

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.05.16

基于能量耗散机制的粗粒土圆度损伤特性分析

何 亮, 魏玉峰, 潘远阳, 雷 壮

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

摘要: 圆度损伤是研究粗粒土力学特性变化的重要指标, 为探索剪切过程中粗粒土圆度损伤的演化过程, 定性及定量从能量角度对损伤本质进行分析。根据能量耗散原理, 分析了剪切系统及单个颗粒剪切过程中能量的耗散与传递。结合弹塑性力学与热力学定律, 定义粗粒土圆度损伤因子 D_r , 建立了基于能量耗散下的圆度损伤模型。采用剪切试验研究不同圆度的花岗岩和卵石颗粒的强度特性, 以观测效果较好的花岗岩颗粒为研究对象, 研究不同法向应力下的圆度损伤演化过程, 运用 MATLAB 对模型及试验数据分析。结果表明: 圆度不同的颗粒(花岗岩、卵石)随圆度减小, 传递到颗粒内部积聚的塑性势能增大, 更易在颗粒边界棱角处产生微裂纹使颗粒磨损, 从而增大粗颗粒圆度, 强度特性减小; 剪切试验粗粒土圆度损伤演化过程存在 2 次损伤拐点, 可分为圆度损伤响应、圆度损伤演化、圆度损伤稳定 3 个阶段; 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。基于能量耗散下建立的圆度损伤模型阐述了剪切过程中的圆度损伤, 试验结果能合理地反应圆度损伤演化过程中颗粒力学特性响应。

关键词: 粗粒土; 圆度损伤因子; 能量耗散; 剪切试验; 力学特性

中图分类号: TU411.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)05-0120-07

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

HE Liang, WEI Yufeng, PAN Yuanyang, LEI Zhuang

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

Abstract: Roundness damage is an important index to study the change of mechanical properties of coarse-grained soil. In order to explore the evolution process of roundness damage of coarse-grained soil during shearing, the nature of damage is analyzed qualitatively and quantitatively from the energy point of view. According to the principle of energy dissipation, the dissipation and transmission of energy in the shearing system and individual particle shearing process are analyzed. Based on the elastoplastic mechanics and thermodynamic laws, the roundness damage factor D_r of coarse-grained soil is defined, and the roundness damage model based on energy dissipation is established. The shear strength test is used to study the strength characteristics of granite and pebble particles with different roundness. The granite particles with good observation effect are studied. The evolution process of roundness damage under different normal stresses is studied. The model and test data are analyzed by using MATLAB. The results show that the particles with different roundness (granite and pebbles) decrease with the roundness, and the plastic potential energy transmitted to the interior of the particles increases. It is easier to generate micro-cracks at the corners of the particles to wear the particles and increase the roundness of the coarse particles. The strength characteristics

收稿日期: 2019-01-28; 修订日期: 2019-05-16

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFC1501000); 四川省教育厅科研计划重点项目资助(18ZA0045)

第一作者: 何亮(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土体特性及其稳定性研究。E-mail: 787211279@qq.com

通讯作者: 魏玉峰(1979-), 男, 博士后, 副教授, 主要从事岩土体特性及其稳定性研究。E-mail: weiyufeng@cdut.edu.cn

are reduced. There are two damage inflection points in the shear evolution process of coarse-grained soil roundness. It can be divided into three stages: roundness damage response, roundness damage evolution and roundness damage stability. The same type of particle normal stress increases, the energy required to achieve roundness damage in the critical state of damage increases, and the roundness damage factor decreases. Based on the roundness damage model established under energy dissipation, the roundness damage during the shearing process is described. The test results can reasonably reflect the mechanical response of the particle during the roundness damage evolution process.

