

颗粒形状对粗粒土剪切变形影响的细观研究

魏 婕, 魏玉峰, 黄 鑫

A meso-scale study of the influence of particle shape on shear deformation of coarse-grained soil

WEI Jie, WEI Yufeng, and HUANG Xin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202002017>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

颗粒级配与孔隙比对粗粒土渗透系数的影响

Effects of gradation and void ratio on the coefficient of permeability of coarse-grained soil

丁瑜, 饶云康, 倪强, 许文年, 刘大翔, 张恒 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 108-108

基于能量耗散机制的粗粒土圆度损伤特性分析

Analyses of roundness damage characteristics of coarse-grained soil based on energy dissipation mechanism

何亮, 魏玉峰, 潘远阳, 雷壮 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 120-126

滑坡-碎屑流冲击导引结构的离散元模拟

Discrete element simulation of the landslide-debris flow impact guiding structure

张睿骁, 樊晓一, 姜元俊, 杨海龙 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 161-168

泸定大渡河桥冰碛土的结构及现场剪切试验研究

Soil structure and in-site shear test of moraine soil near the Xingkang Bridge over the Daduhe River in Luding

程强, 郭喜峰 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 126-133

江北机场高填方夯后碎块石土剪切力学性质研究

A study of the shear mechanical properties of high-filled gravel-block soil after dynamic compaction near the Jiangbei airport

马昊, 黄达, 肖衡林, 王俊杰, 马文浩 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 88-88

各向异性对软土力学特性影响的离散元模拟

Discrete element simulation of the influence of anisotropy on the mechanical properties of soft soil

赵洲, 宋晶, 刘锐鸿, 杨守颖, 李志杰 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 70-77



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202002017

颗粒形状对粗粒土剪切变形影响的细观研究

魏 婕, 魏玉峰, 黄 鑫

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 颗粒形状是影响粗粒土密实度、力学与渗流等特性的主要因素之一。为了分析颗粒形状对粗粒土剪切特性的影响, 采用离散元法生成 4 种不同形状的颗粒组, 进行粗粒土直剪试验模拟与剪切宏细观响应研究, 得出了颗粒形状对剪应力-剪位移、体应变-剪位移的影响, 分析了粗粒土剪切应力、应变特性与剪胀特性。通过分析剪切带厚度、颗粒旋转量值、平均接触数、孔隙率及接触力系等宏细观参量的演化规律, 研究颗粒形状在宏细观尺度上对粗粒土的影响。研究表明: 异形颗粒间的咬合自锁作用大于纯圆颗粒, 试样的抗剪强度有随形状系数的减小而增大的趋势。试样颗粒在外荷载作用下发生运动, 应变主要表现在颗粒运动剧烈、剪胀幅度较大的剪切带内。颗粒形状系数 F 减小, 试样的初始平均接触数增加, 内摩擦角 φ 增大, 剪切带内孔隙率增量越大, 剪胀幅度越大。剪切过程中强力链聚集于剪切带内并起骨架作用, 随着形状系数的减小, 力链长度在 0~5 所占百分比呈增大趋势; 剪切带内强力链的数目随着形状系数的减小而增加, 峰值含量在 30%~35% 之间。

关键词: 粗粒土; 颗粒形状; 剪切变形; 离散元; 力学机理

中图分类号: TU411.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)01-0114-09

A meso-scale study of the influence of particle shape on shear deformation of coarse-grained soil

WEI Jie, WEI Yufeng, HUANG Xin

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geo-environment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Particle shape is one of the main factors that affect the compactness, mechanics and seepage of coarse-grained soil. In order to analyze the influence of particle shape on the shear characteristics of coarse-grained soil, the discrete element method is used to generate four different particle groups. The direct shear test simulation and macro-micro shear response research of coarse-grained soil are carried out. The influence of particle shape on shear stress-shear displacement and volume strain-shear displacement is obtained. The shear stress, strain characteristics and dilatancy characteristics of coarse-grained soil are analyzed. The influence of particle shape on coarse-grained soil on macro-micro scale is studied by analyzing the evolution law of macro-micro parameters such as shear zone thickness, particle rotation value, average contact number, porosity and contact force system. The results show that the self-locking effect of the special-shaped particles is greater than that of the pure round particles, and the shear strength of the sample tends to increase with the decreasing shape coefficient. The sample particles move under the action of external load, and the strain is mainly shown in the shear zone where the particles move violently and dilate greatly. The particle shape coefficient decreases, the initial average contact

收稿日期: 2020-02-18; 修订日期: 2020-03-07

基金项目: 国家自然科学基金资助(42072303); 四川省教育厅科研计划重点项目资助(18ZA0045)

第一作者: 魏婕(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程。E-mail: 740641714@qq.com

通讯作者: 魏玉峰(1979-), 男, 博士后, 副教授, 主要从事地质工程、岩土工程科研和教学工作。E-mail: weiyufeng@cdu.edu.cn

number of the sample increases, the internal friction angle " φ " increases, and the larger the increment of porosity in the shear band, the larger the dilatancy amplitude. During the shearing process, the strong chain gathers in the shearing zone and acts as a skeleton. With the decrease in the shape coefficient, the percentage of the force chain length in the range of 0 - 5 increases. The number of strong chains in the shear band increases with the decrease in the shape coefficient, and the peak value content ranges between 30% and 35%.

