

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.03.007

颗粒形状对断层摩擦强度影响的数值试验研究

任树林, 曾亚武, 赵 凯

(武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为了研究断层破碎带颗粒形状对断层摩擦强度的影响,采用二维颗粒流程序,建立以不同形状颗粒为基本单元的断层破碎带数值试验模型,并采用形状系数对颗粒形状进行定量描述,研究了在不同法向应力和颗粒级配条件下形状系数对摩擦强度的影响。研究表明,异形颗粒间的咬合自锁作用大于圆形颗粒,致使异形颗粒填充的断层破碎带摩擦强度高于圆形颗粒填充的断层破碎带摩擦强度;断层破碎带残余摩擦系数与填充颗粒的形状系数之间有较好的线性关系。

关键词: 颗粒流;断层破碎带;摩擦强度;形状系数;残余摩擦系数

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)03-0042-06

Numerical Experiments on the Effects of Particle Shape on Frictional Strength of Faults

REN Shulin, ZENG Yawu, ZHAO Kai

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: In order to quantify the influences of particle properties of fault fracture zone on the frictional strength of faults, a numerical model of fault fracture zone based on irregular particles was established by using PFC2D. The shape coefficient is used to quantitatively describe the shape of the irregular particles. Effects of shape coefficient on frictional strength under different normal stress and particle size distributions is discussed. The results show that the interlocking effect of irregular particles is larger than that of circular particles, which results in the frictional strength of irregular particle assemblages being higher than that of circular assemblage; And there is a good linear relationship between the residual friction coefficient and the shape coefficient.

Keywords: particle flow; fault fracture zone; frictional strength; shape coefficient; residual friction coefficient

构造运动中,大规模的断层活动往往沿着一个错动带发生,该带称为断层破碎带^[1],见图1。在断层破碎带中,随着浅源地层的断层摩擦滑动,通常会产生和积累断层泥或断层角砾岩等颗粒材料^[2]。研究发现,这些颗粒状材料的结构特征和物理性质对断层的力学行为、稳定性、摩擦性质有着重要影响^[3-4]。其中断层摩擦性质对断层运动发生的地点、方式、剧烈程度起着关键作用,对断层摩擦滑动的研究也为断层带岩石在地震发生前后是否发生滑动提供了参考依据^[5]。由于断层摩擦问题的复杂性,通常对断层摩擦强度这一基本概念的研究是探

究断层摩擦性质的第一步^[1],断层破碎带颗粒性质,如颗粒形状、粒径级配、颗粒表面粗糙度等是影响断层摩擦强度的重要因素,本文的研究主要围绕颗粒形状对摩擦强度的影响而展开。

针对断层破碎带颗粒性质对断层摩擦强度的影响这一问题,国内外学者开展了大量的研究。试验研究方面,Mair等^[6]使用球形玻璃珠和石英砂模拟断层破碎带颗粒材料,研究了颗粒形状、剪切速度、法向应力等对断层摩擦强度的影响,结果表明球形玻璃珠模拟断层破碎带所得的断层摩擦强度明显低于石英砂。Anthony等^[7]研究了颗粒级配、颗粒层厚

收稿日期:2019-01-20

修稿日期:2019-02-20

基金项目:国家自然科学基金项目(41772308)

作者简介:任树林(1995—),男,河南信阳人,硕士研究生,研究方向为岩土颗粒材料数值模拟。E-mail:805309740@qq.com

通信作者:曾亚武(1964—),男,湖北武汉人,博士,教授,博士生导师,主要从事岩石工程及岩石破坏机理、岩石力学等方面的研究及教学工作。E-mail:zengyw@whu.edu.cn

度、剪切速度等对摩擦强度的影响,并对摩擦滑动过程进行分析。何昌荣等^[5]则使用天然断层泥和模拟断层泥进行摩擦滑动实验研究,探究了摩擦强度的速度依赖性问题等。数值研究方面,Morgan等^[8-9]采用离散单元法建立断层剪切模型,探究了颗粒粒径级配和颗粒间摩擦力对断层摩擦特性的影响,并详细分析了断层破碎带中局部剪切带的形成和发展过程;Guo等^[2,10-11]使用离散单元法探究了法向应力、颗粒形状等因素对摩擦强度的影响,发现法向应力和残余摩擦系数之间存在幂律关系,但针对颗粒形状的描述以及颗粒形状对摩擦强度的影响结果都是定性的,缺少定量的研究;此外异形颗粒的生成方法也需要改进。

