

剪切过程中钙质砂的颗粒破碎与能量演化*

高雪¹, 高燕^{1,2}, 孙可天¹, 史天根¹

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082

摘要: 颗粒破碎是影响钙质砂宏观力学变形特征的重要因素, 亦会导致微观上的能量耗散机制发生改变。为研究剪切过程中钙质砂的颗粒破碎与能量演化的关系, 本文基于 PFC^{2D} 软件, 建立考虑了颗粒破碎的钙质砂离散元模型进行剪切试验模拟, 阐释剪切过程中钙质砂的颗粒破碎与能量演化的关系。结果表明, 在整个剪切过程中钙质砂颗粒持续破碎, 但随着剪切的进行产生同样的破碎将需要更大的输入功, 颗粒破碎逐渐集中于剪切带内, 破碎率的增加会分散颗粒破碎带的集中程度。摩擦耗能在整个剪切过程中起主要作用, 颗粒破碎不仅影响应变能的积累, 亦对摩擦耗能的分布产生影响, 低破碎率钙质砂摩擦能主要由剪切带内颗粒重排产生, 高破碎率钙质砂颗粒破碎产生子颗粒的运动提供了摩擦耗散。能量的变化亦与宏观应力应变的发展相对应, 破碎能量的增加使得应变能减少, 颗粒运动跃迁的能量减少, 最终密砂的剪切响应向松砂转变。

关键词: 钙质砂; 离散元; 能量耗散; 颗粒破碎; 剪切带

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2023)06-0011-11

Particle breakage and energy evolution of calcareous sands during shearing process

GAO Xue¹, GAO Yan^{1,2}, SUN Ketian¹, SHI Tiangen¹

1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China

Abstract: Particle breakage affects the macro-mechanical properties of calcareous sand and also changes the mechanism of energy dissipation at the micro-scale. To explore the relationship between particle breakage and energy evolution of calcareous sand during shearing, PFC^{2D} simulations of shearing tests of calcareous sand were performed considering particle breakage. The results show that: 1) Particles continually break during the entire shearing process. With the progress of shearing, the same crushing requires more input work and the particle crushing makes the shear band disperse. 2) The friction energy dissipation plays an important role in the whole shearing process. Particle breakage not only affects the accumulation of strain energy but also influences the distribution of friction energy consumption. 3) The friction energy of calcareous sand with a low crushing rate is mainly produced by particle rearrangement in the shear band, while the friction dissipation of calcareous sand with a high crushing rate is more attributed to the movement of sub-particles produced by the breakage. 4) The change of energy also corresponds to the macroscopic development of stress and strain. With the increase of breakage dissipation, the strain energy decreases, and the energy of particle transition also decreases,

* 收稿日期: 2023-04-03

录用日期: 2023-04-24

网络首发日期: 2023-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(42072295, 41807244); 广东省创新创业团队项目(2017ZT07Z066)

作者简介: 高雪(1998年生), 女; 研究方向: 钙质砂颗粒破碎; E-mail: gaoux76@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 高燕(1984年生), 女; 研究方向: 土的宏微观结构性、智能监测; E-mail: gaoyan25@mail.sysu.edu.cn

which finally leads to the shear response of dense sand changing to that of loose sand.

Key words: calcareous sand; DEM; energy dissipation; particle breakage; shear band

钙质砂作为一种生物成因的海源砂,其碳酸钙含量超过 90%,在我国南海诸岛广泛分布。相比硅质砂,钙质砂具有多棱角、颗粒形状极不规则、疏松多孔、易破碎、易压缩等特性(张家铭等, 2005; 陈海洋等, 2005; 吴京平等, 1997; 汪轶群等, 2018; 孙吉主和汪稔, 2003)。近年来我国在南海进行了大量的吹填岛礁工程,其工程建设采取因地制宜、就地取材的方针,岛礁建设吹填部分以珊瑚钙质砂为主(叶剑红等, 2019; 高燕等, 2022),由于钙质砂颗粒的破碎性导致其工程力学性质与经典土力学不符,因此研究钙质砂的破碎性具有重要的工程意义。

我国对于钙质砂的试验研究主要是从 20 世纪 70 年代末开始,有学者对钙质砂颗粒形状及内孔隙进行了研究(吴京平和楼志刚, 1994; 陈海洋等, 2005; 朱长歧等, 2014); 国内外学者对钙质砂开展了大量的室内试验,主要有直剪试验、三轴试验、压缩试验、循环剪切试验等(孙吉主和汪稔, 2003; Georgoutsos et al., 2004; 张家铭, 2008; Donohue et al., 2009; Shahnazari and Rezvani, 2013; 毛炎炎等, 2017; 何建乔等, 2018, 王刚等, 2019, 王伟光, 2020),分析钙质砂的颗粒破碎对其抗剪强度及受力变形特性的影响。然而现有试验手段很难在试验过程中同时获得接触力与颗粒运动信息、跟踪颗粒破碎所耗散的能量,因此,离散元(DEM)数值模拟成为了进一步开展微观力学机制研究的重要手段(Cundall and Strack, 1979; 王伟光, 2020)。

使用 DEM 进行颗粒破碎的数值模拟主要有 2 种方法:一是确定破坏准则,当颗粒达到破坏条件时采用多个子颗粒替代母颗粒的方法(Lobo-Guerrero and Vallejo, 2005),但是该方法在替换颗粒过程中,质量很难守恒,颗粒间的重叠亦会导致接触力过大,与真实情况不符(刘苏, 2018);另一种是由接触黏结形成可破碎的团粒(Russell, 2009),该方法可以生成较复杂形状的颗粒,并且更利于模拟颗粒破碎的演化过程,但该方法计算过程更为繁琐,模拟颗粒数较多的情况时需花费

大量时间。Cheng et al.(2003)利用 PFC^{3D}对可破碎团粒进行了不同应力路径下的三轴试验数值模拟,表明颗粒破碎对砂土硬化以及体积压缩有重要影响。Lobo-Guerrero(2006)通过 PFC^{2D}对比可破碎材料与不可破碎材料,认识到颗粒破碎可导致永久的变形。Bolton et al.(2008)对可破碎颗粒与不可破碎颗粒混合试样进行三轴仿真试验,发现了颗粒主要有 3 种破碎方式。Wang et al.(2012, 2013)和周博等(2014)分别通过三维与二维数值模型详细研究了可破碎砂土在剪切过程中颗粒破碎对能量耗散分配机制的影响,对比了小应变与临界状态下不同能量分量的演化差异。张家铭等(2015)用接触黏结模型连接的二维团簇粒模拟钙质砂颗粒,分析了沉桩过程中的颗粒破碎。张科芬等(2017)开展了不同破碎程度的颗粒材料的数值模拟,并与室内试验结果进行对比,揭示了颗粒破碎对于试样各向异性与级配演化的作用。王刚等(2021)建立了钙质砂离散元数值模型,并对其进行不破碎三轴剪切过程的数值试验,以分析颗粒破碎对钙质砂临界状态的级配演化的影响。