Keywords: coarse-grained soil; roundness damage factor; energy dissipation; shear test; mechanical properties

圆度用于反映颗粒原始棱角被磨圆的程度,是颗粒的重要结构特征^[1],探究粗粒土的圆度损伤,对研究粗粒土力学特性具有重要意义。Wentworth C K^[2]首次给出了圆度的定义,指出圆度是最尖的角边曲率半径与最长对径一半的比值。Cherif Taiba A 等^[3]运用三轴试验对砂土的颗粒形状进行研究,建立了粉砂颗粒圆度与强度间联系,认为粗粒土的抗剪性能很大程度上依赖于颗粒圆度。Ghalehjough Babak Karimi 等^[4]提出基于直剪试验下,颗粒圆度对土的极限承载力影响大,随颗粒圆度增大极限承载力降低。Arun P Raj 等^[5]通过研究常用的圆度测量仪,建立圆度定量模型,分析了圆度测量的影响因素与试验误差。Vepraskas M J 等^[6]建立回归模型以确定砂粒圆度和球形度与土壤锥度指数及堆积密度和密集土壤休止角的关系。Zheng J 等^[7]详细介绍了识别粒子角和拟合圆的算法,用以计算土壤圆度。Zheng Junxing 等^[8]提出运用计算方法对土壤圆度进行计算,证明了不同类型土壤圆度采用几何算法优于图表法,分析了计算方法与传统方法分别计算颗粒圆度的差异。基于能量耗散角度研究剪切试验过程中粗粒土圆度损伤特性,能从本质上揭示圆度损伤机制。谢和平等^[9]认为岩石变形破坏是能量耗散等综合作用的结果,从能量角度提出了岩石强度准则和破坏准则。李子运等^[10]对不同围压下的页岩进行分析,提出了峰前以能量积聚为主,破坏过程发生能量释放和能量耗散,峰后残余强度下重新开始积聚能量,但能量积聚能力和效率不如峰前。岩石变形破坏的过程是和外界产生能量交换的过程,基于理论角度分析岩石破坏的能量传递与耗散,分析岩石损伤扩展过程,对揭示岩石变形破坏本质具有重要意义^[11-13]。陈中一等^[14]运用 MATLAB 对花岗岩裂隙萌生扩展的过程研究,探讨了裂隙萌生扩展影响因素并提出研究新思路。Saurer E^[15]基于 MATLAB 分析模型的断裂力学能量平衡和极限平衡

方法,定性和定量地模拟非平面剪切带传播速率,剪切过程中具有明显的能量演化特征。

传统的颗粒圆度研究,多集中于颗粒形状的研究^[16-17],未定量从能量角度对其损伤本质进行分析。对于基于能量耗散机制下,建立粗粒土剪切过程圆度损伤模型,分析了粗粒土剪切过程圆度损伤因子变化与圆度损伤能量的定量关联,对探究粗粒土剪切过程圆度损伤的本质是一种有意义的尝试。近年来对粗粒土的相关技术研究成果广泛运用于工程实践中^[18],基于能量耗散机制下对粗粒土圆度损伤进行分析,可从本质上探究剪切过程中的土体状态变化,定性及定量描述圆度损伤的发挥过程,对分析剪切过程中粗颗粒裂纹扩展成因、圆度损伤演化过程具有一定的理论指导意义和工程实用价值。

1 剪切中粗粒土能量的传递与耗散

粗粒土剪切过程中能量不能凭空产生,也不能凭空消失,只能以一种形式转换成另一种形式^[19-20]。针对剪切系统粗粒土在法向应力荷载作用下,剪切过程中满足系统能量守恒定律^[21]。在外力作用下通过复杂的功能转换关系,基于热力学第二定律^[19],土体作为开放系统,为不可逆过程,致使整个阶段能量逐渐减少。

粗粒土在剪切系统中,以剪切盒粗粒土为整体研究对象,在外力做功初始总能量为 E ,剪切系统剪切达到应力峰值临界状态具有一个动能增量 E_k ,以剪切系统作为介质,能量传递至颗粒系统。一部分能量克服摩擦力做功,以摩擦热 E_0 形式散失,基于热力学第二定律知摩擦生热为不可逆过程,致使系统整体能量逐渐减少;一部分转换为颗粒剪胀(剪缩)所需能量 E_1 ,宏观体现在颗粒孔隙率增大(减小);一部分转换为颗粒间重新排列所需能量 E_2 ,具体表现为粗粒土在剪切盒内以错动、翻滚、掉落等形