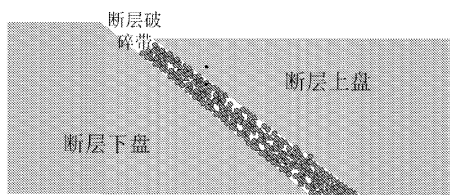


图1 断层要素简图

现有模拟断层破碎带的离散元方法大多采用圆形颗粒进行建模,而真实颗粒间的摩擦主要由宏观机械咬合和接触摩擦两部分组成^[12],圆形颗粒的机械咬合力显然较低。尽管已有的数值研究在一定程度上揭示了颗粒形状对断层破碎带摩擦强度的影响,但仍有很多方面需要进一步的研究,如数值模拟中异形颗粒生成方法过于复杂、异形颗粒形状与摩擦强度关系多为定性分析而缺乏定量分析等。

本文将基于二维颗粒流程序,采用模板替换法生成多种颗粒形状的异形颗粒集合体,作为断层破碎带填充介质,对断层剪切过程进行细观数值模拟,并使用形状系数^[13]对异形颗粒形状进行定量描述,探讨颗粒形状等因素对断层摩擦强度的影响,分析摩擦强度随形状系数的变化规律。

1 数值模型的构建

颗粒流(Particle Flow Code, PFC)方法是基于离散元理论的一种数值模拟方法^[14],克服了传统介质力学模型宏观连续性假设的局限性^[15],将不连续体看做有限个离散颗粒单元的集合体。每个颗粒单元的运动通过显式时步方法计算,在每个时步中交替使用牛顿第二定律和力-位移定律更新颗粒位置和接触力,使模型达到平衡。

1.1 颗粒生成

实验首先建立矩形断层破碎带,矩形初始高度

$W_0 = 20$ mm,宽度 $L = 40$ mm。在矩形范围内生成初始孔隙率为 0.12,颗粒半径分别为 0.225 mm、0.175 mm、0.125 mm、0.075 mm 的圆形颗粒集合体。模型使用无黏性颗粒模拟断层破碎带的填充颗粒,为较好地模拟无黏性材料的力学性质,颗粒之间接触模型采用线性接触模型^[16-17]。颗粒级配遵守幂律指数 D 控制的幂律方程,该方程能通过 D 的取值对颗粒尺寸和颗粒数目关系进行描述^[2,8],方程如下:

$$D = \log(N_i/N_0)/\log(R_0/R_i) \quad (1)$$

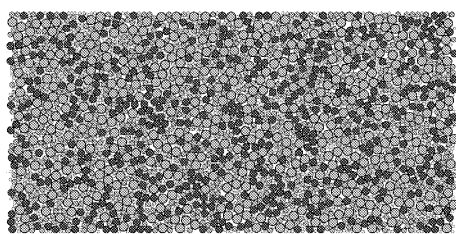
式中: R_0 、 R_i 为不同尺寸的颗粒半径; N_0 、 N_i 分别为所对应的颗粒数目。例如,粒径为 0.175 mm 和 0.225 mm 颗粒之间的数量关系可以表示为:

$$D = \log(N_{0.175}/N_{0.225})/\log(0.225/0.175)$$

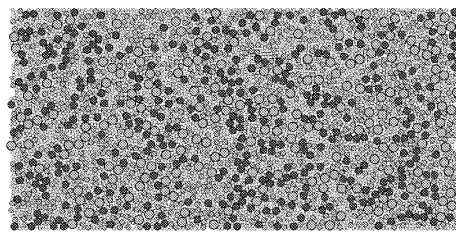
式中: $N_{0.175}$ 和 $N_{0.225}$ 分别为粒径是 0.175 mm 和 0.225 的颗粒数目, D 为给定值。根据文献^[8], $D = 0.81$ 表征粗粒度颗粒材料, $D = 2.6$ 表征细粒度颗粒材料,本文 D 的取值为 0.81 和 2.6,计算本文的颗粒数目占总体百分比如表 1 所示。不同 D 的取值初始建模对比如图 2 所示。

