

文章编号: 1000 - 7598 (2013) 07 - 2077 - 07

# 粗粒料强度及变形特性的细观模拟

张 超, 展旭财, 杨春和

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘 要:** 粗粒料是一定级配的岩石颗粒集合体, 具有独特的物理力学特性。以粗粒料室内三轴固结排水试验成果为基础, 基于离散元颗粒流理论, 从细观角度出发, 以 PFC<sup>3D</sup> 为工具, 通过自编程及二次开发, 得到按级配生成的粗粒料三轴试验数值模型。引入 clump 颗粒考虑颗粒形状对粗粒料强度及变形的影响, 分析剪胀、颗粒形状、颗粒重排的关系。结果表明: 颗粒形状是影响粗粒料强度与变形的主要因素, 在其他细观参数一定的情况下, 改变颗粒形状, 可以显著影响粗粒料的力学行为; BPM 模型的应力-应变关系只在低围压下与试验值吻合, 随着围压的增大, 偏差越来越大; 而引入 clump 颗粒的 PFC<sup>3D</sup> 数值模型能很好地模拟粗粒料室内三轴固结排水试验的应力-应变特性, 但由于 BPM 及 clump 都是刚性颗粒, 没有考虑颗粒变形及破碎, 造成应变剪胀偏大。

**关 键 词:** 粗粒料; 强度; 变形特性; PFC<sup>3D</sup>; 细观模拟

**中图分类号:** TU 411

**文献标识码:** A

## Mesoscopic simulation of strength and deformation characteristics of coarse grained materials

ZHANG Chao, ZHAN Xu-cai, YANG Chun-he

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Coarse grained material is the aggregation of rock particles with certain gradation, which has special physical and mechanical properties. Based on the results of consolidated-drained triaxial tests and three-dimensional particle flow code theory, the numerical model of triaxial test for coarse grained materials is obtained by programming and redevelopment of PFC<sup>3D</sup> (particle flow code of three-dimension) from the view of mesoscopic scale. The influence of particle shape on strength and deformation of coarse grained materials is considered by introducing clump particles. The relations among dilation, particle breakage and rearrangement are analyzed. The numerical results show that particle shape is the main factor affecting the strength and deformation of coarse grained materials. Changing the particle shape can significantly affect the mechanical behavior of coarse grained materials in the case of other mesoscopic parameters unchanged. The stress-strain relationship of bonded-particle model (BPM) is agreed with experimental result only under low confining pressure; the deviation is growing larger with the increase of confining pressure. The stress-strain characteristics of coarse grained materials in consolidated-drained triaxial tests are simulated by PFC<sup>3D</sup> model using clump particles accurately. The BPM and clump particles are both rigid particles. The shear dilatancy is too large because the particle deformation and breakage are not considered.

**Key words:** coarse grained materials; strength; deformation characteristics; PFC<sup>3D</sup>; mesoscopic simulation

## 1 引 言

堆石体材料是具有一定级配的岩石单粒、集粒或凝块等单元共同组成的集合体, 是一种特殊的材料。其单元形态(单粒、集粒或凝块)及颗粒间排列方式(大孔隙、粒间孔隙)决定了力的传递性能和堆体的变形特性; 颗粒间连接方式(点接触、

面接触)决定了堆体的结构强度。在荷载作用下, 颗粒滑移、滚动、破碎, 原有孔隙被填充, 颗粒相互移位并重新排列, 粗粒料细观结构的复杂性和不确定性是对其力学行为进行准确描述的最大障碍, 任何一种基于适度均匀化处理的连续材料模式都很难准确地描述其结构的复杂性。颗粒离散元直接以细观组为对象, 充分考虑到堆石体内部微观结构的

收稿日期: 2012-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51004099); 岩土力学与工程国家重点实验室前沿探索性项目(No. SKLQ003)。

第一作者简介: 张超, 男, 1978 年生, 博士, 副研究员, 主要从事矿山固体废弃物力学特性、堆场稳定性与灾害防治研究。E-mail: czhang@whrsm.ac.cn

变化特征与宏观响应之间的关系,将细观结构参数与宏观力学响应统一起来,从细观角度对粗粒料进行研究,通过微观机制发生的过程来定性研究宏观变形的某些现象,进而分析其强度和变形特性的内在机制。