目前,国内外关于颗粒破碎数值模拟方面的研究已经比较成熟,但研究颗粒破碎与其系统内部能量耗散特性的联系却较少提及。Wang et al.(2012, 2013)和周博等(2014)分析了能量耗散机制,但其认为砂土破碎演化中输入功主要通过摩擦耗散,颗粒破碎本身只耗散了极小一部分能量。而在钙质砂试验过程中颗粒破碎本身会引起能量耗散,汪轶群等(2018)基于三轴试验结果,分析了颗粒破碎对能量耗散等特性的影响,得出低围压情况下,颗粒破碎耗散能量不超过输入功的 5%,而高围压情况下,只考虑摩擦耗散与同时考虑摩擦耗散与体积耗散,破碎耗能分别最大可达总输入功的 25%和 18%。因此,颗粒破碎本身所耗散的能量不可忽视。在前人研究的基础上,本文基于 PFC^{2D}软件,结合了 Hertz 接触模型和平行黏结模型,建立钙质砂的离散元模型进行剪切试验的数值模拟,并分析剪切过程中颗粒破碎与能量演化的关系。

1 考虑颗粒破碎的离散元数值模型建立

本文采用离散元软件 PFC^{2D} version 4.0 (particle flow code, 美国 Itasca 公司), 模拟了 200 kPa 围压下初始孔隙率为 0.1 (密砂) 状态下的钙质砂剪切过程 (陈庆等, 2021)。模型为长方形试样, 尺寸为 8 cm × 4 cm。颗粒的初始粒径范围为 1~2 mm, 粒径分布符合真实砂土的粒径分布规律 (蒋明镜, 2019; Kuhn and Bagi, 2009), 如图 1 所示。颗粒间的接触模型采用 Hertz-Mindlin 非线性接触模型, 其剪切模量 $G=3 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu=0.2$ 。颗粒破碎是影响钙质砂宏-微观特性的重要因素, 为了更真实

地反映剪切过程中钙质砂的颗粒破碎特征, 本文接触模型中加入了平行黏结模型, 平行黏结模型将两个颗粒通过一定宽度的胶结键黏结成簇, 平行键可以承担一定的剪力、拉力以及弯矩作用 (Itasca, 2008)。本文参考周博 (2014) 的离散元模型, 综合考虑了颗粒内部不均匀性和初始应变能, 钙质砂试样的离散元模型生成流程如图 2 所示。

在平行接触模型中, 子颗粒接触点的法向、切向强度以及黏结键的宽度都会影响到试样的整体强度 (Wang and Yan, 2012), 因此为了得到合理的数值模拟参数, 本文进行单颗粒压碎模拟, 最终选取了 2 组典型的应力-位移曲线 (图 3), 相应的平行黏结模型选用的强度为 3×10^6 和 $5 \times 10^6 \text{ N/m}$,

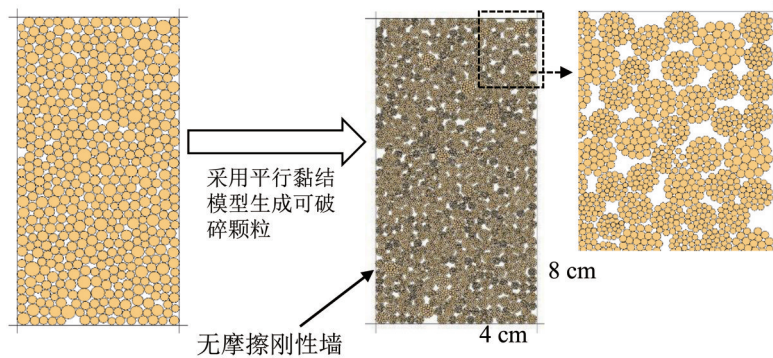


图 1 离散元模型基本示意图

Fig. 1 Basic schematic diagram of the discrete element model

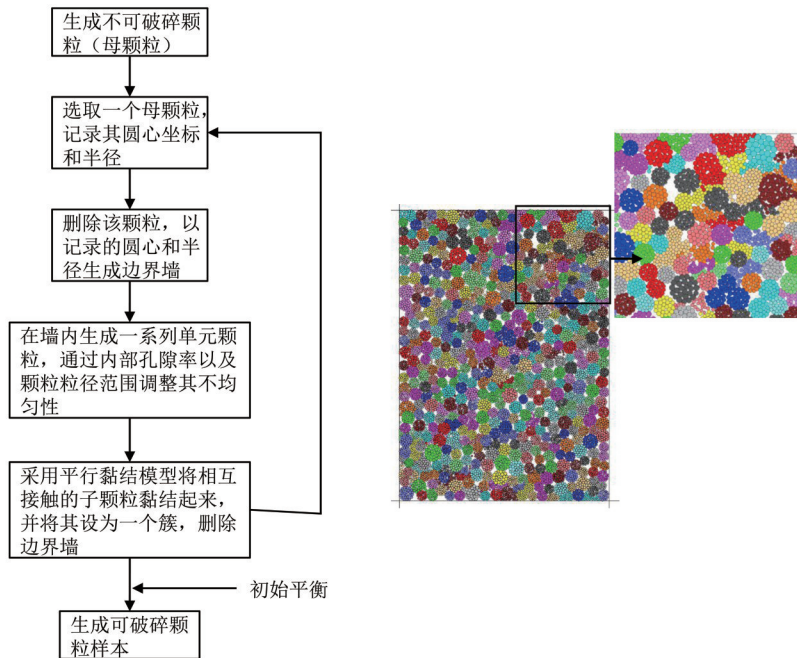


图 2 离散元可破碎颗粒生成流程图

Fig. 2 Flow chart of generation for DEM in crushable particle

分别对应高破碎性与低破碎性钙质砂颗粒。剪切过程中,赋予上、下墙一定的速度对试样进行剪切,达到设定的20%轴向应变(ε)后模拟结束。同时计算过程中通过PFC内置的solve命令使得平均不平衡力与平均接触力之比维持在一个较低的值,从而使试样始终保持准静态平衡条件(Kuhn and Bagi, 2009)。数值模拟中的各参数取值见表1。