表1 不同颗粒级配的颗粒数目百分比

颗粒半径 R/mm	颗粒数目百分比/%	
	$D = 0.81$	$D = 2.60$
0.225	10.8	35.1
0.175	19.8	25.8
0.125	29.5	21.1
0.075	39.9	18.0



(a) $D=0.81$



(b) $D=2.6$

图2 $D = 0.81$ 和 $D = 2.6$ 数值模型对比图

常规颗粒流模型采用圆形颗粒建模,难以准确模拟颗粒间的摩擦机制,采用异形颗粒代替圆形颗粒是一种很好的解决手段^[18]。本文主要使用三种

异形颗粒,分别为类长方形、类三角形、类正方形,采用簇单元(Clump)命令生成如图 3 所示的异形颗粒。首先使用圆形颗粒建立初始模型,然后创建异形颗粒的 Clump 模板,使用 Fish 语言编写颗粒替换程序,对已生成圆形颗粒模型的颗粒单元位置坐标、面积、质量等信息检索储存,使用已建立的异形颗粒模板一一对圆形颗粒等面积、等质量替换。异形颗粒长轴与水平面的夹角称为颗粒方位角^[19],初始建模时,方位角为 0°到 360°随机分布。

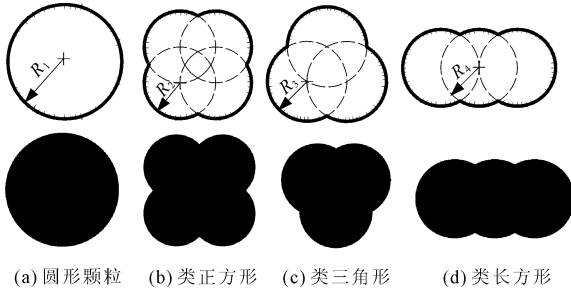


图 3 四种颗粒形状

1.2 试样生成

模型的主要结构如图 4 所示,左右边界为周期边界,在发生剪切的过程中,颗粒从右边穿过边界后,从左边边界同一位置重新进入。这样保证了颗粒数目的恒定和剪切过程的持续进行。为保证模型上下边界法向应力的恒定,采用 Fish 语言开发柔性边界,使用若干小颗粒施加粘结作为加载板,所施加的目标法向应力换算为力分别施加在每个小颗粒上,以保证在试验过程中法向应力保持不变。固定颗粒集合体上下一定宽度的颗粒作为断层上下盘的边界,与断层破碎带填充颗粒采用相同的粒径级配,确保了破碎带与其断层边界的耦合,防止颗粒沿着边界发生滑动。在剪切过程中,断层下盘固定,断层上盘向右施加恒定速度。为了保证试验变量的唯一性,异形颗粒建模所得颗粒集合体边界也均采用圆形颗粒。

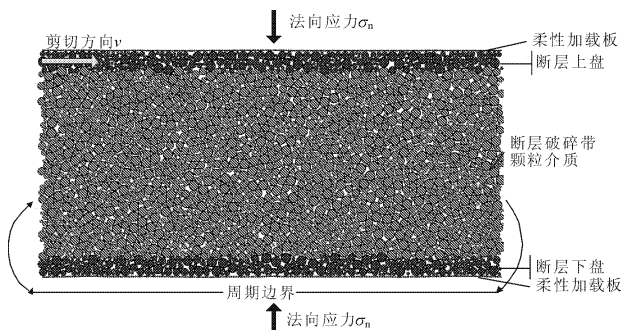


图 4 数值模型主要结构

1.3 颗粒形状描述

颗粒形状量化分析方法主要采用孔亮等^[13]提出的形状系数法,对颗粒的外轮廓使用圆形度和凹凸度进行描述,圆形度对颗粒自转影响较大,凹凸度对颗粒平移影响较大,计算公式为:

$$F_1 = A_f/A_s \quad (2)$$

$$F_2 = A'_f/A_s \quad (3)$$

$$F = \alpha F_1 + \beta F_2, (\alpha + \beta = 1) \quad (4)$$

式中: F_1 为圆形度; F_2 为凹凸度; F 为形状系数; A_f 为与颗粒周长相同的圆面积; A'_f 为颗粒最大内接标准椭圆面积; A_s 为颗粒面积。 α 、 β 分别为 F_1 、 F_2 的权重系数。本文 α 、 β 取值为 0.5,即形状系数是颗粒凹凸度和圆形度的平均数。异形颗粒形状系数如表 2 所示,最终生成了如图 5 所示颗粒试样模型图。