PFC<sup>3D</sup>是 Cundall 等<sup>[1]</sup>于 1979 年提出的一种基于离散元思想来模拟刚性圆球运动及相互作用的颗粒离散元法,其单元既可以是刚性圆球,也可以是若干个颗粒黏结在一起的粒子组,用以模拟不同形状的颗粒。

Potyondy 等<sup>[2]</sup>成功地利用 BPM(bonded-particle model)模型模拟出了岩石的一些重要性质。Hazzard 等<sup>[3]</sup>利用 BPM 模型模拟岩石,以颗粒间黏结断裂模拟裂缝,裂缝以震动波的动能形式在颗粒间扩展,通过动能而计算震动波大小。Backstrom 等<sup>[4]</sup>利用颗粒离散元研究了花岗岩细观参数模拟结果与应力-应变曲线的关系。Fakhimi 等<sup>[5]</sup>用弹性模量、泊松比和单轴抗压强度来确定砂岩的细观力学参数。Cho 等<sup>[6]</sup>引入 clump 颗粒单元分析了颗粒形状对岩石抗拉及抗压强度的影响。目前,应用 PFC 理论对粗粒料进行数值模拟的研究还不多,邵磊等<sup>[7]</sup>用 PFC 模拟粗粒料三轴试验,分析了 PFC 细观参数对试验结果的影响,得出了一些有意义的结论,但没有考虑到颗粒形状的影响,导致数值结果偏差较大。Deluzarche 等<sup>[8]</sup>用 PFC 模拟堆石坝,分析了颗粒形状、颗粒间摩擦对堆石坝稳定性的影响,但只进行了二维研究。

本文以 PFC<sup>3D</sup>为平台,基于三维离散元颗粒流理论,利用其内嵌 fish 语言,根据粗粒料级配曲线编程,引入 clump 颗粒模拟粗粒料颗粒形状的不规则、多棱角等特性。由粗粒料室内三轴试验结果建立相应的细观模型,分别对比了不同围压下三维颗粒流试样与室内三轴试验的应力-应变曲线,分析颗粒分布及颗粒形状对粗粒料强度与变形的影响,从细观角度解释堆石料的强度和变形机制,为研究堆石体的物理力学性质提供一定的参考。

## 2 三维离散颗粒流法的基本理论

### 2.1 颗粒流法基本计算原理

颗粒流法是基于离散元思想来模拟刚性圆球运动及相互作用的一种简化离散元方法。计算原理是利用中心差分法进行动态松弛,每个时步内交替运用牛顿第二定律和力-位移定律时步迭代并遍历整个颗粒集合。牛顿第二定律根据颗粒间接触力及颗粒体力确定颗粒运动,更新颗粒的运动速度及颗粒与颗粒(或墙)的位置;力-位移定律通过每个接触

点的相对运动及接触模型来更新每个接触力。

根据力-位移定律,得到接触面上的接触力。接触力在接触面上分为法向量和切向量。其中法向接触力为

$$F^n = K^n U^n n_i \quad (1)$$

式中:  $K^n$  为法向刚度;  $U^n$  为法向位移,即颗粒与颗粒之间或颗粒与墙之间的重叠量;  $n_i$  为接触面法向单位向量。

由于颗粒所受的剪切力与颗粒运动和加载历史、应力路径有关,所以剪切力以增量形式计算,其关系为

$$\Delta F_i^s = -K^s \Delta U^s \quad (2)$$

式中:  $K^s$  为切向刚度;  $\Delta U^s$  为每个时步内的位移增量。

### 2.2 BPM 模型

本文所用 BPM 程序是由 ITASCA 公司 1995 年开发的一种 PFC 传统模型, BPM 表示通过黏结力、摩擦力、接触及黏结处的有限刚度将不同大小的颗粒黏结在一起的颗粒集合体。此处的“颗粒”是指占据有限空间的刚性圆球,它们在软接触处相互作用并可以相互“重叠”。此接触处的细观性质被两种黏结模型支持:接触黏结模型(contact-bond model)和平行黏结模型(parallel-bond model)。这类引入黏结(bond)的颗粒模型为 BPM(bonded-particle model)模型。此类系统的运动由牛顿第二定律描述。BPM 模型主要满足以下假设:

