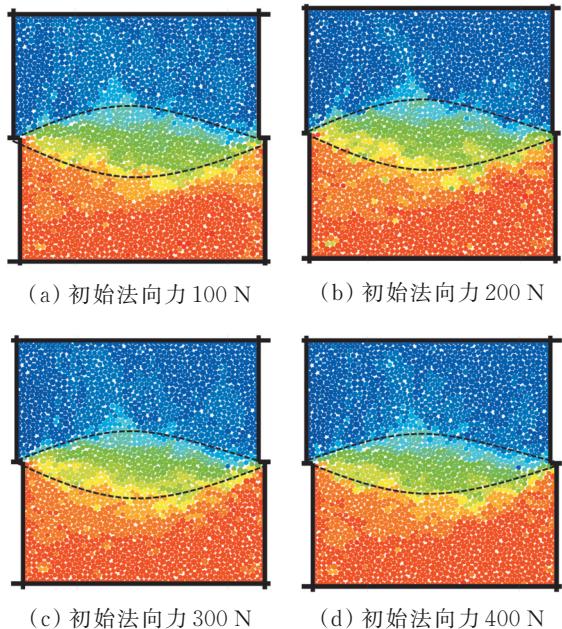


图 13 剪切应力峰值时的拱形滑移区特征

Fig. 13 Characteristics of arched slip zone at peak shear stress

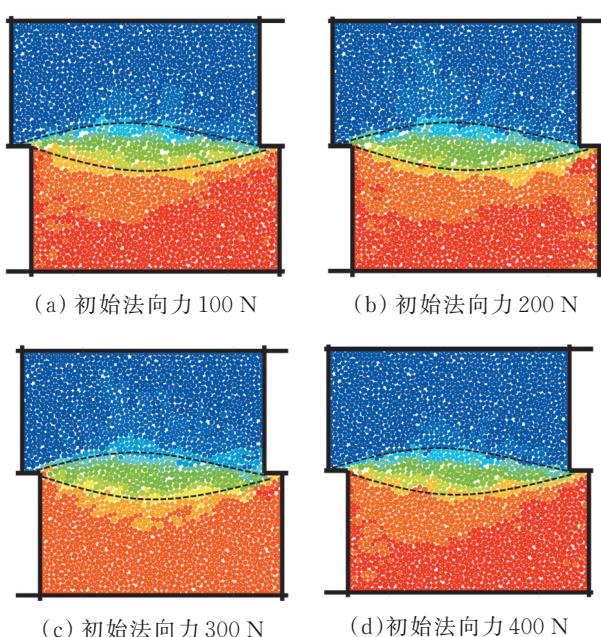


图 14 应力残余阶段时的拱形滑移区特征

Fig. 14 Characteristics of arch slip zone during stress residual stage

影响剪切带厚度的因素有很多,潘远阳等^[21]认为,在颗粒摩擦系数恒定时,剪切带的厚度与平均颗粒半径 d_{50} 有关。因此,测量上下拱形最高点的最大厚度,最大厚度与平均粒径 d_{50} 的比值为厚度比。图 15 为厚度比随剪切位移的变化曲线,分析可知,在剪切应力峰值时,拱形滑移区的高度与初始法向力成正比,厚度在 $(13 \sim 15)d_{50}$ 之间。随着剪切的进行,其厚度逐渐减小,拱形滑移区逐渐趋于稳定状态,厚度在 $(8 \sim 9)d_{50}$ 之间。拱形滑移区特征的影响因素较多,比如土体剪胀特性、颗粒形状、试样的高长比等^[20],故试验的结论适用于粒径较大且单一的粗颗粒,对于真实砂土的剪切带特征有待进一步探究。