表 2 颗粒形状系数表

形 状	F_1	F_2	F
圆形	1.000	1.000	1.00
类正方形	0.912	0.728	0.82
类三角形	0.910	0.650	0.78
类长方形	0.799	0.644	0.72

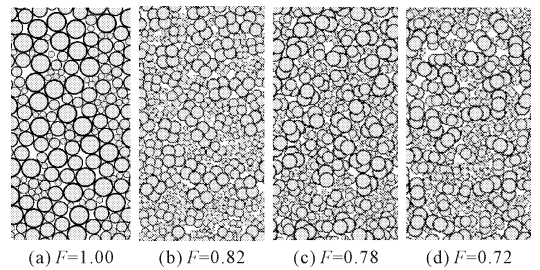


图 5 颗粒试样局部示意图

1.4 试样参数

颗粒程序进行数值模拟时,为了使微观参数能够代表材料的宏观参数,模拟材料的宏观性,需要经过参数标定的过程^[20-21]。本文微观参数采用文献[17]标定的砂土微观参数结果,如表 3 所示。

2 试验结果

断层的摩擦强度一般用摩擦系数 μ 表示,等于集合体内部颗粒所受剪应力与法向应力的比值,即 $\mu = \tau/\sigma_n$ ^[2,5]。试验过程中,法向应力 σ_n 保持恒定,剪应力 τ 的量测采用 PFC 软件内置的测量圆程序,在颗粒集合体内部设置多个测量圆监测应力的变化。计算原理如下:

$$\bar{\sigma}_{ij} = \left(\frac{1-\nu}{\sum_n V_{(p)}} \right) \sum \sigma_{(p),ij} V_{(p)} \quad i=1, j=1,2 \quad (5)$$

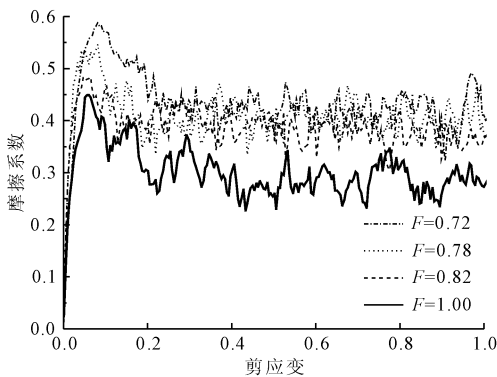
式中： $\sigma_{(p),ij}$ 为单个颗粒所受应力； $V_{(p)}$ 为该颗粒体积； n 为颗粒总数目； ν 为颗粒集合体孔隙率。本文需要量测剪应力 τ ，则取 $i=1; j=2$ 。剪应变 γ 代表断层上盘位移量 dx 与颗粒集合体瞬时高度 W 的比值，即 $\gamma = dx/W$ ，为使摩擦系数的变化达到相对稳定的值，模型的剪应变达到 100% 时结束试验。

2.1 形状系数对摩擦强度的影响

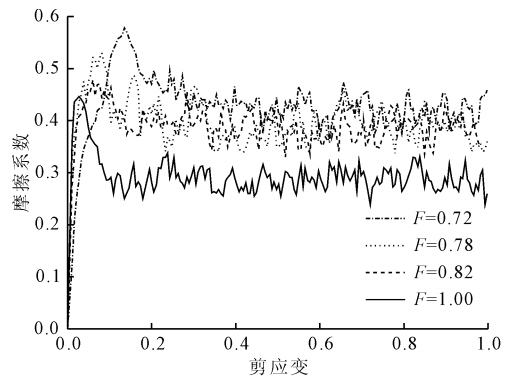
在整个剪切试验中，通过对不同颗粒形状的颗粒集合体内部剪应力的监测，得到如图 6 所示的摩擦系数 - 剪应变曲线。