- (1) 颗粒是数量有限的刚性圆球。
- (2) 颗粒之间相互独立,颗粒可以平动和转动。
- (3) 颗粒只在接触处相互作用。
- (4) 颗粒之间允许重叠,但重叠量远小于颗粒尺寸。
- (5) 颗粒间黏结可以承受一定荷载或破裂。
- (6) 黏结接触处满足力-位移定律。

由于 PFC<sup>3D</sup>基本单元为刚性圆球,而粗粒料颗粒多棱角,咬合力大,抗剪剪程度高,为了提高颗粒间的作用力,本文引入黏结接触的 BPM 模型。接触黏结力包括法向黏结力和切向黏结力,切向黏结增大了颗粒间的摩擦,法向黏结力则使颗粒之间承受压力和拉力。

### 2.3 clump 单元

在 PFC<sup>3D</sup>中 clump 是由多个圆球胶结在一起,用以模拟非规则形状颗粒或块体的超级颗粒。clump 内部的颗粒可以任意重叠,而不产生接触力,在 clump 产生或颗粒添加到 clump 的过程中其颗粒原有的接触力被保存并在计算循环过程中保持不变,

这大大提高了计算效率。无论多大的力作用在 clump 单元上，其都不会破碎和开裂，这点区别于 BPM 模型。clump 颗粒由 clump 原理 (clump logic) 控制，其参数有组成 clump 颗粒的圆球数目  $\mu_{clump}$  的半径及其每个 clump 颗粒的等效重量，详细内容参考文献[6]。

对于砂土等材料，砂颗粒简化为圆形或圆球颗粒，直接采用线性接触模型及滑动摩擦模型是合适的，而堆石颗粒形状不规则、多棱角、颗粒排列紧密、咬合力大、抗剪强度高，用圆球来模拟单元，势必造成颗粒排列形式单一，咬合力较弱，为了更好地模拟出粗粒料颗粒形状多样性，提高 PFC<sup>3D</sup> 三轴试验的抗剪强度，在引入接触黏结模型的基础上，引入了不同大小的 clump 单元。

### 2.4 细观参数的标定

对于 PFC 模型，将细观参数赋予模型很容易，而选择恰当描述材料实际行为的参数却相当繁琐。PFC 输入的属性参数不能由试验结果直接确定，因为 PFC 模型的宏观结果由细观单元的几何、物理、力学性质及相互作用决定，生成集合体过程中的颗粒大小及组装方式等因素影响着数值模型的力学行为。在固定颗粒大小及组装方式的前提下，PFC 模型参数和可以选择的颗粒材料参数之间必须通过相应的数值模拟试验（例如三轴试验、巴西劈裂试验等）来建立彼此之间的关系或联系，这个不断尝试的过程，通常称为标定。标定常以 PFC 模型的应力-应变关系及破坏包线与试验结果相符为标准，并且此标定过程与应力路径无关。

PFC 模型参数的输入是一个极为费时的过程，目前也只有定性的参考，在文献[1, 6]中均有涉及，文献[9]对脆性岩石的标定进行了定量的统计，提供了一定的指导和参考。

## 3 粗粒料三轴固结排水试验

### 3.1 试验仪器及试验方法

三轴试验仪器采用 YLSZ30-3 型应力式三轴剪切仪(见图 1)，压力室高为 600 mm，直径为 300 mm。采用各向等压固结排水 (CD) 剪切的试验方法，抽气联合水头饱和，试验采用应变控制式，以轴向应变速率 0.02 mm/min 进行剪切，至轴向应变达到 15% 时终止试验。为研究堆体的强度和变形特性，在饱和状态下分别进行了围压为 0.2、0.4、0.8、1.6 MPa 下的常规大型三轴排水固结试验。

### 3.2 试验材料

根据国内外学者的研究<sup>[10-13]</sup>，考虑到尺寸效应

的影响，要求三轴试验试样直径与颗粒最大粒径比值  $D/d_{max} \geq 5$ ，尽量减少对试验的抗剪强度影响，那么室内试验时需对材料的原始级配进行缩尺，最大粒径取 60 mm。本试验按照混合法对原材料进行缩尺，先等比例的将粗粒料粒径缩小到仪器允许范围，再等量替代，并保持小于 5 mm 的细料含量不变，缩尺后试样级配见图 2。制样干密度由相对密度试验得到。根据试验要求的干密度、试验尺寸和级配曲线（见图 2）计算并称取试验所需的粗粒料样品，混合均匀，分 3 层装料振实，得到粗粒料试样如图 3 所示。