破碎率是衡量颗粒破碎程度的重要指标,本文通过试样中颗粒平行粘结键断裂的数目来描述颗粒破碎的情况,破碎率(B_r)定义为颗粒内黏结键断裂数与剪切初始平行黏结键总数目的比值

$$B_r = N_{br} / N_{pb0},$$

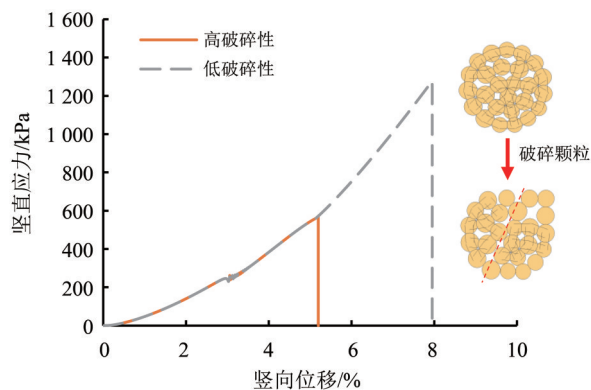


图3 单颗粒压碎模拟结果

Fig. 3 The results of single-particle compression by DEM simulations

式中 N_{br} 为颗粒内黏结键断裂数, N_{pb0} 为剪切初始平行黏结键总数目。

2 能量表征参数及其计算方法

双轴试验的目的是了解能量在数值模型中是如何应用、存储和消散的。本文中颗粒系统的能量通过6种相互独立的能量分量组成,即,边界功、摩擦功(能量耗散)、动能、应变能、阻尼能和破碎能,研究钙质砂剪切过程中颗粒破碎、能量演化与宏观变形的关系。鉴于本文剪切过程为准静态发展,因此不考虑动能的变化。边界功 E_w 是作用于土样边界的总功,表示为

$$E_w = \sum_{t=0}^t \sum_{i=1}^{N_w} (F_i^t \Delta U_i^t + M_i^t \Delta \theta_i^t), \quad (1)$$

式中 N_w 为边界墙的数量, t 为剪切持续的时间, F_i^t 、 M_i^t 为边界墙受到的力与力矩, ΔU_i^t 、 $\Delta \theta_i^t$ 为边界墙的位移与旋转角度, E_w 既可以为正,也可以为负,一般默认为正功。

摩擦能 E_f 为所有颗粒接触处由于摩擦滑动耗散的能量,

$$E_f = \sum_{t=0}^t \sum_{i=1}^{N_c} (F_i^{s,t} (\Delta U_i^{s,t})^{slip}), \quad (2)$$

式中 N_c 是接触数, $(\Delta U_i^{s,t})^{slip}$ 是滑移位移的增量, $F_i^{s,t}$ 是每个时间步在颗粒接触处的最大剪切力(即剪切阻力);切向总位移增量分解为滑移部分

表1 双轴模型基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of biaxial model

参数/模型	模型参数	参数值
试样基本参数	颗粒密度 $\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 790
	粒径 / mm	1.0~2.0
	初始颗粒数	547
	可破碎颗粒数	14 196
	孔隙率	0.10
	阻尼系数	0.1
Hertz-Mindlin 接触模型	颗粒间摩擦系数	0.50
	泊松比 ν	0.20
	剪切模量 G / GPa	3.00
平行黏结模型	法向/切向黏结刚度 $(k_n/k_s) / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1×10^{12}
	法向/切向黏结强度 $/ (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	$3 \times 10^6, 5 \times 10^6$
	平行黏结键半径比	0.5
墙基本参数	刚度 $/ (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1×10^8
	颗粒与墙摩擦系数	0

$(\Delta U_i^s)^{\text{slip}}$ 和弹性部分 $(\Delta U_i^s)^{\text{elas}}$,

$$(\Delta U_i^s)^{\text{slip}} = \Delta U_i^s - (\Delta U_i^s)^{\text{elas}}. \quad (3)$$

应变能 E_s 是存储在试样中所有接触的能量,

$$E_s = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_s} \left(\frac{|F_i^{n,t}|^2}{k_n^t} + \frac{|F_i^{s,t}|^2}{k_s^t} \right), \quad (4)$$

其中, 在非线性的 Hertz-Mindlin 模型中, k_n 和 k_s 由构成颗粒材料的剪切模量 G 、泊松比 ν 、颗粒半径 \tilde{R} 和颗粒重叠量 U^n 决定,

$$k_n = \left(\frac{2\langle G \rangle \sqrt{2\tilde{R}}}{3(1-\langle \nu \rangle)} \right) \sqrt{U^n}, \quad (5)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N_{pb}} \sum_{j=1}^{N_{pb}} \left(\frac{|\bar{F}_i^{n,t}|^2}{\bar{k}_n^t} + \frac{|\bar{F}_i^{s,t}|^2}{\bar{k}_s^t} + \frac{\bar{M}_3^2}{\sqrt{|\bar{k}_n^t|^2 + |\bar{k}_s^t|^2}} \right) \sqrt{\left(\frac{2r_{pb}r_1r_2}{r_1+r_2} \right)}, \quad (8)$$

式中 N_{pb} 为平行黏结断裂个数, r_{pb} 为平行黏结半径比, r_1 、 r_2 为颗粒半径, $\bar{F}_i^{n,t}$ 、 $\bar{F}_i^{s,t}$ 、 \bar{M}_3 分别为法向、切向黏结力与力矩, \bar{k}_n^t 、 \bar{k}_s^t 为法向、切向黏结刚度。

根据能量守恒定律有,

$$E_w = E_f + E_s + E_p + E_d.$$

3 钙质砂的剪切特性与能量演化特征

对钙质砂剪切试验的数值模拟分为高破碎率密砂(DH)和低破碎率密砂(DL)模拟。

3.1 应力-应变特征与颗粒破碎

钙质砂剪切数值模拟结果如图4所示。DL钙质砂的应力应变曲线和体积应变曲线分别表现出应变软化以及先剪缩后剪胀的密实砂土剪切的典型特征, DH试样的体积应变始终呈现剪缩的趋势。