Keywords: coarse-grained soil; particle shape; shear deformation; discrete element; mechanics mechanism

粗粒土作为一种颗粒状无黏性土广泛存在于自然界中,力学性质极其复杂,其抗剪强度主要源于颗粒间的滑动摩擦强度和咬合摩擦强度两部分,而颗粒形状又影响着咬合摩擦强度,因此对粗粒土颗粒形状的研究至关重要。近年来,国内外众多学者从颗粒级配、孔隙比、颗粒破碎等方面对粗粒土的抗剪强度、变形特性、渗流性能等角度取得了丰富的研究成果^[1-8],发现颗粒形状是影响粗粒土密实度、力学与渗流等特性的主要因素之一^[9-13]。杨贵等^[10]采用水泥净浆浇筑方法,制备了相同体积不同形状的粗颗粒近似模拟堆石料颗粒,通过三轴剪切试验发现:随着颗粒球度的增大,人工模拟堆石料峰值强度增大,内摩擦角增量随着颗粒球度的增大而减小。何亮等^[14]认为粗粒土颗粒随圆度减小,更易在颗粒边界棱角处产生微裂纹使颗粒磨损,且同一类型颗粒法向应力增大,达到损伤临界状态圆度损伤所需能量增大,圆度损伤因子减小。J. S. Dodds^[15]、刘秉清等^[16]的研究结果表明,颗粒形状等微观参数对砂土力学性质的影响较大。史旦达^[17]基于 PFC^{2D} 离散元软件,采用“clump”构造了“椭圆团颗粒”,研究了颗粒形状对砂土抗剪强度和变形特性的影响。孔亮等^[18]用 PFC^{2D} 模拟颗粒堆积试验、双轴试验和直剪试验,探讨了颗粒形状对类砂土材料宏观力学特性的影响规律。张翀等^[19]在研究中发现颗粒形状对颗粒试样的宏观特性有较大的影响,异形颗粒由于颗粒形状的特殊性,显著地提高了颗粒试样的剪切强度。任树林等^[20]发现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。

本文通过 PFC^{2D} 颗粒流程序对不同形状的粗粒土试样进行直剪数值模拟。选定特定状态对试样直剪过程中的宏细观力学特性进行分析,主要对不同颗粒形状粗粒土试样在剪切过程中的剪切带厚度、颗粒旋转量值、平均接触数、孔隙率增量及接触力系等宏观参量的演化规律进行研究,进而揭示出颗粒形状对粗粒土剪切影响的深层内在机理。

1 粗粒土直剪试验方案及结果

1.1 颗粒形状参数与试样参数的选定

按照孔亮等^[18]提出的形状系数法来量化颗粒形状,其计算公式为:

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

$$F_1 = \frac{A_f}{A_s} \quad (2)$$

$$F_2 = \frac{A_f'}{A_s} \quad (3)$$

式中: F ——形状系数;

F_1 ——圆形度;

F_2 ——凹凸度;

α 、 β —— F_1 、 F_2 的权重系数;

A_f ——颗粒面积;

A_f' ——颗粒最大内接标准椭圆面积;

A_s ——与颗粒周长相同的圆面积。

取 $\alpha = \beta = 0.5$, 即形状系数为二者的平均值。根据面积等效、质量等效和质心不变等原则^[21], 采用 clump 单元, 建立如图 1 所示的 4 种试样颗粒。初始构建模型时, 颗粒试样的方位角范围在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 内随机分布, 进而分析颗粒形状对粗粒土剪切力学特性的影响。依据公式(1)、(2)和(3), 得到图 1 四种不同形状颗粒参数的 F_1 、 F_2 和 F (表 1)。

本文的数值试验采用 ball 及 clump 构建 4 种不同形状的粗粒土颗粒, 黏聚力按零考虑, 颗粒间接触采用线性接触刚度模型。数值试验剪切盒的尺寸为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, 颗粒粒径范围为 $2 \sim 20 \text{ mm}$, 本文不考虑级配的影响, 因此异形颗粒的级配与初始纯圆颗粒级配一致。主要细观参数有颗粒间的接触刚度、墙体的接触刚

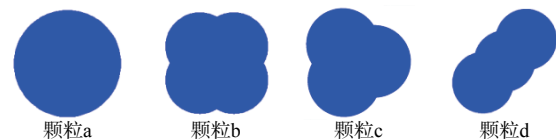


图 1 试样颗粒

Fig. 1 Sample particle

表 1 形状参数统计表

Table 1 Statistics of the shape coefficients

试样颗粒	F_1	F_2	F
a	1.000	1.000	1.000
b	0.912	0.728	0.820
c	0.910	0.650	0.780
d	0.799	0.644	0.722

度、粒间摩擦系数、初始孔隙率及密度等,根据 J.Wang^[22] 及蒋明镜等^[23] 所采用的数值试验参数并进行了适当调整,具体取值情况见表 2。颗粒试样生成后,对颗粒间的接触应力进行初始化,再对模型进行伺服控制,固定下剪切盒,再保持法向应力恒定的条件下,对上剪切盒施加一个水平向右的速度进行剪切,颗粒 a 的初始数值模型如图 2 所示。

表 2 模型细观参数

Table 2 Mesoscopic parameters of the model

颗粒密度 $\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	初始孔隙率 n_s	颗粒法向 接触刚度 $k_n / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	颗粒切向 接触刚度 $k_t / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	粒间摩擦 系数 f_c	墙体法向 接触刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
2 643	0.13	4.0×10^7	3.0×10^7	0.6	2×10^8