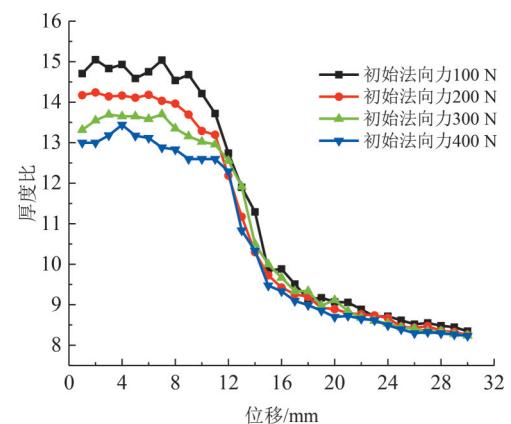


图 15 厚度比随剪切位移的变化曲线

Fig. 15 Variation curves of thickness ratio with shear displacement

4 结论

通过光弹直剪试验和 PFC^{2D} 模拟分析,研究了大颗粒力链在直剪过程中的规律和剪切滑移区的发展规律,得到以下主要结论:

1) 光弹试验剪切过程中颗粒体系的力链分布由原本的“环状力链”发展为倾斜的“柱状力链”,倾斜方向在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间。力链、主接触角和主应力的发展规律相似,都是由原本的各向同性逐渐发展为倾斜的各向异性。

2) 直剪过程中大颗粒体系在剪切位移方向上有滑移,在其上方和下方出现一个拱形滑移区,共同形成剪切滑移区。拱形滑移区在剪切初期形成,且整个剪切过程一直持续。在剪切应力峰值时,拱形滑移区的高度与初始法向力成正比,厚度在 $(13 \sim 15)d_{50}$ 之间。

3) 大颗粒体系在应力残余阶段拱形滑移区逐渐减小,并趋于稳定,且不同初始法向力下的拱形滑移区在应力残余阶段的高度相差不大,厚度在 $(8 \sim 9)d_{50}$ 之间。