剪切过程中颗粒破碎率的变化, 随着剪切的进行, 颗粒破碎程度增加, 即使在临界状态下颗粒仍在发生破碎, 这与试验结果相符合(图5)。DH试样的破碎程度远大于DL试样, 二者的破碎速率在剪切后期都呈现出降低的趋势, 颗粒破碎率增长的斜率明显降低, 即说明随着剪切的进行, 需要更大的能量输入才能继续产生颗粒破碎, 表明剪切的不同阶段颗粒破碎的模式可能不同。随着颗粒破碎率的增加, 钙质砂的峰值应力降低, 应力应变曲线逐渐由应变软化向应变硬化转变,

$$k_s = \left(\frac{2(\langle G \rangle)^2 3(1-\langle \nu \rangle) \tilde{R}}{2-\langle \nu \rangle} \right)^{\frac{1}{3}} |F_i^n|^{\frac{1}{3}}. \quad (6)$$

对于阻尼耗散, 采用适合准静态模拟的局部非粘性阻尼器模型, 阻尼能 E_d 是通过阻尼器耗散的能量,

$$E_d = \sum_{i=0}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_p} (\alpha F_i^p \Delta U_i^p + M_i^p \Delta \theta_i^p), \quad (7)$$

式中 α 为阻尼系数, F_i^p 、 M_i^p 为单个颗粒的不平衡力和力矩, ΔU_i^p 、 $\Delta \theta_i^p$ 为单颗粒的位移与旋转。

当平行黏结断裂时, 储存在平行黏结中的弹性应变能会被释放出来, 这部分能量损失被视为破碎耗能 E_p ,

但临界状态下的残余应力却很相近。由于剪切过程中颗粒持续破碎产生细颗粒填充到试样原有的孔隙中, 导致试样的剪胀性降低, 体积应变由剪胀逐渐倾向于剪缩。颗粒破碎抑制了“剪胀”的发生, 对试样的体积变化产生了较大影响, 同时亦会降低峰值强度。

剪切过程中颗粒破碎的位置与剪切带的位置密切相关, 如图6所示。可以看出, 随着轴向应变的增加, 颗粒破碎的位置逐渐集中, 试样达到临界状态后逐渐出现局部的颗粒破碎带, 并与剪切带位置一致。并且随着破碎率的升高, 颗粒总体

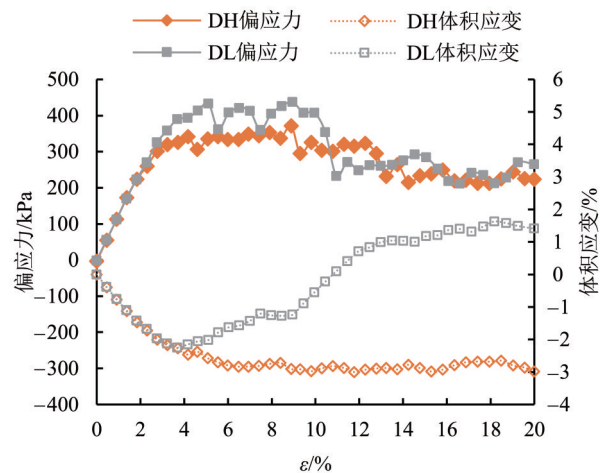


图4 密实钙质砂剪切过程中应力-应变与体积应变曲线
Fig. 4 The stress-strain response and volumetric strain response during shearing process of dense calcareous sands

破碎程度增大, 颗粒破碎带的分布也更宽更广, 使得颗粒破碎带(剪切带)集中性减小。更加印证了颗粒破碎使得变形增加, 颗粒破碎集中在变形集中的剪切带, 颗粒破碎的增加(从低破碎率到高破碎率), 使得土样压缩变形增加, 体积趋于减小, 宏观应力应变响应也从密砂响应趋向于松砂响应。

3.2 能量演化

下面主要分析钙质砂剪切过程中的能量演化。由于采用伺服机制保持围压, 整个剪切过程都是准静态加载, 动能较小相较于其他能量可忽略不计。图7是两种破碎率的密砂不同能量分量关于轴应变变化曲线。由于剪切加载方式为应变控制式, 整个剪切过程中边界功的输入变化都非常均匀, 且2个试样总输入功基本一致。剪切初始能量以 E_s

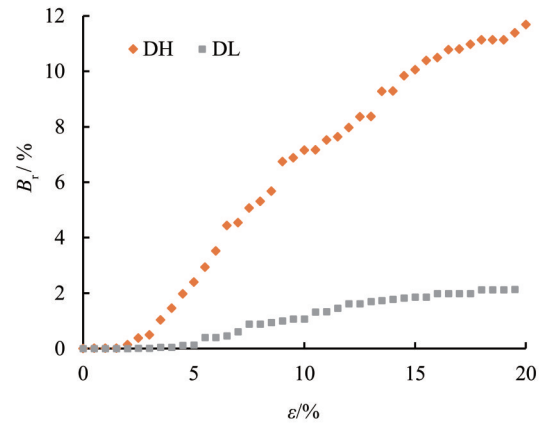


图5 颗粒破碎随剪切变形的演化规律
(以平行键破坏率为颗粒破碎表征)

Fig. 5 Evolution of particle breakage with shear deformation
(characterization of crushable by parallel bond broken rate)