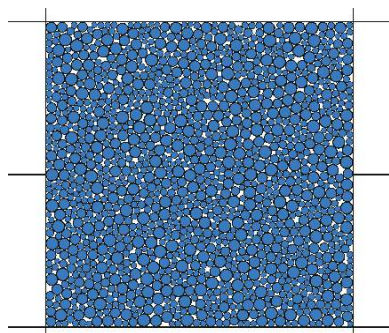


图 2 颗粒 a 初始模型结构图

Fig. 2 Structure diagram of the initial model of particle a

1.2 颗粒形状对粗粒土剪切特性的影响分析

1.2.1 直剪试验参数验证

为了验证数值试验参数的可靠性,本文室内物理试验选用 a 型颗粒与数值试验的结果作对比分析。试验仪器使用的是可视化中型直剪仪,主要由反力基座(可拆卸式外框架)、应力加载系统、滑动装置、可观测试剪切盒、数据采集系统组成。根据土工试验规程规定,为满足试验要求本文试验选用颗粒粒径范围在 2 ~ 20 mm 的圆形颗粒。剪切过程中分别施加 100 kPa, 200 kPa 和 300 kPa 的法向应力。

图 3 为不同正应力条件下颗粒 a 物理试验与数值试验的剪应力-剪切位移对比曲线。由图 3 可知,数值试验与物理试验剪切过程中的剪应力-剪切位移曲线

的变化趋势较为一致,剪切过程中表现为先增加后达到残余强度。

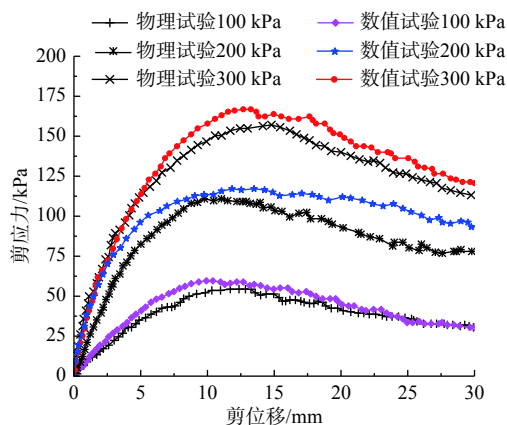


图 3 颗粒 a 室内试验与数值试验结果对比图

Fig. 3 Comparison chart of the numerical test and indoor test results of the particle a

1.2.2 颗粒形状对粗粒土剪切特性的影响

考虑到粗粒土颗粒在高正应力下可能发生破碎,本文以 200 kPa 下的试验结果来分析不同形状颗粒在剪切过程中表现出的剪切特性的异同。图 4、图 5 分别为 200 kPa 法向应力下四种颗粒的剪应力-剪切位移曲线和剪位移-体应变曲线(图中体积应变坐标轴,体积压缩为负,体积膨胀为正),图中表明:在颗粒形状的影响下,粗粒土试样颗粒在正应力一定条件下均表现出一定的应变软化和先轻微剪缩再大幅度剪胀特性。

由图 4 可知,随着形状系数 F 减小,粗粒土峰值剪应力增大,即在相同粒径、颗粒级配的情况下,颗粒轮廓形状越复杂,颗粒之间的咬合及摩擦阻力也越大,其抗剪强度也就越高。由图 5 可知,在加压初期, $F=0.720$

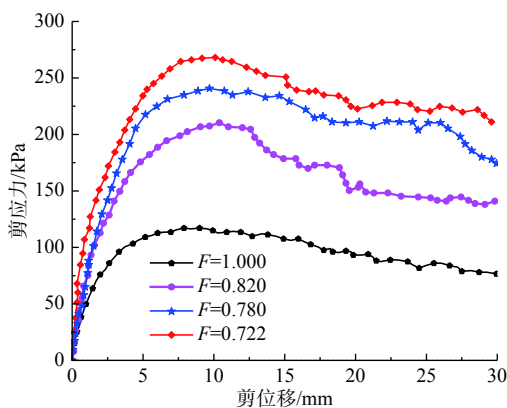


图 4 不同形状系数试样的剪应力-剪切位移关系曲线

Fig. 4 Shear stress-shear displacement curve of specimens with different shape coefficients

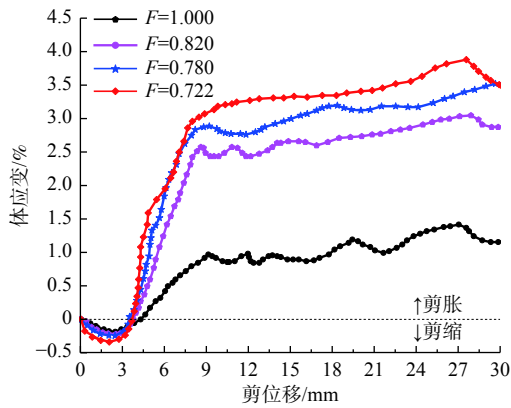


图5 不同形状系数试样的体应变-剪切位移曲线

Fig. 5 Volume strain-shear displacement curves of specimens with different shape coefficients

试样产生体积剪缩效应最明显,而纯圆颗粒的剪缩幅度最小。持续加压时,4种颗粒均大幅剪胀,异形颗粒剪胀幅度明显大于纯圆颗粒。

剪切过程中,颗粒实际上受到的合力方向是非水平的,若将实际合力当作轴向应力,将剪切盒的约束力当作围压,剪切带内的颗粒受力情况与三轴试验的受力形式十分类似。在三轴试验中,围压的大小决定了试样破坏时的峰值强度,而围压就起到了限制试样剪胀的作用,因此粗粒土的剪胀幅度是影响其抗剪强度的主要因素。

M.Oda等^[24]指出颗粒试样的体积变化主要反映在剪切带区域,且剪切带内力链的崩溃主要由滚动引起。通过观察剪切过程中剪切带内颗粒位置的变化情况,将剪切位移为10 mm时的4种颗粒剪切带的形状绘于同一图中,根据剪切盒的尺寸计算出各自的剪切带宽度(图6)。剪切时颗粒形状变化对剪切带厚度有一定影响,表现为变形的局部化发生在狭长的剪切带内,且上下剪切盒内的颗粒运动幅度不相同,上剪切盒位移较大。分析图6,随着 F 的减小,剪切带厚度增大,当 $F=1.000, 0.820, 0.780, 0.722$ 时,所对应的剪切带厚度分别为38.2 mm, 41.8 mm, 43.5 mm和44.7 mm,纯圆颗粒剪切带内的剪胀幅度不如异形颗粒。