参考文献

- [1] SEYYEDAN S M, MIRGHASEMI A A, MOHAMMADI S. Numerical simulation of direct shear test on granular materials composed of breakable angular particles: A DEM-XFEM approach [J]. Powder Technology, 2021, 391: 450-466.
- [2] DANESH A, MIRGHASEMI A A, PALASSI M. Evaluation of particle shape on direct shear mechanical behavior of ballast assembly using discrete element method (DEM) [J]. Transportation Geotechnics, 2020, 23: 100357.
- [3] WANG D, ZHENG H, JI Y, et al. Shear of granular materials composed of ellipses [J]. Granular Matter, 2020, 22(1): 5.
- [4] MENG F J, LIU H B, HUA S Z, et al. Force chain characteristics of dense particles sheared between parallel-plate friction system [J]. Results in Physics, 2021, 25: 104328.
- [5] 秦建敏,迟璐璐.颗粒材料剪胀性的微观力学分析[J].岩土力学,2013,34(5): 1508-1514.
- QIN J M, CHI L L. Micromechanical analysis of dilatancy in granular materials [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1508-1514. (in Chinese)
- [6] 蒋明镜,王富周,朱合华.单粒组密砂剪切带的直剪试验离散元数值分析[J].岩土力学,2010,31(1): 253-257, 298.
- JIANG M J, WANG F Z, ZHU H H. Shear band formation in ideal dense sand in direct shear test by discrete element analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 253-257, 298. (in Chinese)
- [7] 史旦达,周健,刘文白,等.砂土直剪力学性状的非圆颗粒模拟与宏细观机理研究[J].岩土工程学报,2010,32(10): 1557-1565.
- SHI D D, ZHOU J, LIU W B, et al. Exploring macro- and micro-scale responses of sand in direct shear tests by numerical simulations using non-circular particles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (10): 1557-1565. (in Chinese)
- [8] 贾学明,柴贺军,郑颖人.土石混合料大型直剪试验的颗粒离散元细观力学模拟研究[J].岩土力学,2010,31 (9): 2695-2703.
- JIA X M, CHAI H J, ZHENG Y R. Mesomechanics research of large direct shear test on soil and rock aggregate mixture with particle flow code simulation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2695-2703. (in Chinese)
- [9] 杨升,李晓庆.基于PFC^{3D}的砂土直剪模拟及宏细观分析[J].计算力学学报,2019,36(6): 777-783.
- YANG S, LI X Q. Shear simulation and macro meso analysis of sand based on PFC^{3D} [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2019, 36(6): 777-783. (in Chinese)
- Chinese)
- [10] 胡峰,李志清,胡瑞林,等.基于大型直剪试验的土石混合体剪切带变形特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(3): 766-778.
- HU F, LI Z Q, HU R L, et al. Research on the deformation characteristics of shear band of soil-rock mixture based on large scale direct shear test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37 (3): 766-778. (in Chinese)
- [11] 房营光.颗粒介质尺度效应的抗剪试验及物理机理分析[J].物理学报,2014,63(3): 034502.
- FANG Y G. Shear test and physical mechanism analysis on size effect of granular media [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(3): 034502. (in Chinese)
- [12] ZHANG J, MAJMUDAR T, BEHRINGER R. Force chains in a two-dimensional granular pure shear experiment [J]. Chaos, 2008, 18(4): 041107.
- [13] DANIELS K E, HAYMAN N W. Force chains in seismogenic faults visualized with photoelastic granular shear experiments [J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(B11): B11411.
- [14] LASHKARI A, FALSAFIZADEH S R, SHOURI-JEH P T, et al. Instability of loose sand in constant volume direct simple shear tests in relation to particle shape [J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(9): 2507-2527.
- [15] 杨荣伟,程晓辉.光弹颗粒材料的直剪实验研究[J].岩土力学,2009,30(Sup1): 103-109.
- YANG R W, CHENG X H. Direct shear experiments of photoelastic granular materials [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Sup1): 103-109. (in Chinese)
- [16] 陈琼,王青花,赵闯,等.玻璃-橡胶混合颗粒的力学响应研究[J].物理学报,2015,64(15): 154502.
- CHEN Q, WANG Q H, ZHAO C, et al. Mechanical response study of glass-rubber particle mixtures [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(15): 154502. (in Chinese)
- [17] 耿大新,刘鑫磊,胡文韬,等.一种颗粒材料接触应力可视化试验加载设备及其使用方法:CN110208080B[P].2021-08-13.
- GENG D X, LIU X L, HU W T, et al. Particle material contact stress visualization test loading device and using method thereof: CN110208080B [P]. 2021-08-13. (in Chinese)
- [18] 王金安,韩现刚,庞伟东,等.综放开采顶煤与覆岩力链结构及演化光弹试验研究[J].工程科学学报,2017,39(1): 13-22.
- WANG J A, HAN X G, PANG W D, et al. Photoelastic experimental study on the force chain structure and evolution in top coal and overlaying strata under fully mechanized top coal caving mining [J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(1): 13-22. (in Chinese)

- [19] 王晓帅, 王子寒, 景晓昆, 等. 粗粒土大型直剪试验宏观研究与离散元模拟[J]. 深圳大学学报(理工版), 2020, 37(3): 279-286.
WANG X S, WANG Z H, JING X K, et al. A macro-micro study and distinct element simulation on large-scale shear test of coarse-grained soil [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2020, 37(3): 279-286. (in Chinese)
- [20] 王子寒, 张若钰, 景晓昆, 等. 砂土可视化直剪试验与剪切带形成机制研究[J]. 工程力学, 2022, 39(7): 217-226.
WANG Z H, ZHANG R Y, JING X K, et al. A study on forming mechanism of shear bands and visual shearing tests of sand [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(7): 217-226. (in Chinese)
- [21] 潘远阳, 魏玉峰, 李远征, 等. 直剪试验下砂土剪切带形成的微观变形机制[J]. 水利水运工程学报, 2020(3): 82-91.
PAN Y Y, WEI Y F, LI Y Z, et al. Study on microscopic deformation mechanism of sand soil shear zone in direct shear test [J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(3): 82-91. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)