式产生动能与势能,另一部分因产生颗粒破碎粗粒土系统吸收部分能量 E_3 。基于系统能量守恒下,可知满足基本理论准则:

$$E = E_0 + E_1 + E_2 + E_3 + E_K \quad (1)$$

式(1)为剪切初始-应力峰值过程中,以粗粒土整体作为研究对象,基于系统能量守恒下建立的能量转化关系,如图1所示。

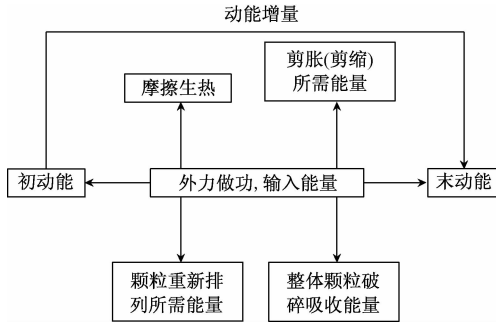


图1 粗粒土系统剪切过程能量转换传递关系
Fig.1 Various energy transfer relationships in the shear process of coarse-grained soil systems

剪切过程中,以单个颗粒为研究对象,外力所做功,首先以剪切盒为介质传递到颗粒整体,颗粒间应力发生改变,表现出各向异性,以单个颗粒为介质能量发生传递与耗散。一部分能量作为颗粒损伤演化所需能量,颗粒开始产生微裂纹和颗粒产生应力集中,微裂纹在整个过程逐渐增加、汇聚、扩展,逐渐贯通,形成新的微表面;另一部分能量以弹性势能的形式存储在颗粒内部,逐渐积累,弹性势能逐渐汇聚过程中,达到临界状态,以剧烈的方式将能量输出,颗粒产生变形破坏,以动能、摩擦热、声波能、辐射能等形式体现,弹性势能为颗粒变形破坏的主要能量(图2)。

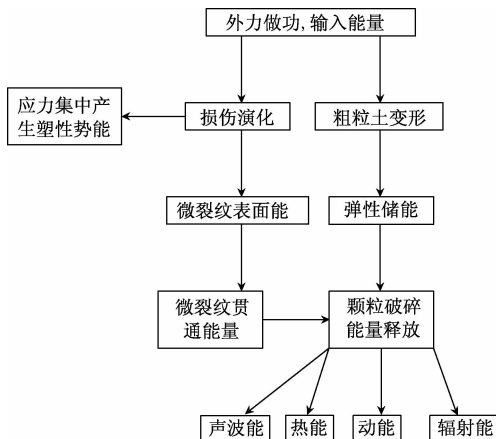


图2 粗颗粒剪切过程能量转换传递关系
Fig.2 Energy transfer relationship in coarse particle shearing process

外力做功输入总能量 U^0 ,一部分以弹性势能形式储存在颗粒内部(用 U^e 表示),另一部分发生应力集中产生塑性势能(U^m)。

$$U^0 = U^e + U^m \quad (2)$$

在应力空间下,总能量 U^0 可按式(3)计算:

$$U^0 = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 + \int_0^{\varepsilon_2} \sigma_2 d\varepsilon_2 + \int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (3)$$

弹性势能可按式(4)进行计算:

$$U^e = \frac{1}{2} \sigma_1 \varepsilon_1^e + \frac{1}{2} \sigma_2 \varepsilon_2^e + \frac{1}{2} \sigma_3 \varepsilon_3^e \quad (4)$$

式中: U^e ——单个颗粒弹性势能;

$\sigma_{i=1,2,3}$ ——应力;

$\varepsilon_{i=1,2,3}^e$ ——弹性应变。

塑性势能虽对于单个颗粒,其所占比例较小,却是产生塑性区域、引起颗粒圆度损伤的关键势能,不可忽略,按式(5)计算:

$$U^m = \int_v \sigma_j \varepsilon_j dv \quad (5)$$

式中: U^m ——塑性势能;

ε_j ——塑性应变;

σ_j ——塑性应力。

2 能量耗散下的圆度损伤演化分析

剪切系统从初始-应力峰值阶段,剪切带附近颗粒发生翻滚、错动、平动、破碎、挤压掉落等,顶部及底部颗粒无明显相对运动趋势,忽略不计。对于剪切系统圆度损伤区域主要集中于剪切带,在外力作用下,随剪切系统启动,粒间应力出现各向异性,颗粒产生运动致使颗粒表面棱角磨损圆度增大。