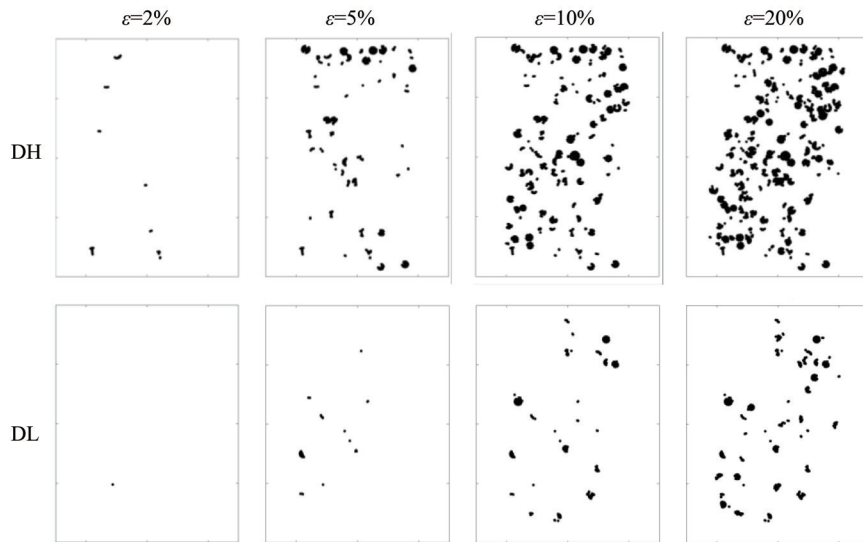


图6 不同颗粒破碎率的颗粒破碎位置分布图

Fig. 6 Distribution of particle breakage locations for different crushing rates

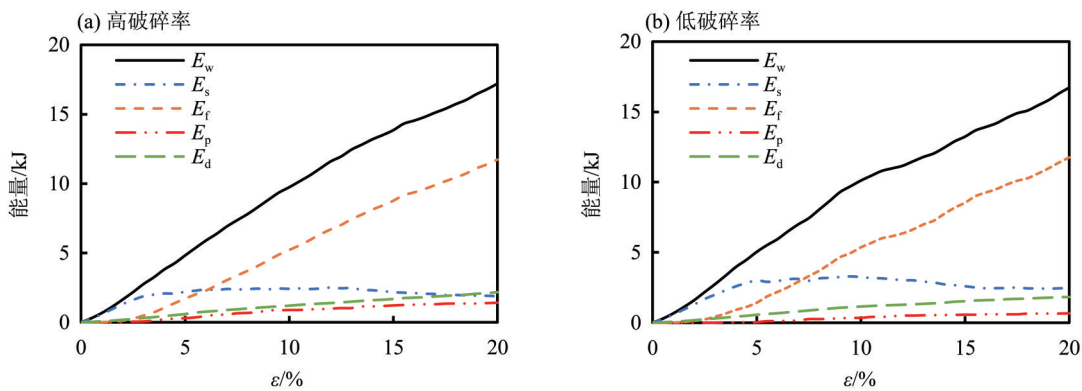


图7 试样能量累积曲线

Fig. 7 Energy accumulation curve

的形式储存在颗粒接触中。随着剪切的进行, 后期的输入功主要由颗粒间的摩擦耗散, E_f 在整个剪切过程中起主要作用。对于高、低破碎率钙质砂剪切过程中的能量分配, 可见, DH 钙质砂的破碎能量明显高于 DL 钙质砂, E_p 的增加使得 E_s 减小与 E_d 增大。整个过程能量始终守恒。

图8为相同能量分量在不同破碎率试样剪切过程中对比曲线, 更直观地对比不同破碎率钙质砂在剪切过程中能量耗散项演化的差异。两个试样 E_f 总耗散值基本一致(图8(a)), 能量值的差异主要体现在 E_s 、 E_p 与 E_d 等3个分量上。颗粒破碎影响

了应变的积累, 因此 DH 试样 E_s 积累峰值会低于 DL(图8(b)), 其值的降低也与应变硬化相对应。而尽管 DH 试样的 E_p 值大于 DL 试样(图8(c)), 但对比其最终破碎率的比值(DH破碎率为 DL 的 5.15 倍), 其 E_p 最终值的比值为 2.11, 说明随着破碎率的降低, 单颗粒强度的增加, 颗粒破碎本身所耗散的能量也会随之增大, 使得低破碎率下 E_p 的降低与破碎率降低的值不一致。此外由于颗粒破碎瞬间会使得动能波动, DH 试样 E_d 值亦会大于 DL 试样(图8(d))。

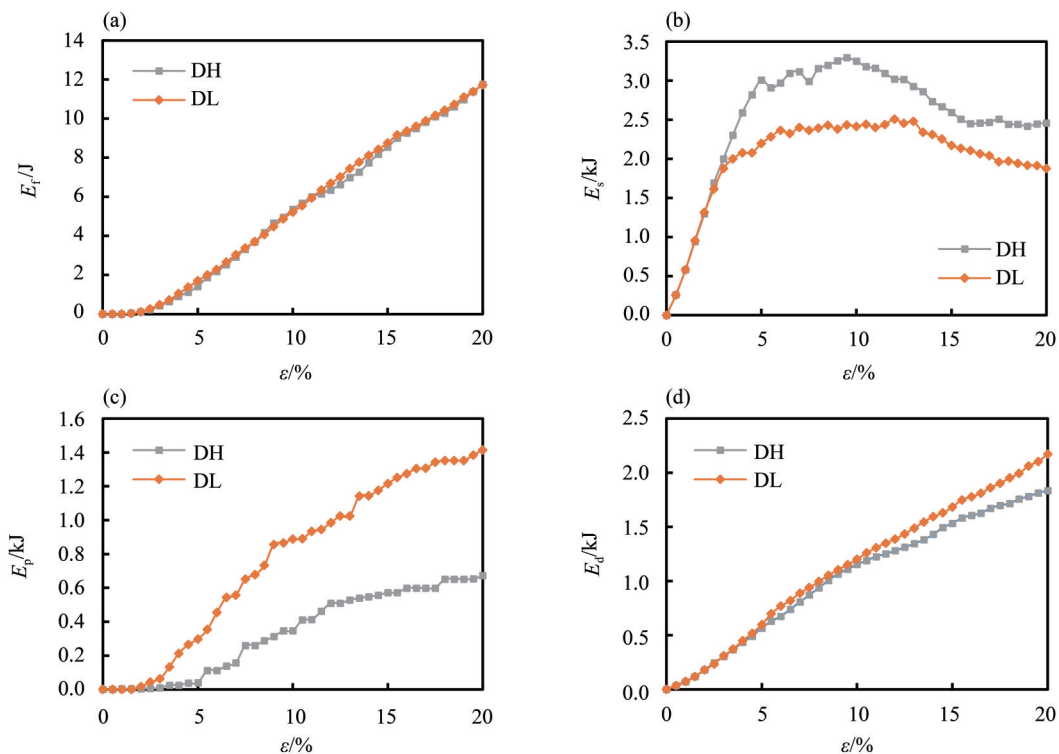


图8 不同破碎率能量累计值对比曲线

Fig. 8 Comparison between the cumulative energy value of samples with different crushing rates

增量能量比能够更直观表征剪切过程中不同阶段的能量输入/耗散变化行为。增量能量比为增量能量分量输入/耗散项, 即 dE_f/dE_w 、 dE_s/dE_w 、 dE_p/dE_w 和 dE_d/dE_w 。在剪切的任何阶段, 能量遵循输入与输出守恒, 即

$$dE_w = dE_s + dE_f + dE_p + dE_d$$

可转化为

$$\frac{dE_f}{dE_w} + \frac{dE_s}{dE_w} + \frac{dE_p}{dE_w} + \frac{dE_d}{dE_w} = 1.$$