表 3 数值模型参数

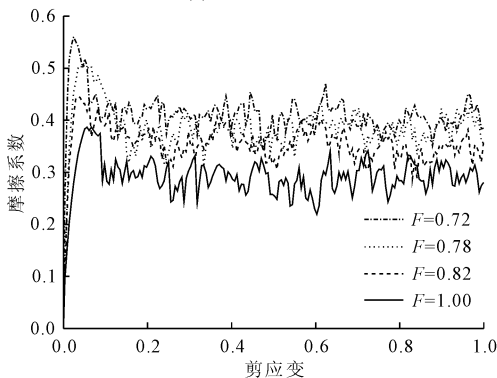
类别	参数	数值
颗粒属性	颗粒粒径 R/mm	0.225、0.175、0.125、0.075
	颗粒密度 $/(g \cdot \text{cm}^{-3})$	2.65
	颗粒法向刚度 $k_n/(N \cdot \text{m}^{-1})$	2×10^8
	颗粒法切向刚度比 k_n/k_s	2
	颗粒摩擦系数 f_c	0.5
模拟断层破碎带属性	高度 W_0/mm	20(初始值)
	宽度 H/mm	40
	法向应力 σ_n/MPa	1、5、10



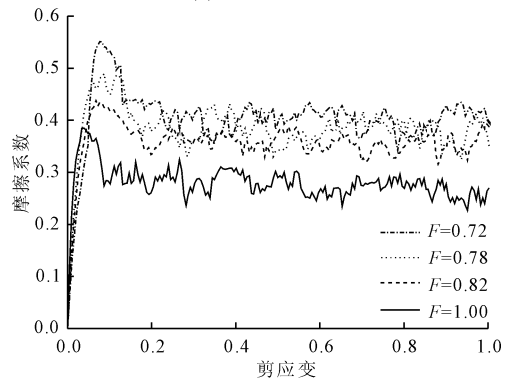
(a) $\sigma_n=1 \text{ MPa } D=0.81$



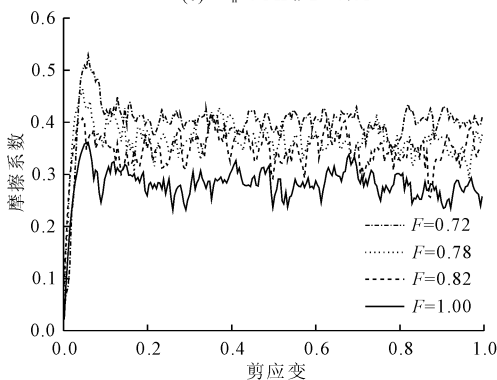
(b) $\sigma_n=1 \text{ MPa } D=2.6$



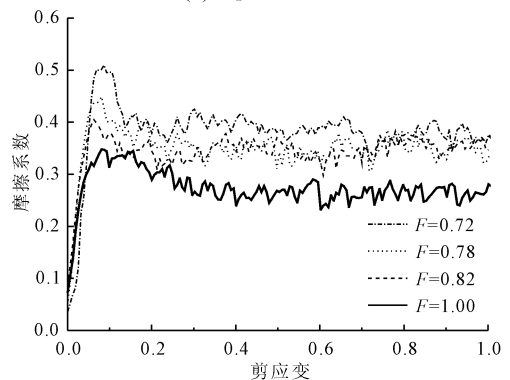
(c) $\sigma_n=5 \text{ MPa } D=0.81$



(d) $\sigma_n=5 \text{ MPa } D=2.6$



(e) $\sigma_n=10 \text{ MPa } D=0.81$



(f) $\sigma_n=10 \text{ MPa } D=2.6$

图 6 不同形状系数的摩擦系数 - 剪应变曲线

根据试验所得曲线图 6 可看出,试验模型加载的初始阶段中,摩擦系数上升较快,并迅速达到峰值摩擦系数 μ_{peak} ,然后迅速下降,并在剪应变到达 30%后,围绕一个相对稳定的值上下波动,该值为残余摩擦系数 μ_{mean} 。不同法向应力和颗粒级配条件下的峰值摩擦系数 μ_{peak} 如表 4 所示,残余摩擦系数 μ_{mean} 如表 5 所示。

表 4 峰值摩擦系数 μ_{peak}

F	μ_{peak}					
	D = 0.81			D = 2.60		
	1 MPa	5 MPa	10 MPa	1 MPa	5 MPa	10 MPa
1.00	0.449	0.387	0.362	0.446	0.385	0.348
0.82	0.484	0.445	0.414	0.479	0.438	0.405
0.78	0.547	0.503	0.464	0.530	0.489	0.449
0.72	0.588	0.560	0.520	0.578	0.551	0.510