任意粗颗粒基于二维平面形状如图3所示,定义颗粒为 n 边形,按表面凸起棱角,可将颗粒二维表面划分为由 $n/2$ 个三角形构成。针对颗粒在剪切过程中,因颗粒内部塑性势能汇聚形成微裂纹,裂纹一旦贯通,由图3可知,颗粒初始棱角面积为定值,颗粒边界微裂纹贯通产生棱角磨损,颗粒棱角面积逐渐减小,当颗粒棱角逐渐磨损至近似于内切圆,总面积无限趋近于内切圆面积其圆度值最大。因能量沿最易路径传递,颗粒受粒间应力,塑性势能汇聚引起的微裂纹贯通先发生于颗粒边界,一旦颗粒中部微裂纹贯通颗粒产生核心区域破碎。颗粒在能量汇聚过程中,表面棱角逐渐被磨损,从而改变颗粒圆度,圆度在能量耗散、传递过程中损伤演化。定义粗颗粒圆度损伤因子 D_r ,棱角面积减少量 D ,初始面积为 D_0 。

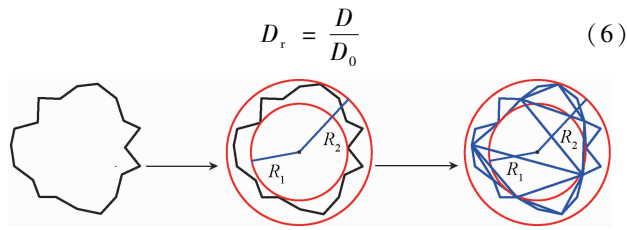


图 3 颗粒圆度损伤几何计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram showing geometric calculation of particle roundness damage

由式(6)可知,以 D 为自变量,针对实际剪切过程中,因剪切过程历时较短, $D_{\max}$ 无限趋近于 $\pi(R_2^2 - R_1^2)$,且 $D_{\max}$ 不会达到最大值。当颗粒初始圆度较大,颗粒轮廓外接圆无限趋近于内切圆。 $\lim_{R_1 \rightarrow R_2} \pi(R_2^2 - R_1^2) = 0$,颗粒所能被磨损的棱角数量减少,剪切过程中圆度损伤因子较小。

应力集中产生的塑性势能,主要贡献于颗粒边界处微裂纹贯通,导致颗粒磨损与颗粒核心区裂纹贯通,使颗粒大面积破碎。引起颗粒圆度损伤的塑性势能主要为棱角磨损部分能量,其值远小于使颗粒核心区破碎的塑性势能,这部分因圆度损伤所需消耗的能量与总塑性势能比值为圆度损伤因子 D_r 值。颗粒产生应力集中塑性势能为 U^m ,因圆度损伤单个颗粒所需能量为 U^f 。

$$U^f = U^m D_r \quad (7)$$

由式(5)可知,针对颗粒单体而言,剪切中塑性区不断贯通,塑性势能不断增大,圆度损伤宏观体现在粗颗粒表面微裂纹演化,致使颗粒在剪切过程中磨损,以磨屑形式从表面剥落。汇聚于颗粒棱角处的塑性势能用于棱角处微裂纹贯通,这部分能量为圆度损伤所需能量。一部分用于颗粒核心区附近微裂纹贯通,使颗粒大面积产生破碎。基于最小耗能原理(最小熵产生原理)^[22]颗粒破碎时,应力集中现象被释缓,单个颗粒任意时间 t 的颗粒破碎耗能率为:

$$\Phi = \iiint_v T \sum_{k=1}^n J_k X_k dv \quad (8)$$

式中: T, J_k, X_k ——微小单位体积在瞬时 t 的绝对温度、相对应的“流”、相对应的“力”。

颗粒核心区域主裂纹贯通,使颗粒大面积产生破碎所消耗的塑性势能用 U^s 表示,总耗能率为时间函数,对总耗能率积分得:

$$U^s = \int_0^t \left(\iiint_v T \sum_{k=1}^n J_k X_k dv \right) dt \quad (9)$$

根据式(7)~(9)可知,单个颗粒剪切过程中塑性势能 U^m 可表示为:

$$U^m = \int_0^t \left(\iiint_v T \sum_{k=1}^n J_k X_k dv \right) dt + U^m D_r \quad (10)$$