图 1 三轴仪  
Fig.1 Triaxial apparatus

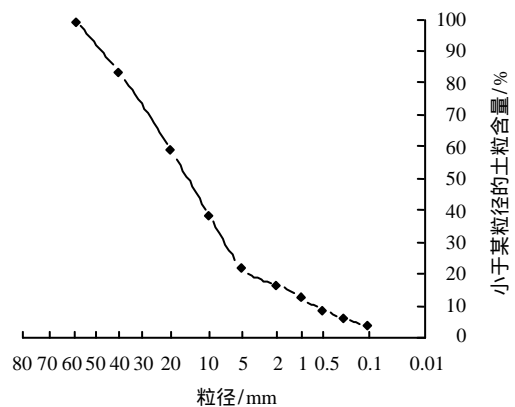


图 2 粗粒料试验级配曲线  
Fig.2 Graded curve of coarse grained materials



图 3 粗粒料三轴试验  
Fig.3 Triaxial test for coarse grained materials

## 4 粗粒料三轴试验的数值模拟

### 4.1 数值试样的生成

#### (1) BPM 模型的生成

粗粒料三轴数值模型试件高为 60 cm, 直径为 30 cm 的圆柱体, 上、下平面为加载板, 其刚度略大于颗粒法向刚度; 壁柱为柔性约束, 法向刚度小于颗粒的法向刚度。由 PFC<sup>3D</sup> 内嵌 fish 语言, 根据室内试验的颗粒级配曲线编写程序, 得到与室内试验材料级配一致的颗粒集合体。在得到集合体过程中, 如果完全按实际情况取粗粒料最小粒径为 0.1 mm, 则生成颗粒数目可达 59 万之多, 极为费时, 所以在此数值模型生成颗粒集合体时, 最小粒径控制在 1 mm, 所用粒径组及其百分比见表 1, 得到的 PFC<sup>3D</sup> 颗粒集合体如图 4(a)所示。

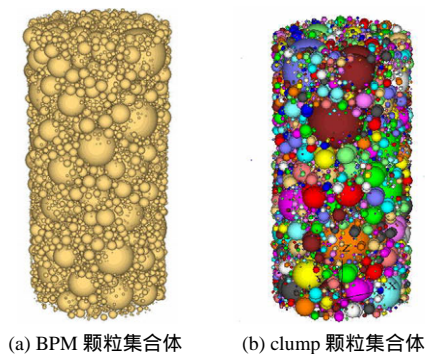


图 4 BPM 及 clump 颗粒的三轴数值模型

Fig.4 Triaxial numerical models of BPM and clump particles

表 1 数值试验的颗粒级配

粒径组/mm	60~40	40~20	20~10	10~5	5~1
质量百分数/%	16.60	24.37	20.85	16.18	22.00

根据室内三轴试验得到的峰值强度、弹性模量、泊松比等宏观参数, 结合细观参数与宏观响应之间的关系, 通过标定过程的反复尝试和调整, 得到了一组较为理想的 PFC<sup>3D</sup> 细观参数, 其值如表 2 所示。表中各符号的含义如下:  $E_c$  为颗粒弹性模量;  $k_n/k_s$  为法向刚度与切向刚度的比值;  $\sigma_c$  为颗粒间的法向黏结强度;  $\tau_c$  为颗粒间的切向黏结强度;  $\sigma_s/\sigma_m$  为黏结强度标准差与均值的比值;  $\rho$  为生成颗粒的密度;  $\mu$  为颗粒间摩擦系数;  $n$  为生成颗粒的孔隙率。

表 2 颗粒流数值模拟细观参数

$E_c$ /MPa	$k_n/k_s$	$\sigma_c$ /MPa	$\tau_c$ /MPa	$\sigma_s/\sigma_m$	$\rho$ /(g/cm <sup>3</sup> )	$\mu$	$n$
15	2.5	0.1	0.1	4	2.18	0.5	0.35

#### (2) clump 颗粒模型的生成

在 PFC 中, 一般有两种方法来模拟不同形状的

颗粒单元, 即 cluster 颗粒和 clump 颗粒, 两者最大的区别在于前者在外力作用下可以破裂, 而后者相当于刚性的超级颗粒, 永远不会破裂, 但在接触处可以重叠而产生接触力。本文选用 clump 颗粒来对比颗粒形状对宏观力学性质的影响, 排除了其他因素(如颗粒破碎)对强度与变形的影响, 具有较强的针对性和确定性。