对试验过程中试样不同高度范围内颗粒的旋转角度进行统计,得到图7所示旋转角度与试样高度的对应关系。剪切带内颗粒平均旋转量较大,向两侧逐渐减小。另外,纯圆与异形颗粒的峰值旋转角度相差较大,形状系数 F 越小,颗粒平均旋转量越小。纯圆颗粒旋转角度最大可达67.8°,且随着 F 的减小,峰值旋转角度减小。说明在相同外力作用下,纯圆颗粒试样在剪切过程中的旋转幅度更大,其结构稳定性较差。

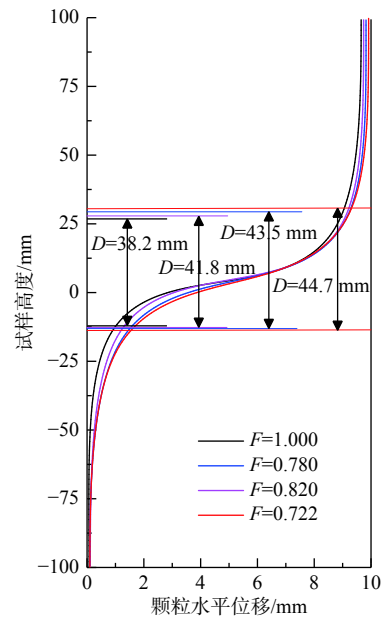


图6 剪切带厚度

Fig. 6 Shear zone thickness

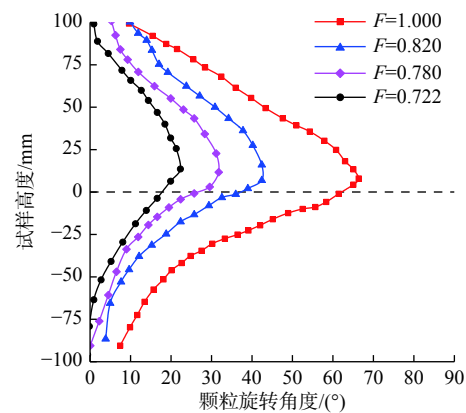


图7 颗粒旋转量值

Fig. 7 Particle rotation value

1.3 颗粒形状对粗粒土剪切变形影响的力学机理

剪切过程中,颗粒主要以滑动和滚动两种方式运动,粗粒土的抗剪强度主要由两方面组成:颗粒间的滑动摩擦强度和咬合摩擦强度。在外力作用下,颗粒发生相对运动,导致颗粒重新定向排列。试样颗粒越光滑,其颗粒间的咬合嵌锁作用越弱,咬合摩擦强度越小,其抗剪强度主要体现为滑动摩擦强度;而试样颗粒表面若有起伏,颗粒间则存在较强的咬合嵌锁作用,且颗粒表面越粗糙,其咬合嵌锁作用越强。

图8为考虑滚动阻矩的圆形颗粒和形状系数 $F=0.820, F=0.780$ 的clump颗粒在平面上滚动的示意图。分别在两种颗粒的质心上作用水平力 T 来推动颗粒滚动,同时在质心上作用一个垂直力 F_n ^[25]。

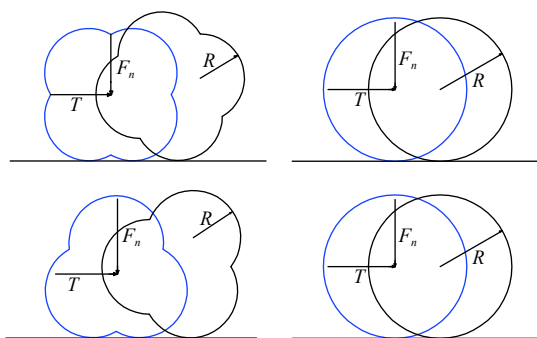


图 8 异形颗粒等效滚动示意图^[25]

Fig. 8 Schematic diagram showing equivalent rolling of irregularly shaped particles^[25]

根据 Iwashita 等^[26]的研究,采用 M_r 来定义抗滚动模型中的滚动阻力,其表达式为:

$$M_r = \begin{cases} -k_r \theta_r, & \text{若 } |-k_r \theta_r| < u_r R_r |f_n| \\ -u_r R_r |f_n| \frac{k_r \theta_r}{|k_r \theta_r|}, & \text{若 } |-k_r \theta_r| \geq u_r R_r |f_n| \end{cases} \quad (4)$$

式中: k_r ——滚动刚度, Iwashita 等^[26]建议其取值为

$$k_r \approx k_s R^2;$$

k_s ——颗粒切向刚度;

u_r ——滚动摩擦系数;

f_n ——颗粒间法向接触力;