图9为不同破碎率的4个主要的能量组成的增量与外界功增量的比值随轴向应变增加的演化过

程。从整体看, 4个分量能量增量比的总和在任何时刻 ≈ 1 , 满足能量守恒。摩擦耗能增量比 dE_f/dE_w 与应变能增量比 dE_s/dE_w 的主要变化均发生在5%的轴向应变(峰值应力)之前。随着剪切进行 dE_f/dE_w 逐渐增加, dE_s/dE_w 逐渐减小。当试样达到临界阶段后, 这两部分能量增量也基本达到稳定状态。与之相反, 破碎耗能增量 dE_p/dE_w 与阻尼耗能 dE_d/dE_w 在达到峰值应力前变化十分稳定, 到达临界状态后则开始发生波动, 表明显著的颗粒破碎从峰值应力开始, 与图5颗粒破碎率结果一致。

在剪切初始, $dE_s/dE_w \approx 0.9$, $dE_f/dE_w \approx 0$ (图9(a),

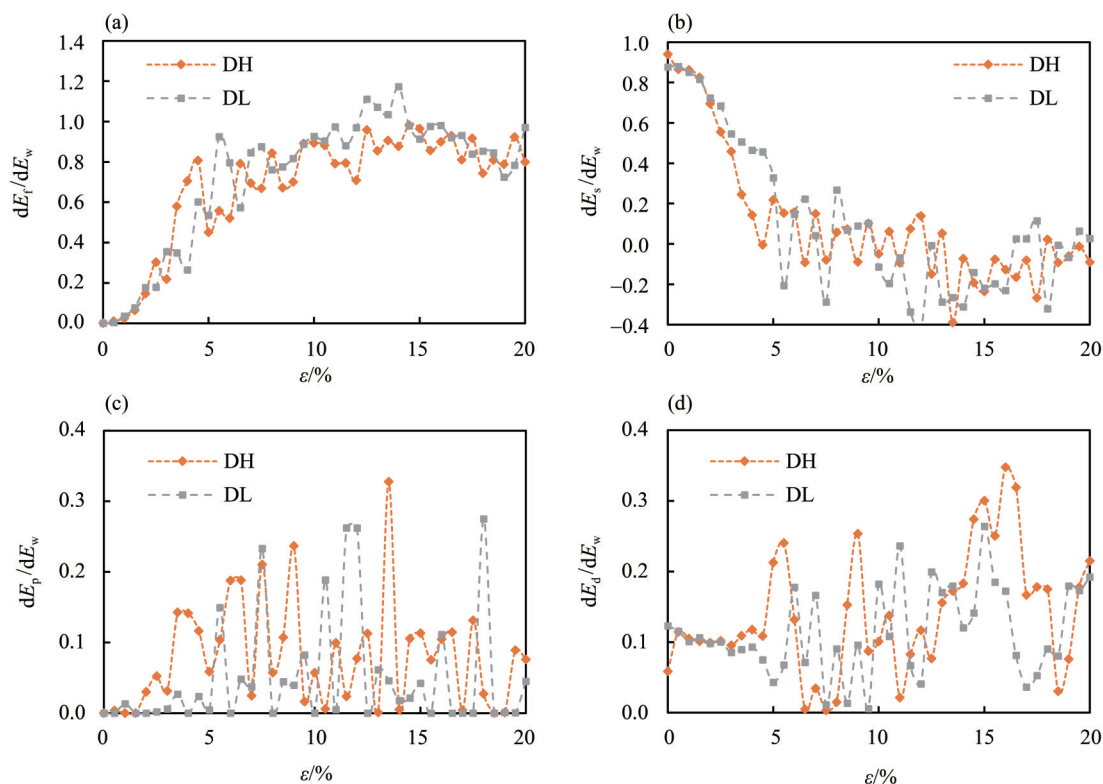


图9 各部分增量能量比与轴向应变的关系

Fig. 9 Relationship of the incremental energy components vs. axial strain

b))。这是因为剪切初期应力较小, 密砂试样处在压密阶段, 颗粒还未开始发生破碎, 由于颗粒接触处的弹性压缩, 输入功起始主要转变为 E_s 储存在颗粒接触中, 初始 $dE_p/dE_w \approx 0$ (图9(c))。 dE_d/dE_w 占比约0.1(图9(d)), 这是因为为避免阻尼耗能过大掩盖摩擦耗散所起到的作用, 局部阻尼系数设置了一个较低的值(0.1)。

随着剪切的进行, dE_s/dE_w 随轴向应变的发展迅速减小, ε 达到5%(即峰值应力)之后, 数值维持在0附近摆动, E_s 积累达到峰值, 由于DH试样颗粒强度更低, 故其 E_s 积累更快达到极限值。在后期DL试样 dE_s/dE_w 的降低趋势比DH试样明显, 其原因为颗粒破碎阻止了DH试样 E_s 的积累, 同时也提供了大量细颗粒填充到孔隙中, 使得颗粒接触更加紧密, 试样压缩变形增加, 中和了 E_s 的减少值, 而DL试样形成了剪切带, 整体发生破坏, 带外颗粒 E_s 积累达到饱和, 而带内颗粒随着重排列部分应变能被释放, E_s 积累亦受到影响。 dE_t/dE_w 一直呈增长趋势, 随着偏应力到峰值应力后, 在0.8附近上下波动, 与 dE_s/dE_w 变化情况相对应的是DH试样 dE_t/dE_w 增加的速度更快, 可见, 剪切过程中系统做功大多通过摩擦耗散。 dE_p/dE_w

与 dE_d/dE_w 在剪切前期保持稳定状态, 当试样达到临界状态后, 颗粒破碎迅速增加, 这两部分增量比开始波动, 这是由于颗粒发生破碎后, 黏结键断裂, 破碎本身耗散一部分能量外, 阻尼器会吸收一部分破碎瞬间所释放的弹性应变能, 并且子颗粒“自由”瞬间会产生颗粒间相对滑动导致 dE_t/dE_w 随之增加。由于颗粒破碎率越高, 颗粒破碎程度越大, 因此, DH试样的 dE_p/dE_w 波动更大, 其占比也会大于DL试样。

对比发现, 不同破碎率 E_t 总积累值基本一致(图8(a)), 但事实上两个试样的颗粒破碎程度有较大差别, 而颗粒破碎显然会影响内部能量的分配。在剪切过程中, 试样 E_s 的积累与颗粒破碎的竞争会影响其宏观的应力应变与体积变化行为, 两者都促进了摩擦与阻尼耗散。颗粒破碎通过产生更多细颗粒, 在大应变状态下促进输入功的耗散。另外, 试样到达临界条件后发生剪胀, 颗粒间的重排列亦能促进能量耗散。故虽然两个试样 E_t 总值没有差别, 但其机理却并不一致, DH试样内 E_t 的增加主要是由颗粒破碎后子颗粒产生的摩擦耗散提供; DL试样中摩擦能的增加更多是剪切带内颗粒重排提供。