表 5 残余摩擦系数 μ_{mean}

F	μ_{mean}					
	D = 0.81			D = 2.60		
	1 MPa	5 MPa	10 MPa	1 MPa	5 MPa	10 MPa
1.00	0.289	0.287	0.282	0.286	0.275	0.276
0.82	0.382	0.352	0.350	0.382	0.358	0.350
0.78	0.405	0.382	0.365	0.398	0.371	0.357
0.72	0.423	0.404	0.400	0.423	0.393	0.384

由图 6 可以看到,所有试验中摩擦系数 - 剪应变曲线均有锯齿状波动,波动的产生主要由于断层破碎带中颗粒在剪切运动中产生的不均匀相互作用造成。圆形颗粒建模所得摩擦系数一般位于 0.25 ~ 0.35 之间,异形颗粒所得结果一般位于 0.35 ~ 0.55 之间。圆形颗粒的摩擦强度低于异形颗粒,且类长方形颗粒较其他颗粒形状显示出较高的摩擦强

度。这主要是由剪切过程中,颗粒形状的圆形度和凹凸度等性质不同所导致的颗粒“互锁”现象造成的。断层剪切运动时,断层破碎带的颗粒主要以滚动和滑动两种方式运动,两种运动方式主要由作用在破碎带上的剪应力引起,圆形颗粒的圆形度和凹凸度均大于异形颗粒,所以圆形颗粒较异形颗粒的转动惯量和颗粒表面咬合力较小,发生同等角度转动或同等长度位移时所需要的剪应力更小,更容易发生转动而产生类似于滚珠的“润滑”作用,从而加速相对错动,导致摩擦系数较低;而形状系数较低的异形颗粒转动惯量和颗粒表面咬合力较大,剪切过程中需要更多的剪应力来提供转动所需的扭矩,表现为摩擦系数较圆形颗粒更大。因此,随着颗粒形状系数的降低,颗粒集合体的摩擦强度随之升高。

根据本文试验结果,数值模拟得到的残余摩擦系数一般位于 0.30 ~ 0.45 之间,而采用玻璃珠和石英砂模拟断层带,通过室内实验所得摩擦系数一般位于 0.40 ~ 0.60 之间^[6],即数值模拟所得结果普遍小于室内实验结果。根据 Frye 等^[22]和 Knuth 等^[23]分别使用木棒、玻璃棒等棒状组合体模拟二维状态下的剪切实验,发现二维状态下摩擦力小于三维状态下的摩擦力,主要是因为二维建模未考虑二维平面外的颗粒接触和颗粒间的空间相互作用。这就很好地解释了本文的数值模拟结果普遍小于室内实验结果的原因。

2.2 形状系数与摩擦强度的关系

根据表 5,可以得到如图 7 所示的不同条件下残余摩擦系数 - 形状系数关系曲线。为更好地探究残余摩擦系数 - 形状系数的关系,对该曲线进行拟合,对两者的关系进行量化分析,得到由参数 a 、 b 控制的线性方程 $\mu_{mean} = aF + b$,其中 μ_{mean} 为残余摩擦系数, F 为形状系数,拟合结果如表 6 所示。

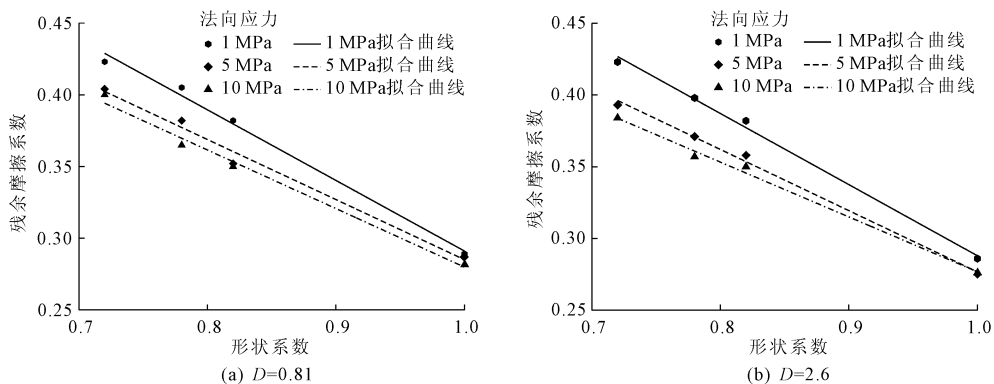


图 7 残余摩擦系数 - 形状系数拟合曲线

表 6 拟合参数表

D	0.81			2.60		
	1 MPa	5 MPa	10 MPa	1 MPa	5 MPa	10 MPa
法向应力	1 MPa	5 MPa	10 MPa	1 MPa	5 MPa	10 MPa
a	-0.49243	-0.42683	-0.40849	-0.4961	-0.42683	-0.38234
b	0.78347	0.71002	0.68829	0.78401	0.70352	0.65909
R^2	0.98347	0.98258	0.98538	0.99414	0.99373	0.99177