此时对于单个粗颗粒总能量可表示为:

$$\int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 + \int_0^{\varepsilon_2} \sigma_2 d\varepsilon_2 + \int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 d\varepsilon_3 = \frac{1}{2} \sigma_1 \varepsilon_1^e + \frac{1}{2} \sigma_2 \varepsilon_2^e + \frac{1}{2} \sigma_3 \varepsilon_3^e + \int_0^t \left(\iiint_v T \sum_{k=1}^n J_k X_k dv \right) dt + D_r \int_v \sigma_j \varepsilon_j dv \quad (11)$$

式(11)为单个颗粒圆度损伤因子的能量演化关系,单个颗粒受到总能量大部分转变为弹性势能,少部分转变为塑性势能,在粗颗粒中形成塑性区,剪切过程中塑性区发育,产生微裂纹,棱角处微裂纹贯通,棱角被磨损,圆度持续损伤演化,粗颗粒主裂纹贯通颗粒破碎。

将式(5)代入式(10)可建立基于能量耗散机制下圆度损伤模型:

$$D_r = 1 - \frac{\int_0^t \left(\iiint_v T \sum_{k=1}^n J_k X_k dv \right) dt}{\int_v \sigma_j \varepsilon_j dv} = \frac{D}{D_0} \quad (12)$$

3 损伤模型的试验研究

试验研究采用可视化剪切仪,选择初始圆度较小的花岗岩颗粒与圆度较大的鹅卵石颗粒进行试验,可根据磨圆度将其分为棱角型接触、圆型接触两类颗粒。为减小颗粒间及试样间尺寸效应影响,控制试验所用粗颗最大高度不超过剪切盒高度的 $1/20$ ^[23]。实验前对颗粒进行筛分试验,选用级配较好的颗粒组进行试验。剪切过程中,颗粒之间接触力、受力面积等发生改变,颗粒产生一定的转角和位移,尤其剪切带内颗粒表现明显。考虑到边界效应对试验结果的影响,剪切过程中,对颗粒剪切带核心区域粗颗粒进行标记,运用 image-pro 对剪切粗颗粒提取信息数据,探究粗颗粒剪切过程中圆度损伤与力学特性响应。开展法向应力分别为 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa 的室内试验,获得应力-位移统计表(表 1)。

表 1 峰值应力-位移统计

Table 1 Peak stress-displacement statistics

颗粒类型	花岗岩颗粒			卵石颗粒		
法向应力/kPa	100	200	300	100	200	300
峰值应力/kPa	109.9	196.3	282.6	73.8	130.3	188.4
对应位移/mm	9.5	12.7	12.8	7.0	9.0	10.5

通过整理试验数据得到不同颗粒类型下各组试样破坏时的库伦强度拟合直线,由室内试验得到数值拟合曲线,如图4所示。

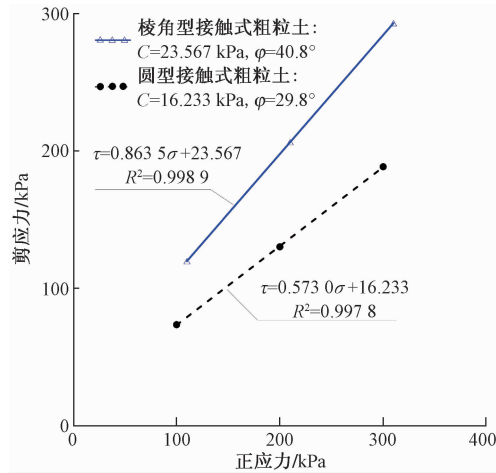


图4 两类粗粒土强度拟合直线

Fig. 4 Fitting of strength of two types of coarse-grained soil

通过强度特性剪切试验结果表明,棱角型接触式粗粒土强度参数值大于圆型,抗剪强度大。根据粗粒土剪切过程能量耗散关系,对于圆度较小的颗粒,剪切过程中对应颗粒转动动能、平动动能等发生改变。传递到颗粒内部积聚的塑性势能较大,剪切过程中,更易产生微裂纹及使颗粒产生磨损,增大颗粒圆度。根据式(12)圆度损伤模型可知,圆度损伤因子 D_r 值增大,导致所需圆度损伤能增大,圆度损伤所需能量的定量变化是影响粗粒土力学特性呈现差异性的根本因素。