由于生成 clump 颗粒非常费时, 本文仅用 2、3 个圆球得到两种 clump 颗粒单元, 并随机生成, 用以模拟粗粒料中不同形状的颗粒。得到 clump 颗粒的基本步骤为: 在预设的空间区域内按级配程序随机产生圆球单元, 并将由 BPM 模型标定出的细观物理力学参数(见表 2)赋予球单元; 提取并储存球单元的几何(形心坐标)和物理信息, 并删除球单元; 按照组成 clump 颗粒的最大圆球数目及 clump 半径得到相应的 clump 颗粒。得到的 clump 颗粒体积及重量与原球形颗粒相同, 只改变了颗粒形状。clump 颗粒组成的集合体如图 4(b)所示。

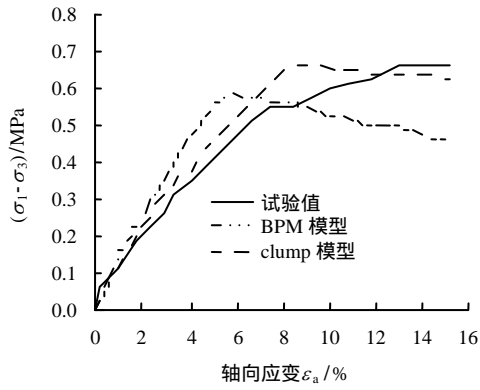
### 4.2 PFC<sup>3D</sup> 数值试验的实现

PFC<sup>3D</sup> 由伺服控制系统通过上、下加载板作相对运动进行等压固结, 上、下加载板移动速度非常小, 以此模拟静力加载过程。通过 fish 函数自动调整壁柱位移来保持围压不变, 并严格控制围压的误差在加载过程中小于 1%, 使试样在每一步的平衡状态下加载, 直至轴向应变达到 15%, 加载过程停止。对于 BPM 及 clump 颗粒模型分别在围压为 0.2、0.4、0.8、1.6 MPa 工况下进行加载, 得到偏应力-应变及体变-应变曲线如图 5、6 所示。

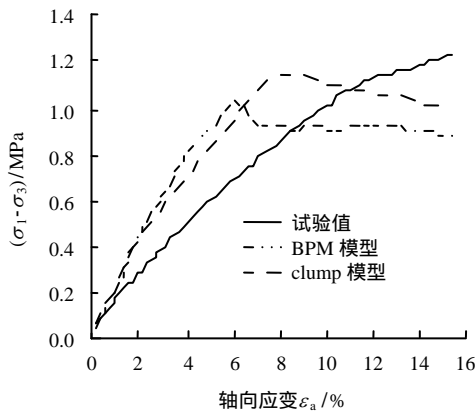
## 5 PFC<sup>3D</sup> 模拟结果分析

### 5.1 应力-应变特性分析

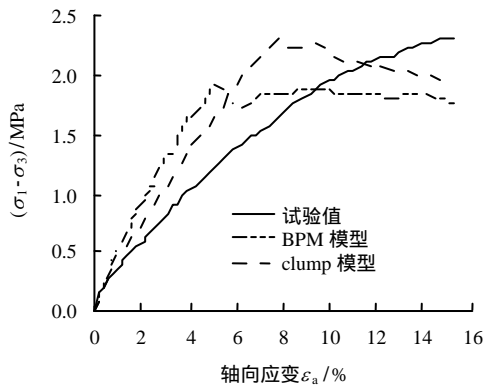
由图 5 可知, 在 4 组围压下, BPM 模型、clump 模型得到的三轴数值模拟结果与试验结果虽有一定误差, 但总体趋势一致。3 组试验的峰值主应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )都随着围压  $\sigma_3$  的增加而增大。随着围压增高, BPM 模型与试验值偏差逐渐增大, 这是因为 BPM 模型颗粒形状及排列形式单一、咬合力弱, 与实际粗粒料多棱角、排列紧密、咬合力强的特性相差较大。而 clump 模型考虑了颗粒形状的因素, 近似模拟了粗粒料颗粒的不规则性, 颗粒间接触多, 嵌固及咬合作用强, 在一定程度上弥补了 BPM 模型的不足, 并且在加载过程中, 要克服颗粒之间错动所需要的能量也大, 所以其强度较大, 与试验数值比较吻合。与室内试验结果相比, 数值试验应力-应变曲线的初始段是线性的, 因为数值试验并不存在孔隙效应和初始缺陷<sup>[14]</sup>。