图 10~12 为钙质砂剪切过程中累积的 E_f 、 E_s 与 E_b 的分布演化图。由图 10 可知, E_f 在整个剪切过程中持续积累, 其分布与剪切带的分布具有强相

关性, 随着剪切的进行, 密砂 E_f 逐渐集中在剪切带内。 E_s 在轴应变达到 5% 时就基本上完成了积累, 后期基本不再发生大的变化。DH 试样 E_s 分布

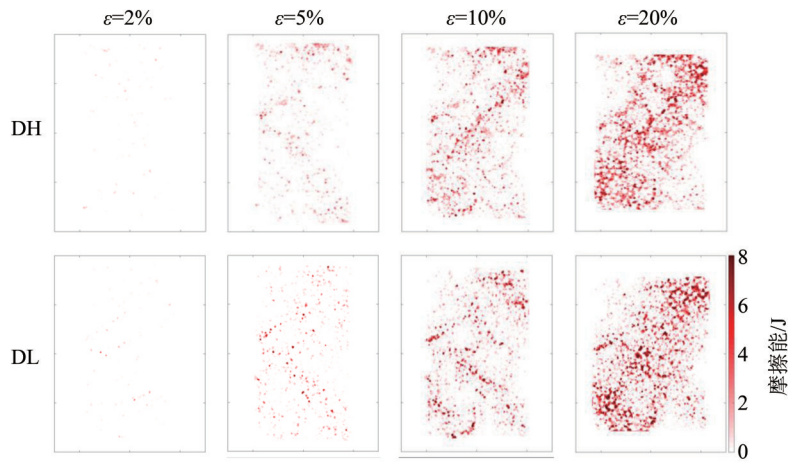


图 10 摩擦能分布图

Fig. 10 Distribution of frictional energy

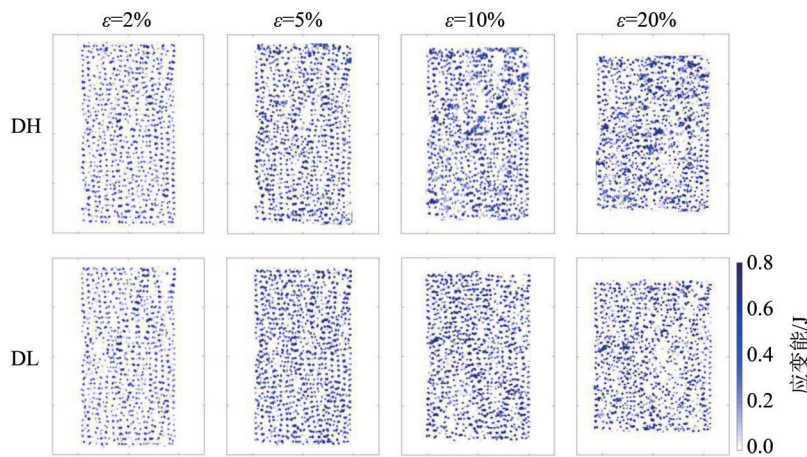


图 11 应变能分布图

Fig. 11 Distribution of strain energy

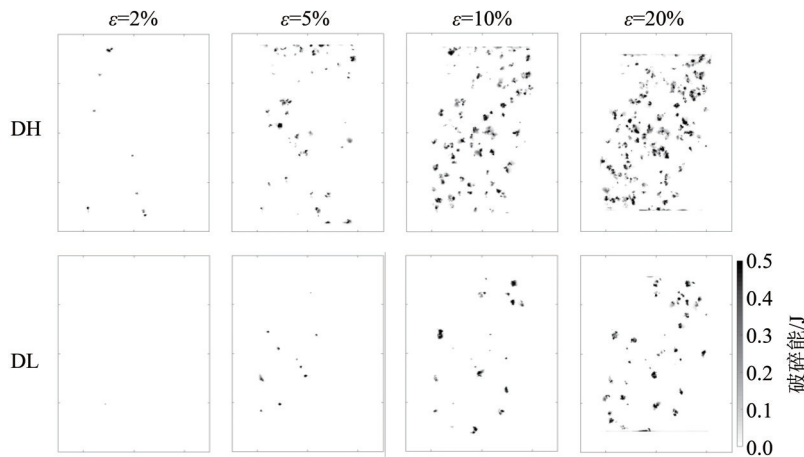


图 12 破碎能分布图

Fig. 12 Distribution of breakage energy

比较均匀,自始至终没有表现出明显集中的规律性,而DL试样剪切带内由于颗粒运动,部分 E_s 被释放。 E_p 分布与剪切带分布也有强相关性,DH试样 E_p 发展的变化同 E_t 分布变化一致,但是DL试样 E_p 与 E_t 分布尽管都集中在剪切带内,但是其摩擦耗散较集中破碎耗散较分散,说明 E_t 主要依靠剪切带内颗粒相对运动提供。这也再次佐证:对于DH试样内部能量耗散的机制是主要依靠颗粒破碎来完成,而DL在剪切过程中能量的耗散则更多得依靠试样整体的错动(即颗粒重排)实现。

综上所述,剪切过程中的能量耗散由摩擦能、应变能、破碎能与阻尼能组成,其中,摩擦能起主要作用,其次是破碎能与阻尼能,应变能最小。摩擦能与颗粒间相对运动密切相关,破碎能和应变能跟颗粒破碎密切相关。密砂的摩擦能集中在剪切带内,宏观剪胀明显。但剪切过程中的颗粒破碎增加了破碎能的占比,降低了应变能,削弱了原有颗粒的相对运动,使得应变集中减弱,使得宏观变形的剪胀作用减小。从能量角度阐释了宏观应力应变的响应,即,随着颗粒破碎程度增加,破碎能量增加,颗粒的应变能减小,使得颗粒内能减小,从而影响宏观变形由剪胀变为剪缩,应力由应变软化变为应变硬化,使得密砂的剪切响应转变为类似松砂的剪切响应(图4)。

4 结 论

本文运用离散元数值模拟方法研究了钙质砂在剪切过程中的能量耗散行为,揭示了颗粒破碎、

颗粒强度以及微观能量耗散对钙质砂宏观力学性质的影响机理。得出如下结论:

1) 钙质砂试样在剪切过程中应力应变关系以及体积响应表现出密砂的典型特征,随着钙质砂颗粒破碎率的增大,其宏观应力应变关系逐渐由应变软化向应变硬化转变,同时伴随着剪胀性降低。颗粒破碎能够促进钙质砂的压缩变形,同时影响峰值强度。