根据圆度损伤模型,采用 MATLAB 对模型进行分析,根据试验结果花岗岩颗粒圆度较小,在试验过程中,其圆度损伤较大,观测效果更明显。同一直剪系统下,达到剪切峰值临界状态一定,粗粒土在剪切过程中满足热力学第一定律,基于能量耗散机制下相同法向应力的圆度损伤值无限趋近。针对花岗岩颗粒拟合三种法向应力下圆度损伤因子(D_r)、圆度损伤所需能量(U^f)、剪切位移(S)散点图如图5所示。在法向应力分别为 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa 下, $D_r = 1\%$, $D_r = 0.805\%$, $D_r = 0.374\%$ 时,散点图基于三维空间第一次出现拐点,此时对应的 $U^f = 0.035$, $S = 0.59$ 。 $U^f = 0.018$, $S = 0.25$, $U^f = 0.007$, $S = 0.18$ 。

花岗岩剪切过程圆度损伤基于 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa 下存在差异,圆度损伤随法向应力增大,与颗粒力学特性响应速度越快。如图5所示,剪切过程出现了2次较大拐点,用 T_1, T_2 表示。2次拐点对应的 U^f, D_r, S 如表2所示。

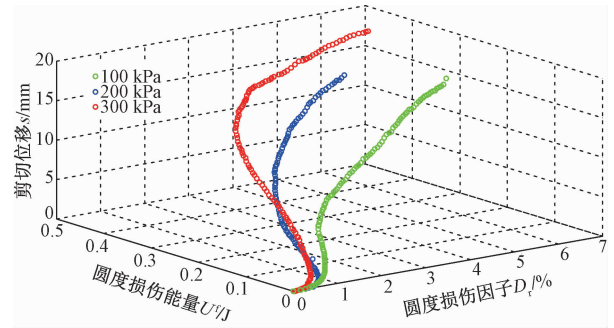


图5 圆度损伤因子与能量、剪切位移散点图

Fig. 5 Roundness damage and scatter plot of energy and shear displacement

表2 剪切过程圆度损伤拐点特征值统计

Table 2 Statistical value of inflection point of roundness damage in shearing process

拐点类型	T_1			T_2		
法向应力/kPa	100	200	300	100	200	300
圆度损伤因子 $D_r/\%$	1	0.805	0.374	3.808	4.99	5.06
圆度损伤所需能量 U^f/J	0.035	0.018	0.007	0.202	0.407	0.425
剪切位移/mm	0.59	0.25	0.18	9.5	12.68	12.82

由图5、表2可知,第一次圆度损伤过程出现拐点,随法向应力增大出现拐点延迟,此阶段为粗颗粒在试验条件下颗粒间应力急剧变化的结果,圆度损伤因子急剧增大宏观体现于剪切盒内颗粒所处状态的变化。随着剪切行为的持续,达到应力峰值,第二次出现拐点,传递到颗粒内部的弹塑性势能逐渐汇聚,塑性势能的产生使颗粒产生微裂纹。达到应力峰值时,单个颗粒塑性区发育,微裂纹贯通,塑性势能达到最大。当圆度增大后,颗粒棱角已被磨损,继续进行剪切,圆度损伤逐渐达到稳定状态。

法向应力对粗粒土圆度损伤具有一定影响^[24],主要原因为法向应力大小不同,对传递到颗粒内部应力大小存在差异,粒间应力大小的改变对粗粒土在试验过程中具有不同程度的束缚作用^[25],从而影响着粗粒土剪切过程中圆度损伤程度。如图6圆度损伤因子与圆度损伤所需能量所示。

100 kPa 下, $D_r = 6\%$ 时, $U^f = 0.239$ 且尚未趋于稳定。200 kPa 时, $D_r = 4.794\%$, $U^f = 0.405$ 。300 kPa 时, $D_r = 4.046\%$, $U^f = 0.407$ 。所需圆度损伤能量已趋于稳定。试验结果表明针对同一颗粒,达到峰值状态圆度损伤因子随法向应力增大而减小,所需的圆度损伤能增大。