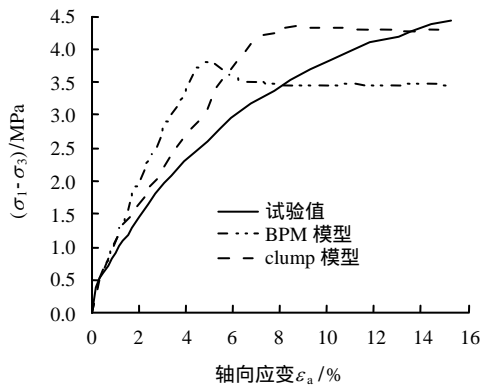
(a) 围压  $\sigma_3=0.2$  MPa



(b) 围压  $\sigma_3=0.4$  MPa



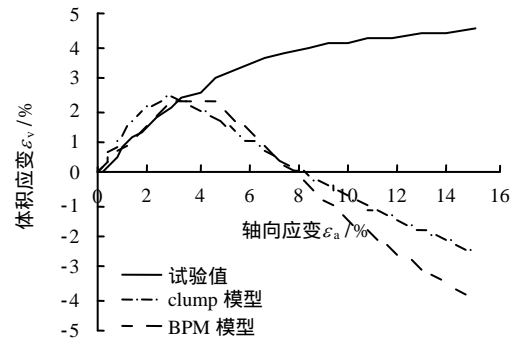
(c) 围压  $\sigma_3=0.8$  MPa



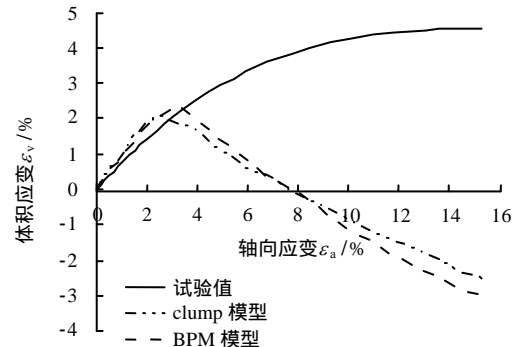
(d) 围压  $\sigma_3=1.6$  MPa

图 5 不同围压下数值模拟与室内试验  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_a$  关系曲线

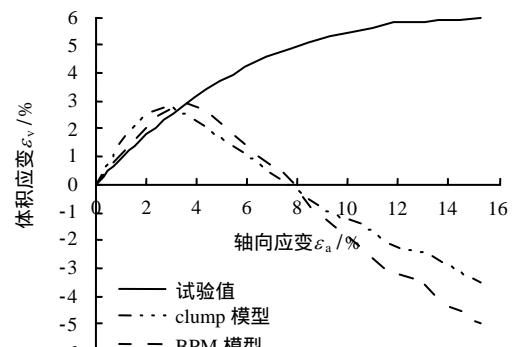
Fig.5  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_a$  curves of numerical simulation and laboratory experiment under different confining pressures



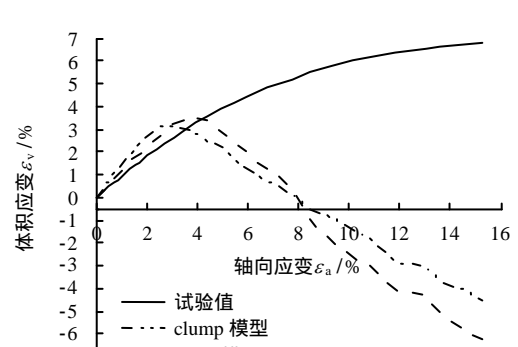
(a) 围压  $\sigma_3=0.2$  MPa



(b) 围压  $\sigma_3=0.4$  MPa



(c) 围压  $\sigma_3=0.8$  MPa



(d) 围压  $\sigma_3=1.6$  MPa

图 6 不同围压下数值模拟与室内试验  $\epsilon_v - \epsilon_a$  关系曲线  
Fig.6  $\epsilon_v - \epsilon_a$  curves of numerical simulation and laboratory experiment under different confining pressures