根据表 6 可以发现,拟合曲线斜率 a 均为负值,说明残余摩擦系数随着形状系数的增加而减小。随着法向应力 σ_n 的增加,参数 a 值增大,拟合曲线的斜率增大,因此在形状系数增量相同的条件下,残余摩擦系数的增量会随着 σ_n 的增大而减小。而颗粒级配的改变对曲线斜率的影响并不明显。这说明形状系数与法向应力之间有很强的相关性,且法向应力越大,形状系数对残余摩擦系数影响程度就越小。

3 结 论

(1) 断层破碎带数值剪切实验结果表明异形颗粒数值模型的摩擦强度比圆形颗粒模型的摩擦强度更大,即随着颗粒形状系数的减小(形状系数越小,颗粒形状越不规则),断层破碎带中颗粒之间“咬合互锁”现象愈发明显,使得其摩擦强度也随之增大。

(2) 采用形状系数对断层破碎带颗粒形状进行定量描述,则断层破碎带残余强度与形状系数的关系可以用线性函数很好地拟合,且拟合直线斜率 a 均为负值,说明残余摩擦系数是随着形状系数的增加而减小的。此外,通过拟合曲线斜率的变化可以得到,形状系数与法向应力之间有很强的相关性,且法向应力越大,形状系数对残余摩擦系数影响程度就越小。

参考文献:

[1] 黄福明.断层力学概论[M].北京:地震出版社,2013:2-82.

[2] Guo Y G, Morgan J K. Influence of normal stress and grain shape on granular friction: Results of discrete element simulations [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109 (B12):305.

[3] Summers R, Byerlee J. A note on the effect of fault gouge composition on the stability of frictional sliding[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1977, 14(3):155-160.

[4] Marone C, Scholz C H. The depth of seismic faulting and the upper transition from stable to unstable slip regimes[J]. Geophys. res. lett, 1988, 15(6):621-624.

[5] 何昌荣, Verberne B A, Spiers C J. 龙门山断裂带沉积岩和天然断层泥的摩擦滑动性质与启示[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1):113-131.

[6] Mair K, Frye K M, Marone C. Influence of grain characteristics on the friction of granular shear zones[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2002, 107(B10):ECV-1-ECV 4-9.

[7] Anthony J L, Marone C. Influence of particle characteristics on granular friction[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2005, 110(B8).

[8] Morgan J K, Boettcher M S. Numerical simulations of granular shear zones using the distinct element method: 1. Shear zone kinematics and the micromechanics of localization[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1999, 104 (B2):2703-2719.

[9] Morgan J K. Numerical simulations of granular shear zones using the distinct element method 2. Effects of particle size distribution and interparticle friction on mechanical behavior [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1999, 104 (B2):2721-2732.

[10] Guo Y, Morgan J K. Fault gouge evolution and its dependence on normal stress and rock strength—results of discrete element simulations: Gouge zone micromechanics[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2008, 113(B8).

[11] Guo Y, Morgan J K. Fault gouge evolution and its dependence on normal stress and rock strength—results of discrete element simulations: Gouge zone properties[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2007, 112(B10403).

[12] 杜欣,曾亚武,高睿,等.用离散元方法研究颗粒外形对摩擦机理的影响[J].西南交通大学学报,2012, 47(2):252-257.

[13] 孔亮,彭仁.颗粒形状对类砂土力学性质影响的颗粒流模拟[J].岩石力学与工程学报,2011, 30(10): 2112-2119.

[14] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1):47-65.

[15] 张坤勇,李威,罗兴军,等.基于 PFC2D 的砂土原生各向异性微观机理数值试验[J].岩土工程学报,2017, 39(3):518-524.

[16] 周健,史旦达,贾敏才,等.砂土单调剪切力学性状的颗粒流模拟[J].同济大学学报(自然科学版),2007, 35(10):1180-1180.