将同一法向应力下,颗粒剪切过程圆度损伤过程

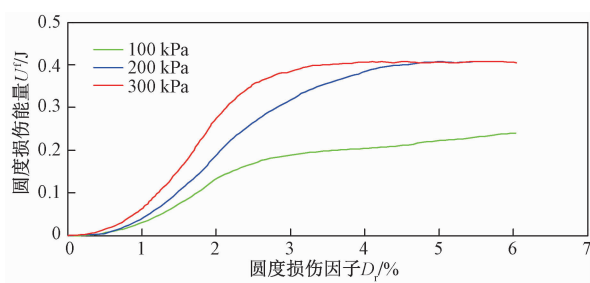


图6 圆度损伤与能量关系图

Fig. 6 Roundness damage and energy diagram

分为3个阶段。第一个阶段为圆度损伤响应阶段,即为第一次出现损伤拐点,此阶段粗颗粒圆度损伤对粒间应力的突然变化做出响应。第二个阶段为圆度损伤演化阶段,即到第二次出现拐点应力达到峰值时,此阶段粗颗粒塑性势能急剧增大,颗粒表面微裂纹持续演化,对应曲线变化较大。第三个阶段为圆度损伤稳定阶段,随着剪切持续进行,损伤因子增大,但损伤演化阶段峰值微裂纹已贯通,塑性势能大部分以颗粒表面能用于裂纹贯通,形成新的颗粒表面,在剪切未结束前颗粒继续错动、翻滚、平动等运动,不断磨损,损伤因子继续增大。

4 结论

(1) 圆度不同的颗粒(花岗岩、卵石)随圆度减小,传递到颗粒内部积聚的塑性势能增大,更易在颗粒边界棱角处产生微裂纹使颗粒磨损,增大颗粒圆度,其强度特性减小。

(2) 粗粒土剪切过程中,颗粒圆度损伤因子改变导致圆度所需能量变化,形成圆度损伤的持续演化。圆度损伤演化过程存在2次损伤拐点,可将损伤过程分为:圆度损伤响应、圆度损伤演化、圆度损伤稳定三个阶段。

(3) 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,颗粒圆度损伤因子减小,达到损伤稳定阶段所需能量增大。

参考文献:

- [1] 赵澄林,朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 3版. 北京: 石油工业出版社, 2001: 51-53. [ZHAO C L, ZHU X M. Sedimentary Petrology [M]. 3rd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 51-53. (in Chinese)]
- [2] WENTWORTH C K. A laboratory and field study of cobble abrasion [J]. Journal of Geology, 1919, 27 (7): 507-521.

- [3] CHERIF TAIBA A, MAHMOUDI Y, BELKHATIR M, *et al.* Experimental investigation into the influence of roundness and sphericity on the undrained shear response of silty sand soils [J]. Geotechnical Testing Journal, 2018, 41 (3): 619-633.
- [4] GHALEHJOUGH BABAK, KARIMI, AKBULUT SUAT, CELIK SEMET. Experimental and numerical investigation on bearing capacity of granular soil affected by particle roundness [J]. Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 2017, 40 (10): 2137-2145.
- [5] ARUN P RAJ, AVNEESH KUMAR RAVI P B DHANISH. Factors influencing the performance of a roundness measuring instrument-development of an empirical model [J]. Measurement, 2019, 131: 193-203.
- [6] VEPRASKAS M J, CASSEL D K. Sphericity and roundness of sand in coastal plain soils and relationships with soil physical properties [J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51 (5): 1108-1112.
- [7] ZHENG J, HRYCIW R D. Traditional soil particle sphericity, roundness and surface roughness by computational geometry [J]. Geotechnique, 2015, 65 (6): 494-506.
- [8] ZHENG JUNXING, HRYCIW ROMAN D. Roundness and sphericity of soil particles in assemblies by computational geometry [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2016, 30 (6): 04016021-1-04016021-13.
- [9] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (17): 3003-3010. [XIE H P, JU Y, LI L Y. Rock strength and overall failure criterion based on energy dissipation and release principle [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (17): 3003-3010. (in Chinese)]
- [10] 李子运, 吴光, 黄天柱, 等. 三轴循环荷载作用下页岩能量演化规律及强度失效判据研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37 (3): 662-670. [LI Z Y, WU G, HUANG T Z, *et al.* Study on shale energy evolution law and strength failure criterion under triaxial cyclic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37 (3): 662-670. (in Chinese)]
- [11] 赵忠虎, 谢和平. 岩石变形破坏过程中的能量传递和耗散研究 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2008 (2): 26-31. [ZHAO Z H, XIE H P. Study on