3 组试验的主应力差  $\sigma_1 - \sigma_3$  都随轴应变的增加而增加,但不同围压下应力-应变曲线表现出不同的

形式。低围压下应力-应变曲线呈软化性,此时试样承受的轴向压力及围压较小,不足以限制颗粒翻越,剪切带内颗粒表现出明显的颗粒翻越,从而使应力-应变曲线呈软化性。高围压下,较高的轴向压力与围压对颗粒翻越有明显的限制作用,剪切带内颗粒表现为颗粒重排和填充,使得高围压下应力-应变曲线呈微硬化性。

## 5.2 变形特性分析

粗粒料体积应变-轴向应变  $\varepsilon_v-\varepsilon_a$  曲线见图 6,数值模拟的  $\varepsilon_v-\varepsilon_a$  曲线出现了剪胀,并且 BPM 模型与 clump 颗粒模型的剪缩(剪胀)特性略有不同。虽然随着围压的增大,数值模型的剪胀有一定程度的削弱,但总体与室内试验曲线偏差较大。

粗粒料变形是由颗粒变形、颗粒破碎、粒间相对变位与重排决定的,而剪胀、破碎与颗粒重排是粗粒料、粗细料填充状况的表现形式,其与颗粒大小、级配、颗粒形状等因素有关。颗粒在荷载作用下翻滚、跨越、爬升及抬起造成剪胀,而颗粒间相对滑动、胶结破坏及颗粒破碎则是剪缩的主要原因<sup>[15]</sup>。如图 6 所示,数值试样先剪缩后剪胀,主要是随着偏应力的增大,颗粒运动经历了彼此填充孔隙到翻越相邻颗粒的发展过程。

试验试样和数值模型在不同围压下加载前期都有明显的体缩现象,前期剪缩主要是由于大孔隙的均匀化<sup>[16]</sup>引起的,当试样受外荷载后大孔隙优先改变,使得粗粒料的孔隙趋于均匀,这种大孔隙的均匀化宏观上表现为体缩。试验材料和数值模型的粗粒含量都在 70% 以上,粗粒料含量多,粗粒料表现出明显的骨架作用,粗粒部分相互架空形成较大的孔隙,粗粒料处于相对疏松状态,所以前期剪缩现象明显。数值模型在生成颗粒集合体时,颗粒的最小粒径取为 1 mm,大于试验的最小粒径 0.1 mm,所以数值模型的孔隙要多于试验材料,其前期由于孔隙均匀化引起的剪缩在速度和程度上要高于试验值。BPM 及 clump 颗粒模型颗粒大小近似,因此,体变-轴变曲线前期变化基本一致。

对于数值试样,随着荷载增大,孔隙分布逐步均匀,大孔隙减少成为影响体缩的次要因素,颗粒体的变形及粒间滑动、抬升引起的体积增大就成为影响体积变化的主要因素,因此,开始出现了剪胀。BPM 及 clump 颗粒模型随着围压增大,体积缩小,颗粒接触处接触力增大,当接触力超过颗粒间接触强度时,颗粒间黏结破坏,颗粒克服互锁,开始滑动、转动,从而引起颗粒间相对变位、抬升,造成

体积膨胀。BPM 单元及 clump 都是刚性颗粒,在荷载作用下不考虑颗粒破碎,因而其在后期加载过程中由于颗粒间移动、变位、抬升造成的剪胀起主导作用;而试验的粗粒料,随着荷载的增加,颗粒破碎导致试样级配的变化,细料增多,粒间填充关系改变,使得在整个加载过程中,剪缩一直占据主导地位。clump 模型中,颗粒之间较 BPM 模型紧密,具有更小的剪前孔隙率,颗粒之间咬合作用强,因而随轴向荷载的增大,颗粒间克服咬合力需要更大的能量,相同轴应变下其径向应变更小,剪胀较 BPM 模型稍弱。

## 6 结 论

(1) 颗粒形状是影响粗粒料强度与变形的主要因素。在其他细观参数一定的情况下,改变颗粒形状,可以显著影响粗粒料的力学行为。

(2) 根据试验材料级配得到 PFC<sup>3D</sup> 的 BPM 数值模型,其在低围压下峰值强度与试验模型基本一致,随着围压增大,偏差也越来越大。主要原因在于 BPM 模型颗粒形状及排列方式单一,咬合力弱。