R_r ——两颗粒的共有半径, $R_r = r_1 r_2 / (r_1 + r_2)$ 。

滚动摩擦系数的取值可根据 Estrada N^[27]提出的方法确定。周伦伦^[25]根据图 8 得到了对于考虑滚动阻力的圆形颗粒和 $F=0.820$ 、 $F=0.780$ 的颗粒在水平推力 T 的作用下平面上滚动一周所做的功,再令等效颗粒滚动一周所做的功相等,即 $W_a = W_b = W_c$,这样就可以得到形状系数 $F=0.820$ 、 $F=0.780$ 的 clump 颗粒的等效滚动摩擦系数 $u_{r,b}$ 和 $u_{r,c}$,根据颗粒面积等效原则,式(5)、式(6)可换算成关于 δ 的表达式:

$$u_{r,b} = \frac{(\sqrt{2}-1)\delta R_b}{\pi R} = \frac{(\sqrt{2}-1)\delta \sqrt{\pi/(3\pi + \delta^2 + 2\delta \sqrt{1-\delta^2/4} - 4\cos^{-1}(\delta/2))}}{\pi} \quad (5)$$

$$u_{r,c} = \frac{\sqrt{3}\delta R_c}{4\pi R} = \frac{\sqrt{3}\delta \sqrt{\pi/(5\pi/2 + \sqrt{3}\delta^2/4 + 3\delta/2 \sqrt{1-\delta^2/4} - 3\cos^{-1}(\delta/2))}}{4\pi} \quad (6)$$

式中: δ ——组元颗粒的间距。

δ 增大,等效滚动摩擦系数增大,故 $u_{r,b} < u_{r,c}$,即 $F=0.820$ 受到的摩擦阻力要小于 $F=0.780$ 的颗粒。在实际剪切过程中,异形颗粒之间有咬合作用,比在平面上滚动受到的阻力大, $u_{r,b}' > u_{r,b}$, $u_{r,c}' > u_{r,c}$,且 $u_{r,b}' < u_{r,c}'$, $F=0.780$ 的颗粒滚动摩擦系数比 $F=0.820$ 颗粒增大的多,滚动时更困难。故形状系数 F 越小,颗粒间咬合摩擦作用更强烈,其咬合摩擦强度也越高,在宏观上反映为抗剪强度更高。

2 颗粒形状对粗粒土细观参数的影响

在法向应力作用下,粗粒土颗粒发生运动,致使试样重新排列,以适应法向应力变化引起的应力状态的改变。剪切过程中,粗粒土所表现出的宏观力学特征都是细观结构不断演化的结果。因此,对粗粒土试样剪切过程中细观组构参数的特点及其演化规律的分析,有助于进一步揭示颗粒形状与粗粒土剪切特性的对应关系。

2.1 颗粒形状对接触状态的影响

Oda^[28]研究了平均接触数与抗剪强度之间的关系,研究表明,对于同一形状试样,抗剪强度在宏观上取决于初始密度和围压,在细观上取决于粒间的平均接触数。平均接触数越大,颗粒间的接触越充分,颗粒骨架体系能承担更大的外力。而剪胀现象的本质是颗粒体系在外荷载作用下发生运动和重新排列的结果,这一系列变化直接影响平均接触数。

通过监测 4 种试样接触数的变化情况,得到剪切过程中不同形状颗粒试样的平均接触数 C_n 的演变规律(图 9)。由图 9 可知:当 $F=1.000$, 0.820 , 0.780 , 0.722 时,初始平均接触数分别为 3.67, 3.99, 4.15, 4.31。平均接触数整体呈现先小幅增大,再大幅减小,最后

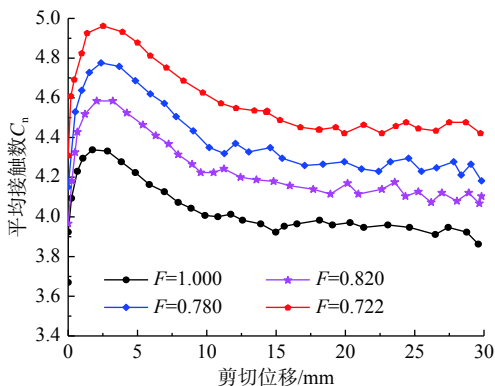


图 9 剪切过程中平均接触数 C_n 的演变规律

Fig. 9 Evolution law of the average coordination number C_n in the shear process

趋于稳定。荷载的施加使得试样发生挤密,接触数有一定增加,当剪切继续时,颗粒发生运动,试样在外荷载作用下发生重排列,试样体应变增大,发生剪胀,平均接触数逐渐减小。形状系数 F 的减小使得 C_n 的峰值及稳定后的值越大。

根据颗粒直剪试验所获得的内摩擦角,得到初始平均接触数与颗粒形状系数 F 、内摩擦角 φ 与颗粒形状系数 F 的对应关系(图 10)。颗粒形状系数影响着试样的初始平均接触数,且试样的抗剪强度受颗粒形状及其初始平均接触数的影响。其规律为:在同一初始孔隙率条件下,颗粒形状系数 F 减小,试样的初始平均接触数增加,内摩擦角 φ 增大,即抗剪强度增大。表明在相同孔隙率条件下,异形颗粒试样能与更多颗粒互相接触,即颗粒间接触更加紧密,试样整体结构会更加稳定,在宏观尺度上表现为异形颗粒抗剪强度更高。

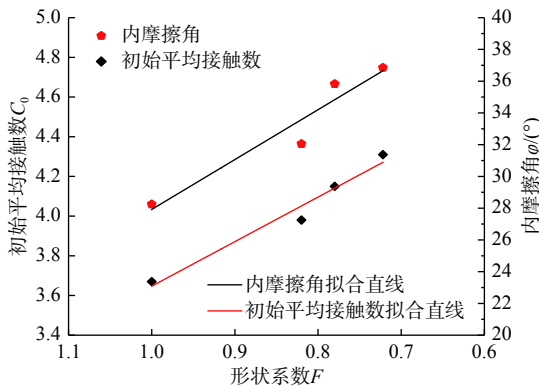


图 10 C_0 - F 、 φ - F 关系

Fig. 10 Relationship between C_0 - F and φ - F

与接触数一样,孔隙率用于反映粒间接触的密实程度。以剪切带作为分界线,将试样分为剪切带、剪切带上侧及剪切带下侧 3 个条带,图 11 为 $F=1.000$ 时孔隙率增量的演化过程。可以看出,剪切带内孔隙率均明显增大,说明剪切带内发生大幅度剪胀,导致试样整体的剪胀;剪切带外发生轻微剪胀或剪缩,对试样整体剪胀影响较小。