- energy transfer and dissipation in rock deformation and failure process [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008 (2): 26 – 31. (in Chinese)]
- [12] 贾逸,魏良帅,黄安邦,等. 高应力区岩石统计损伤本构模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46 (2): 118 – 124. [JIA Y, WEI L S, HUANG A B, *et al.* Study on statistical damage constitutive model of rock in high stress area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46 (2): 118 – 124. (in Chinese)]
- [13] 冯小东,刘高. 不同含水状态砂岩分级循环荷载试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44 (1): 110 – 115. [FENG X D, LIU G. An experimental study of cyclic loading of sandstone under different water contents [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44 (1): 110 – 115. (in Chinese)]
- [14] 陈中一,徐金明,刘芳. 花岗岩中多条裂隙的萌生扩展过程研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42 (5): 96 – 101. [CHEN Z Y, XU J M, LIU F. Study on the initiation and propagation process of multiple fractures in granite [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42 (5): 96 – 101. (in Chinese)]
- [15] SAURER E, PUZZIN A M. Validation of the energy-balance approach to curve-shaped shear-band propagation in soil [J]. Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2011, 467 (2127): 627 – 652.
- [16] 叶加兵,张家发,邹维列. 颗粒形状对碎石料孔隙特性影响研究[J]. 岩土力学, 2018, 39 (12): 4457 – 4467. [YE J B, ZHANG J F, ZOU W L. Study on the effect of particle shape on the pore characteristics of crushed stone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39 (12): 4457 – 4467. (in Chinese)]
- [17] 罗岚,夏唐代,仇浩森. K_0 条件下颗粒形状特征对砂土剪切模量的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39 (10): 3695 – 3702. [LUO L, XIA T D, QIU H M. Effect of particle shape characteristics on shear modulus of sand under K_0 condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39 (10): 3695 – 3702. (in Chinese)]
- [18] 杨晴雯,裴向军,吴梦秋,等. 不同加固技术在散粒体斜坡表层的应用对比研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46 (1): 139 – 147. [YANG Q W, PEI X J, WU M Q, *et al.* Comparative study on the application of different reinforcement techniques in the surface layer of granular slopes [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46 (1): 139 – 147. (in Chinese)]
- [19] 秦允豪. 热学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2011: 189 – 304. [QIN Y H. Thermal. [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2011: 189 – 304. (in Chinese)]
- [20] 王伟. 基于能量耗散原理的土与结构接触面模型研究及应用[D]. 南京: 河海大学, 2006: 53 – 121. [WANG W. Study on soil-structure interface model based on potential energy dissipating principle and its application [D]. Nanjing: Hohai University, 2006: 53 – 121. (in Chinese)]
- [21] 腾保华,吴明和. 大学物理学(上册)[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2017: 3 – 25. [TENG B H, WU M H. University Physics (Volume 1) [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2017: 3 – 25. (in Chinese)]
- [22] 周筑宝,唐松花. 基于最小耗能原理的岩石破坏理论与岩爆研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 25 – 58. [ZHOU Z B, TANG S H. Rock failure theory and rockburst research based on the principle of minimum energy consumption [M]. Beijing: Science Press, 2017: 25 – 58. (in Chinese)]
- [23] 谭彩,王琛,吴勇,等. 无黏性粗粒土直接剪切试验的强度尺寸效应[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48 (增刊 1): 94 – 99. [TAN C, WANG C, WU Y, *et al.* Intensity size effect of direct shear test of non-viscous coarse grain soil [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48 (Sup 1): 94 – 99. (in Chinese)]
- [24] 郑永来,邓树新,李文岫,等. 中主应力对散粒体材料强度和变形影响的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34 (增刊 1): 3389 – 3396. [ZHENG Y L, DENG S X, LI W X, *et al.* Middle principal stress on granular material numerical simulation study on the effects of strength and deformation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (Sup 1): 3389 – 3396. (in Chinese)]
- [25] 王子寒,王鹏举,景晓昆,等. 粗粒土颗粒接触强度特性及细观接触模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37 (8): 1980 – 1992. [WANG Z H, WANG P J, JING X K, *et al.* A study on inter-particle contact behaviors and micro contact models of coarse-grained soil [J]. Chinese Journal Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37 (8): 1980 – 1992. (in Chinese)]