2) 颗粒破碎在整个剪切过程中持续发生,在临界状态下钙质砂颗粒需要更大的能量输入才能继续发生破碎,颗粒破碎带与剪切带具有强相关性,颗粒破碎位置逐渐集中于剪切带内,而破碎率的增加会分散颗粒破碎带的集中性。

3) 摩擦耗能与颗粒间相对运动密切相关,在整个剪切过程中起主要作用,破碎能和应变能跟颗粒破碎密切相关,颗粒破碎减少了应变的积累,使得应变能峰值降低,而其破碎本身就会引起能量耗散。随着单颗粒强度的增加,破碎耗散的能量增大,因此破碎耗能的降低的幅度与破碎率降低的幅度不一致。

4) 不同破碎率钙质砂在剪切过程中能量耗散的特征有所不同。低破碎率在剪切过程中能量主要通过剪切带内的摩擦以及带内颗粒应变能释放耗散。高破碎率的颗粒破碎使得摩擦耗散的集中性被降低,但中和了应变能的降低,使得钙质砂试样整体更均匀,宏观上即表现为密砂的剪切响应转变为类似松砂的剪切响应。

参考文献:

- 陈海洋,汪稔,李建国,2005.钙质砂颗粒的形状分析[J].岩土力学,(9):1389-1392.
- 陈庆,高燕,袁泉,2021.密实砂土剪切过程中的微观结构响应[J].水利水电技术(中英文),52(6):178-187.
- 高燕,史天根,李文龙,2022.钙质砂压缩过程中颗粒破碎的细观特征[J].水力发电学报,41(6):120-130.
- 何建乔,魏厚振,孟庆山,2018.大位移剪切下钙质砂破碎演化特性[J].岩土力学,39(1):165-172.
- 蒋明镜,2019.现代土力学研究的新视野——宏微观土力学[J].岩土工程学报,41(2):195-254.
- 刘苏,王剑锋,2018.一种基于离散元的模拟颗粒破碎方法[J].岩土工程学报,40(9):1706-1713.
- 毛炎炎,雷学文,孟庆山,2017.考虑颗粒破碎的钙质砂压缩特性试验研究[J].人民长江,48(9):75-78+102.
- 孙吉主,汪稔,2003.三轴压缩条件下钙质砂的颗粒破裂过程研究[J].岩土力学,24(5):822-825.
- 汪轶群,洪义,国振,2018.南海钙质砂宏细观破碎力学特性[J].岩土力学,39(1):199-206.
- 王刚,查京京,魏星,2019.循环三轴应力路径下钙质砂颗粒破碎演化规律[J].岩土工程学报,41(4):755-760.
- 王刚,杨俊杰,王兆南,2021.钙质砂临界状态随颗粒破碎演化规律分析[J].岩土工程学报,43(8):1511-1517.
- 王伟光,2020.钙质砂宏观力学变形特征及颗粒破碎研究进展[J].山西建筑,46(17):65-71.
- 吴京平,楼志刚,1994.钙质土的基本特性[C]//中国土木工程学会第七届土力学及基础工程学术会议.西安.

- 吴京平,褚瑶,楼志刚,1997.颗粒破碎对钙质砂变形及强度特性的影响[J].岩石工程学报,(5):51-57.
- 叶剑红,曹梦,李刚,2019.中国南海吹填岛礁原状钙质砂蠕变特征初探[J].岩石力学与工程学报,38(6):1242-1251.
- 张家铭,邵晓泉,王霄龙,等,2015.沉桩过程中钙质砂颗粒破碎特性模拟研究[J].岩土力学,36(1):272-278.
- 张家铭,汪稔,石祥锋,等,2005.侧限条件下钙质砂压缩和破碎特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,24(18):3327-3331.
- 张家铭,张凌,蒋国盛,2008.剪切作用下钙质砂颗粒破碎试验研究[J].岩土力学,29(10):2789-2793.
- 张科芬,张升,滕继东,2017.颗粒破碎的三维离散元模拟研究[J].岩土力学,38(7):2119-2127.
- 周博,黄润秋,汪华斌,2014.基于离散元法的砂土破碎演化规律研究[J].岩土力学,(9):2709-2716.
- 朱长歧,陈海洋,孟庆山.钙质砂颗粒内孔隙的结构特征分析[J].岩土力学,2014,(7):1831-1836.
- BOLTON M D, NAKATA Y, CHENG Y P, 2008. Micro- and macro-mechanical behaviour of DEM crushable materials [J]. *Geotechnique*, 58(6): 471-480.
- CUNDALL P A, STRACK O D L, 1979. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. *Geotechnique*, 29: 47-65.
- CHENG Y P, NAKATA Y, BOLTON M D, 2003. Discrete element simulation of crushable soil [J]. *Geotechnique*, 53(7): 633-641.
- DONOHUE S, O'SULLIVAN C, LONG M, 2009. Particle breakage during cyclic triaxial loading of a carbonate sand [J]. *Geotechnique*, 59(5): 477-482.
- GEORGOUTSOS, FREITAS G B, TERESA SORENSEN K, et al, 2004. Particle breakage during shearing of a carbonate sand [J]. *Geotechnique*, 54: 157-163.
- Itasca Consulting Group Inc., 2008. PFC^{2D} manual (Version 4.0) [M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc.
- KUHN M R, BAGI K, 2009. Specimen size effect in discrete element simulations of granular assemblies [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 135(6): 485-492.
- LOBO-GUERRERO S, VALLEJO L, 2005. DEM analysis of crushing around driven piles in granular materials [J]. *Geotechnique*, 55(8): 617-623.
- LOBO-GUERRERO S, VALLEJO L E, 2006. Discrete element method analysis of railtrack ballast degradation during cyclic loading [J]. *Granular Matter*, 8(3): 195-204.
- RUSSELL A R, WOOD D M, KIKUMOTO M, 2009. Crushing of particles in idealised granular assemblies [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 57(8): 1293-1313.
- SHAHNAZARI H, REZVANI R, 2013. Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: An experimental study [J]. *Engineering Geology*, 159: 98-105.
- WANG J, YAN H, 2012. DEM analysis of energy dissipation in crushable soils [J]. *Soils and Foundations*, 52(4): 644-657.
- WANG J, YAN H, 2013. On the role of particle breakage in the shear failure behavior of granular soils by DEM [J]. *Geomechanics*, 37(8): 832-854.

(责任编辑 秦社彩)