由图 11 可知,试样的大幅度剪胀发生在剪切带内,是影响整个试样剪胀幅度的关键。因此,对形状系数不同的另外 3 组试样剪切带内孔隙率增量的演化过程进行了统计,结果如图 12 所示。几种颗粒的孔隙率演化均符合随着剪切位移逐渐增大的规律,且颗粒形状系数越小,孔隙率增量越大。在相同法向应力作用下,纯圆颗粒的剪胀率最小,形状系数 F 越小,剪胀幅度越大。

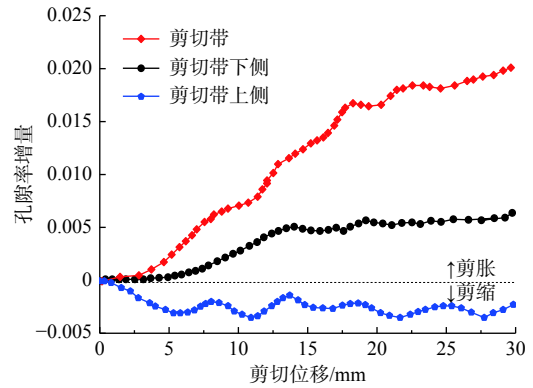


图 11 $F=1.000$ 时孔隙率的演化

Fig. 11 Evolution of porosity when $F=1.000$

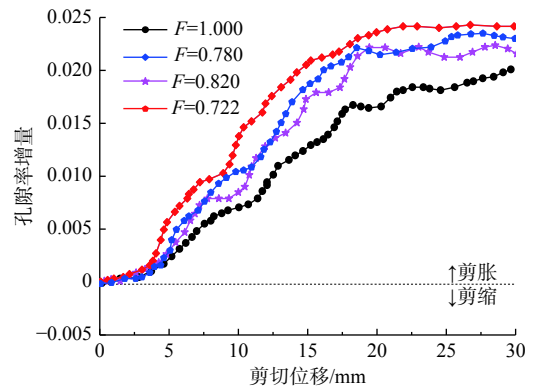


图 12 不同颗粒形状粗粒土剪切带内孔隙率的演化

Fig. 12 Evolution of porosity in the shear zone of coarse-grained soils with different particle shapes

2.2 颗粒形状对粗粒土力链变化的影响

当试样被施加外荷载时,相邻颗粒会相互接触,形成许多强度不同的力链,非均匀地分布在颗粒体系中。力链网络是宏观上用来表征土骨架体系上粒间接触力的形式,是颗粒体系受外荷载作用时受力响应机制的反应^[29-30]。图 13 为 4 种颗粒试样在 200 kPa 法向力作用下同一时刻剪切带内的力链网络结构图。相较于初始时期,力链网络的强弱力链区分愈加明显,主要表现为强力链聚集并起骨架作用,且沿剪切盒对角线分布。

将 $F=1.000$ 时的力链长度进行统计并得到其力链长度的概率分布(图 14)。力链长度的分布概率随着力链的长度增大而减小,长度 $n=3$ 的力链占比最高, $n>15$ 的力链长度数目仅占 3.39%。力链越长,引起其变化的因素就越多。对于过长的力链,在微小扰动下就会使长力链发生变化,甚至断裂成稳定的较短力链。统计 4 种试样的力链长度各自所占百分比并绘于图 15,可见整体上表现出在力链长度 0~5 范围内所占百分比最高。随着形状系数 F 的减小,力链长度在 0~5 所占百分比呈增大趋势。

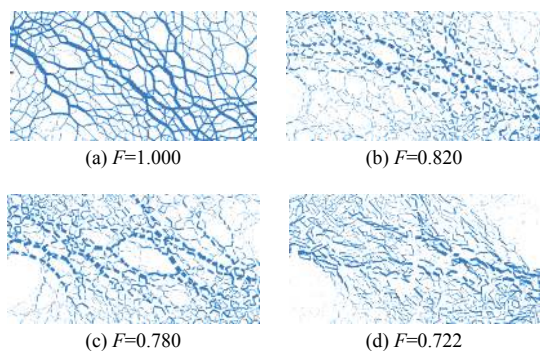


图 13 剪切过程中的力链网络
Fig. 13 Force chain network in the shear process

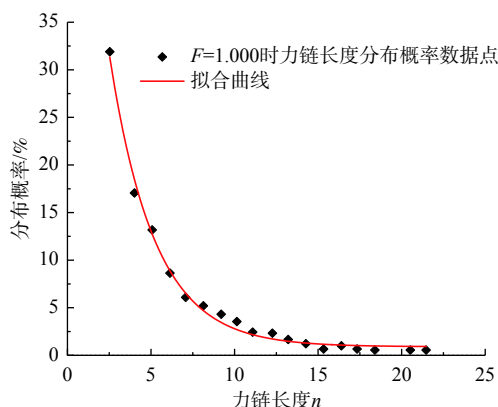


图 14 力链长度分布概率
Fig. 14 Probability of the force chain length distribution

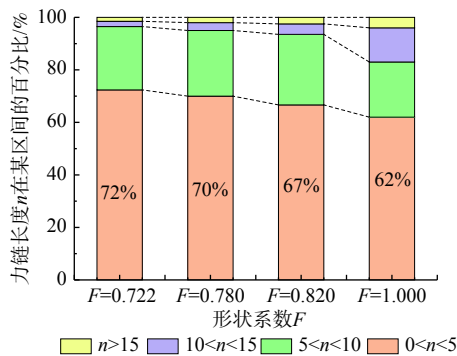


图 15 不同形状系数试样的力链长度分布
Fig. 15 Force chain length distribution of specimens with different shape coefficients