(3) 在 BPM 基础上,考虑到颗粒形状的影响,引入 clump 颗粒,得到的数值模型能较好地模拟试验结果,其应力-应变曲线吻合较好。

(4) 数值模型  $\varepsilon_v-\varepsilon_a$  曲线初始段剪缩与试验曲线不同。由于生成数值试样时,最小粒径大于试验最小粒径,粗粒料含量高,粗粒间相互架空形成较大的孔隙,在大孔隙均匀化过程中,体积变化速度和程度较高,使得前期剪缩速度及程度高于试验值。

(5) 数值模型出现剪胀。由于 BPM 及 clump 模型都是刚性球体单元,没有考虑到颗粒的变形及破碎,一定围压下随着轴压的增大,颗粒间接触力增大,颗粒出现翻滚、跨越、爬升导致粒间相对变位,造成应变剪胀偏大,当压力与变形不断增加的情况下,球体颗粒在空间上重排而密实,导致应变大的情况下发生明显剪缩。实际上颗粒为不规则棱体,相互咬合,剪切过程中发生破碎,颗粒出现翻滚、跨越、爬升而重排现象不明显,以上原因导致了数值模拟结果在轴向应变较大时与实际试验误差较大。下一步将继续进行考虑非刚性不规则颗粒材料在加压条件下发生破碎的力学行为数值模拟研究,使得数值模拟结果更加符合实际试验结果。

## 参 考 文 献

- [1] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical

- model for granular assemblies[J]. **Géotechnique**, 1979, 29(1): 47 - 65.
- [2] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2004, 41(8): 1329 - 1364.
- [3] HAZZARD J F, YOUNG R P. Simulating acoustic emissions in bonded-particle models of rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2000, 37(5): 867 - 872.
- [4] BACKSTROM A, ANTIKAINEN J, BACKERS T. Numerical modelling of uniaxial compressive failure of granite with and without saline porewater[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2008, 45(7): 1126 - 1142.
- [5] FAKHIMI A, CARVALHO F, ISHIDA T, et al. Simulation of failure around a circular opening in rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2002, 39(4): 507 - 515.
- [6] CHO N, MARTIN C D, SEGO D C. A clumped particle model for rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2007, 44(7): 997 - 1010.
- [7] 邵磊, 迟世春, 贾宇峰. 堆石料大三轴试验的细观模拟[J]. **岩土力学**, 2009, 30(增刊 1): 239 - 243.
- SHAO Lei, CHI Shi-chun, JIA Yu-feng. Meso-mechanical simulation of a large scale triaxial test of rockfill materials[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30 (Supp.1): 239 - 443.
- [8] DELUZARCHE R, CAMBOU B. Discrete numerical modelling of rockfill dams[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2006, 30(11): 1075 - 1096.
- [9] JEOUNGSEOK YOON. Application of experimental design and optimization to PFC model calibration in uniaxial compression simulation[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2007, 44(6): 871 - 889.
- [10] 张启岳. 用大型三轴仪测定砂砾料和堆石料的抗剪强度[J]. **水利水运科学研究**, 1980, (1): 25 - 38.
- [11] BISHOP W A, HENKEL D J. The measurement of soils properties in triaxial test[R]. London: Edward Arnold Ltd., 1962.
- [12] 王光进, 杨春和, 张超, 等. 粗粒含量对散体岩土颗粒破碎及强度特性试验研究[J]. **岩土力学**, 2009, 30(12): 3649 - 3654.
- WANG Guang-jin, YANG Chun-he, ZHANG Chao, et al. Experimental research on particle breakage and strength characteristics of rock and soil materials with different coarse-grain contents[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3649 - 3654.
- [13] 南京水利科学研究所. SL237 - 1999 土工试验规程[S]. 北京: 水利水电出版社, 1999.
- [14] HOLT R M, KJOLASSB J, LARSEN I, et al. Comparison between controlled laboratory experiments and discrete particle simulations of the mechanical behaviour of rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2005, 42(7 - 8): 985 - 995.
- [15] 迟明杰, 赵成刚, 李小军. 砂土剪胀机理的研究[J]. **土木工程学报**, 2009, 42(3): 99 - 104.
- CHI Ming-jie, ZHAO Cheng-gang, LI Xiao-jun. Stress-dilation mechanical of sands[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2009, 42(3): 99 - 104.
- [16] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 水利水电出版社, 2000.