[17] 史旦达.单调与循环加荷条件下砂土力学性质细观模拟[D].上海:同济大学,2007.

[18] 张辉,于龙,王博,等.砂土中埋设管线竖向抗拔特性研究[J].水利与建筑工程学报,2015, 13(5): 156-160.

抗震性能指标影响不大,指标变化较小,表明钢筋间距对集束配筋装配式柱的抗震性能影响较小。

参考文献:

- [1] 张海顺. 预制混凝土结构插入式预留孔灌浆钢筋锚固搭接试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [2] 李世达. 预制混凝土框架柱及节点抗震性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [3] 王建. 套筒浆锚连接钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [4] Ousalem H, Ishikawa Y, Kimura H, et al. Seismic performance and flexural stiffness variation of assembled precast high-strength concrete beam jointed at mid-span using transverse bolts[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2009, 7(2): 205-216.
- [5] Ersoy Ugur, Tugrul Tankut. Precast concrete members with welded plate connections under reversed cyclic loading[J]. *Pci Journal*, 1993, 38(4): 94-100.
- [6] Vasconez R M, Naaman A E, Wight J K. Behavior of HPFRC connections for precast concrete frames under reversed cyclic loading[J]. *Pci Journal*, 1998, 43(6): 58-71.
- [7] 殷小波, 黄小坤, 田春雨, 等. 配置大间距高强纵筋的钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(8): 41-47.
- [8] 赵勇, 李锐, 王晓锋, 等. 大直径高强钢筋套筒灌浆连接预制柱抗震性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2017, 50(5): 27-35.
- [9] 裴梓洋. 集束配筋预制混凝土柱竖向连接方法分析与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
- [10] 梁伟怀. 集束配筋预制混凝土柱的受压性能试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
- [11] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010(2016版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [12] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010(2016版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [13] 装配式混凝土结构技术规程: GJ 1—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [14] 汪训流, 陆新征, 叶列平. 往复荷载下钢筋混凝土柱受力性能的数值模拟[J]. *工程力学*, 2007, 24(12): 76-81.
- [15] 崔明, 刘文林, 韩建平. PVA纤维增强混凝土框架柱抗震性能数值分析[J]. *低温建筑技术*, 2017, 39(10): 39-43.
- [16] 张军, 张辰. 装配式钢结构住宅半刚性节点抗震性能的试验研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(6): 185-190.
- [17] 邢民, 王越. 碳纤维钢骨-钢管混凝土柱抗震性能研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(2): 152-156.
- [18] 谢涛, 陈肇元. 高强混凝土柱抗震性能的试验研究[J]. *建筑结构*, 1998(12): 3-6.
- [19] 吕西林, 张国军, 陈绍林. 高轴压比高强混凝土足尺框架柱抗震性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(3): 20-26.
- [20] 范鹏. 钢筋混凝土十字形截面柱抗震性能试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [21] 赵斌, 吕西林, 刘海峰. 预制高强混凝土结构后浇整体式梁柱组合件抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2004, 25(6): 22-28.
- [22] 吴从晓, 张玉凤, 张超, 等. 装配式混凝土梁柱节点抗震性能研究[J]. *工程抗震与加固改造*, 2015, 37(1): 83-90.
- [23] 蒋勤俭. 国内外装配式混凝土建筑发展综述[J]. *建筑技术*, 2010, 41(12): 1074-1077.
- [24] 卢求. 德国装配式建筑发展历程与现状[J]. *住宅产业*, 2017, 25(2): 78-83.

(上接第47页)

- [19] 张翀, 舒赣平. 颗粒形状对颗粒流模拟双轴压缩试验的影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(8): 1281-1286.
- [20] 赵凯, 曾亚武, 曾超. 基于颗粒流法含软弱结构面岩质边坡稳定性分析[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(1): 97-102.
- [21] 曾超, 曾亚武, 赵凯. 节理接触面积和厚度对应力波传播特性影响的颗粒流数值模拟[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(1): 134-139.
- [22] Frye K M, Marone C. The effect of particle dimensionality on granular friction in laboratory shear zones[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(19): 22-1-22-4.
- [23] Knuth M, Marone C. Friction of sheared granular layers: Role of particle dimensionality, surface roughness, and material properties[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2007, 8(3).