为了进一步定量分析剪切过程中不同颗粒形状粗粒土粒间作用力的变化规律, 本文研究中以 200 kPa 作为强弱力链的分界值, 大于 200 kPa 的为强力链, 小于 200 kPa 的为弱力链。利用 Image Pro Plus 图像处理分析软件, 分别统计了 4 种颗粒形状粗粒土剪切过程中, 不同时刻剪切带内土体中不同力链的面积。用强力链的面积占被测区力链总面积的百分比, 作为强力链的百分含量(图 16)。

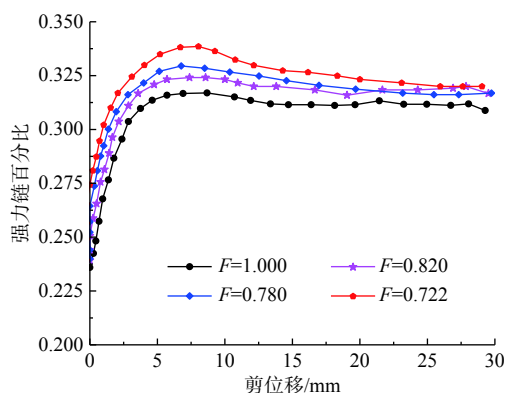


图 16 不同颗粒形状试样剪切过程中剪切带内强力链含量百分比
Fig. 16 Evolution of the strength chain content percentage in the shear process of specimens with different particle shapes

图 16 中 4 种形状的粗粒土试样剪切带内强力链含量百分比所表现出的趋势较为一致。在剪切位移为零时, 由于正应力的施加, 颗粒间会发生挤密, 产生一部分强力链; 当剪切进行时, 随着剪切位移的增加, 剪切带内强力链逐渐汇集, 且在剪切峰值时强力链的含量达到最大; 越过峰值后, 剪切带开始发生破坏, 强力链也随之减少并逐渐趋于稳定。另外, 峰值时, 4 种颗粒强力链占比在 30%~35% 之间, 且随着形状系数 F 的减小, 剪切带内强力链含量百分比呈增大趋势。

颗粒个体是互相离散的, 颗粒体系的宏观变形和强度特性等主要取决于颗粒个体的空间排列及相互作用力。剪切过程中粗粒土颗粒间相互作用力的大小与土体宏观剪切应力的大小具有一定的对应关系: 剪切过程中土体颗粒间的相互作用力越大, 土体的宏观剪切应力也越大。

3 结论

(1) 通过对剪切时颗粒剪切特性的分析, 可知试样的应变主要表现在颗粒运动剧烈、剪胀幅度较大的剪切带内, 剪切带外发生轻微剪胀或剪缩, 对试样整体剪胀影响较小, 说明剪切带的变化是影响整个试样变形的关键。

(2) 剪切过程中, 试样在外荷载作用下颗粒发生运动, 试样剪切带厚度、平均接触数、孔隙率等宏观参量发生变化, 这些宏观参量的变化也反映了剪切带内的剪胀现象。通过对试样的接触力系的分析: 颗粒形状的不规则, 导致剪切带内强力链的数目随着形状系数的减小而增加; 另外, 随着形状系数的减小, 力链长度在 0~5 范围内所占百分比呈增大趋势。

(3) 异形颗粒间的咬合自锁作用大于纯圆颗粒,

剪胀幅度随形状系数的减小而增大, 对应的试样的抗剪强度随形状系数的减小而增大。

参考文献 (References) :

- [1] 丁瑜, 饶云康, 倪强, 等. 颗粒级配与孔隙比对粗粒土渗透系数的影响[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 108 - 116. [DING Yu, RAO Yunkang, NI Qiang, et al. Effects of gradation and void ratio on the coefficient of permeability of coarse-grained soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 108 - 116. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 罗伟锦, 杨兰强, 熊署丹. 考虑颗粒破碎的无黏性粗粒料的剪胀模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(6): 71 - 79. [LUO Weijin, YANG Lanqiang, XIONG Shudan. Dilatancy model including particle breakage for cohesion less coarse aggregates[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(6): 71 - 79. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 李涛, 付宏渊, 周功科, 等. 降雨入渗条件下粗粒土路堤暂态饱和区发展规律及稳定性研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(5): 74 - 80. [LI Tao, FU Hongyuan, ZHOU Gongke, et al. A study of development law and stability of transient saturated areas of coarse-grained soil embankment under rainfall infiltration[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(5): 74 - 80. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 史乃伟, 李飒, 刘小龙, 等. 粗砂直剪试验与离散元细观机理分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(5): 261 - 266. [SHI Naiwei, LI Sa, LIU Xiaolong, et al. Critical state test and meso mechanism of sand[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(5): 261 - 266. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 刘洋, 吴顺川, 周健. 单调荷载下砂土变形过程数值模拟及细观机制研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3199 - 3204. [LIU Yang, WU Shunchuan, ZHOU Jian. Numerical simulation of sand deformation under monotonic loading and mesomechanical analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3199 - 3204. (in Chinese with English abstract)]
- [6] GUO Y G. Influence of normal stress and grain shape on granular friction: Results of discrete element simulations[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2004, 109(B12): B12305.
- [7] 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.
- [8] ROTHENBURG L, BATHURST R J. Analytical study of induced anisotropy in idealized granular materials[J]. Géotechnique, 1989, 39(4): 601 - 614.
- [9] 朱泽奇, 盛谦, 程红战, 等. 基于直接生成法的土石混合体三维随机模型构建与数值仿真研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1188 - 1194. [ZHU Zeqi, SHENG Qian, CHENG Hongzhan, et al. 3D stochastic model and numerical simulation of soil-rock mixture based on direct method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 1188 - 1194. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 杨贵, 许建宝, 孙欣, 等. 颗粒形状对人工模拟堆石料强度和变形特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3113 - 3118. [YANG Gui, XU Jianbao, SUN Xin, et al. Experimental study of influence of particle shape on strength and deformation for artificial rockfill materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(11): 3113 - 3118. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王鹏程, 刘建坤. 颗粒形状对不良级配碎石集料剪切特性的影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2198 - 2202. [WANG Pengcheng, LIU Jiankun. Effect of particle shape on the shear behavior of open-graded crushed aggregate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2198 - 2202. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 张程林, 周小文. 砂土颗粒三维形状模拟离散元算法研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊1): 115 - 119. [ZHANG Chenglin, ZHOU Xiaowen. Algorithm for modelling three-dimensional shape of sand based on discrete element method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(Sup1): 115 - 119. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 刘广, 荣冠, 彭俊, 等. 矿物颗粒形状的岩石力学特性效应分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 540 - 550. [LIU Guang, RONG Guan, PENG Jun, et al. Mechanical behaviors of rock affected by mineral particle shapes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3): 540 - 550. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 何亮, 魏玉峰, 潘远阳, 等. 基于能量耗散机制的粗粒土圆度损伤特性分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 120 - 126. [HE Liang, WEI Yufeng, PAN Yuanyang Y, et al. Analyses of roundness damage characteristics of coarse-grained soil based on energy dissipation mechanism[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 120 - 126. (in Chinese with English abstract)]
- [15] DODDS J S. Particle shape and stiffness-effects on soil behavior[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2003.
- [16] 刘清秉, 项伟, LEHANE B M, 等. 颗粒形状对砂土抗剪强度及桩端阻力影响机制试验研究[J]. 岩石力学与

- 工程学报, 2011, 30(2): 400-409. [LIU Qingbing, XIANG Wei, LEHANE B M, et al. Experimental study of effect of particle shapes on shear strength of sand and tip resistance of driven piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 400-409. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 史旦达, 周健, 刘文白, 等. 砂土单调剪切特性的非圆颗粒模拟[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1361 - 1366. [SHI Danda, ZHOU Jian, LIU Wenbai, et al. Numerical simulation for behaviors of sand with non-circular particles under monotonic shear loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1361 - 1366. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 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): 2113 - 2119. [KONG Liang, PENG Ren. Particle flow simulation of influence of particle shape on mechanical properties of quasi-sands[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(10): 2113 - 2119. (in Chinese with English abstract)]
- [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. [ZHANG Chong, SHU Ganping. Effect of particle shape on biaxial tests simulated by particle flow code[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1281 - 1286. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 任树林, 曾亚武, 赵凯. 颗粒形状对断层摩擦强度影响的数值试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(3): 42 - 47. [REN Shulin, ZENG Yawu, ZHAO Kai. Numerical experiments on the effects of particle shape on frictional strength of faults[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(3): 42 - 47. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 郑俊杰, 赖汉江, 董友扣, 等. 桩承式路堤承载特性颗粒流细观模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(11): 43 - 47. [ZHENG Junjie, LAI Hanjiang, DONG Youkou, et al. Mesomechanical analysis of bearing characteristics of pile-supported embankment with particle flow code[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2012, 40(11): 43 - 47. (in Chinese with English abstract)]
- [22] WANG J, DOVE J E, GUTIERREZ M S. Discrete-continuum analysis of shear banding in the direct shear test[J]. *Geotechnique*, 2007, 57(6): 513 - 526.
- [23] 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. [JIANG Mingjing, WANG Fuzhou, ZHU Hehua. 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. (in Chinese with English abstract)]
- [24] ODA M, KAZAMA H, KONISHI J. Effects of induced anisotropy on the development of shear bands in granular materials[J]. *Mechanics of Materials*, 1998, 28(1/2/3/4): 103 - 111.
- [25] 周伦伦. 颗粒破碎与形状对颗粒材料力学性质影响的离散元研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017. [ZHOU Lunlun. Dem investigation of influence of particle breakage and shape on the mechanical behaviors of granular materials[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.(in Chinese with English abstract)]
- [26] IWASHITA K, ODA M. Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by DEM[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(3): 285 - 292.
- [27] ESTRADA N, AZÉMA E, RADJAI F, et al. Identification of rolling resistance as a shape parameter in sheared granular media[J]. *Physical Review E*, 2011, 84: 011306.
- [28] ODA M. Co-ordination number and its relation to shear strength of granular material[J]. *Soils and Foundations*, 1977, 17(2): 29 - 42.
- [29] 孙其诚, 金峰, 王光谦, 等. 二维颗粒体系单轴压缩形成的力链结构[J]. 物理学报, 2010, 59(1): 30-37. [SUN Qicheng, JIN Feng, WANG Guangqian, et al. Force chains in a uniaxially compressed static granular matter in 2D[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(1): 30-37. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 孙其诚, 辛海丽, 刘建国, 等. 颗粒体系中的骨架及力链网络[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊1): 83 - 87. [SUN Qicheng, XIN Haili, LIU Jianguo, et al. Skeleton and force chain network in static granular material[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(Sup1): 83 - 87. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张明霞