

堆石体三轴剪切试验的三维细观数值模拟

马刚^{1,2}, 周伟^{1,2}, 常晓林^{1,2}, 周创兵^{1,2}

(1. 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 从细观角度出发, 采用随机模拟技术建立堆石体的三维随机颗粒模型, 基于修正的增广 Lagrangian 算法的非线性接触算法模拟颗粒间的相互接触, 采用损伤软化模型描述细观单元的应力应变关系, 当细观单元的损伤度超过损伤阈值时删除该单元, 采用 Weibull 概率分布描述堆石体材料物理力学性质的非均匀性。以水布垭面板堆石坝茅口组堆石为研究对象, 进行其三轴剪切试验的变形体离散元细观数值模拟, 采用应变控制加载, 再现了堆石体的颗粒变形和运动规律。数值计算结果表明, 数值模拟能够较好地反映堆石体三轴试验的变形规律, 得到的轴向应变 - 偏应力曲线和轴向应变 - 体积应变曲线接近试验曲线。从能量角度分析了颗粒变形、颗粒间的摩擦、颗粒的损伤破碎、颗粒运动在加载过程中对系统的贡献。

关键词: 堆石体; 变形体离散元; 细观力学; 随机模拟; 非线性接触; 损伤软化模型; 非均匀性

中图分类号: TV641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2011)05 - 0746 - 08

作者简介: 马刚(1985 -), 男, 博士研究生, 主要从事高坝结构数值仿真方面的研究。E-mail: magang630@163.com。

3D mesoscopic numerical simulation of triaxial shear tests for rockfill

MA Gang^{1,2}, ZHOU Wei^{1,2}, CHANG Xiao-lin^{1,2}, ZHOU Chuang-bing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan 430072, China; 2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering, Ministry of Education, Wuhan 430072, China)

Abstract: A stochastic granule model is developed at mesomechanical level. A random distribution model for rockfill granule is generated by means of random simulation technique. In addition, the nonlinear contact algorithm is presented based on modified augmented Lagrangian algorithm. A simple linear softening damage model is employed to describe the stress and strain relationship of mesoscopic element, and the mechanical properties are distributed with a certain statistical function. The stochastic granule model of Maokou rockfill of Shuibuya rockfill dam is established. The simulated results show that the movement and deformation processes of rockfill granule agree well with the present experiments.

Key words: rockfill; deformable distinct element; mesomechanics; stochastic simulation; nonlinear contact; softening damage model; heterogeneity

0 引言

堆石体是一种复杂的不连续介质, 其在外部荷载下的响应是颗粒间摩擦、颗粒破碎、颗粒变形和颗粒运动等作用的综合结果。堆石体的复杂性使得我们长期以来只能通过室内试验的手段研究堆石体的力学变形特性。计算机模拟技术的飞速发展和数值计算方法的进步, 使我们可以从多角度、多层面去研究堆石体, 从细观尺度探究堆石体的变形机理, 将堆石体的细观结构与宏观力学反应联系起来, 以加深对堆石体变形特性的了解。

在岩土工程领域, 采用细观方法研究岩土材料的应力、变形机理已经取得了一系列的研究成果。Cundall^[1]提出了离散单元法DEM(Discrete Element

Method), 这是一种适用于岩石等非连续介质变形与稳定分析的数值计算方法。自DEM被提出以来, 它在岩土介质数值分析中得到了迅速发展和广泛运用, 经过许多学者的共同努力, 离散元法已从二维发展至三维, 从刚性体发展到变形体, 颗粒的形状也由最初的圆盘和球形发展到椭圆、椭球、多边形、多面体及其他复杂的几何形状, 接触本构关系也在不断地扩充。Zhang等^[2]采用离散元进行了高岩质边坡的抗滑稳定分析; Su等^[3]基于离散元理论, 研究了断层、节理对岩体地应力的影响; 周健等^[4]基于颗粒流理论, 对砂土和黏

基金项目: 国家自然科学基金项目(50779047, U0970153); 国家自然科学基金杰出青年基金项目(50725931)

收稿日期: 2010 - 01 - 12

性土平面应变试验进行颗粒流PFC模拟,细观再现了砂土和黏性土室内试验所得的应力-应变关系曲线特征;Kemeny等^[5]采用变形体离散元研究了岩石的渐进破坏过程。

目前,在堆石体细观数值方面的研究比较少,Rockefeller^[6]提出了基于随机散粒体不连续变形理论的细观流变模型;郭培玺等^[7]运用不连续变形方法DDA研究了二维粗粒料的力学特性,应当指出将堆石颗粒简化为球形的刚性体过于理想化,而且没有考虑颗粒自身变形,特别是没有考虑颗粒的破碎;周伟等^[8]建立了基于随机数值模拟技术的随机颗粒不连续变形(SGDD)模型,对堆石体的三轴剪切试验进行了细观数值模拟,但将堆石颗粒简化为二维多边形,没有考虑堆石颗粒物理力学性质的非均匀性,且对三轴试验条件模拟不充分。

得益于计算技术的飞速发展,随机数值模拟技术已成功运用于多学科、多领域。在岩土工程领域,李世海和汪远年^[9]运用随机模拟技术对三维土石混合体进行了研究;油新华等^[10]基于随机模拟技术建立了土石混合体的细观结构模型;徐文杰等^[11]采用随机模拟技术实现了土石混合体细观结构几何模型的重建,并在此基础上进行了一系列的数值试验研究;在混凝土的三维随机结构数值研究方面,刘光廷等^[12]对相应的三维骨料形态及随机投放算法进行了探讨和研究。

与室内试验相比,堆石体细观数值模拟可以减小试验成本,突破试样尺寸的限制,避免由于颗粒级配变化产生的缩尺效应,同时可以动态地观察细观结构的变化,包括颗粒的运动规律、宏观应力-应变曲线和能量耗散过程,为堆石体的变形机制的研究提供了有效的方法。

本文采用随机模拟技术生成三维多面体颗粒,利用Weibull概率分布函数描述堆石材料物理力学性质的非均匀性,删除损伤度大于损伤阈值的单元以模拟颗粒的尖端破碎,接触算法采用修正的增广Lagrangian算法^[13],接触本构为带残余剪切强度的库伦摩擦^[14],进行堆石体三轴剪切试验的三维变形体离散元细观数值模拟。着重从堆石体颗粒的运动、宏观表现的应力-变形关系、能量耗散过程探讨堆石体的变形特性,为堆石体变形机理的研究提供了一条思路。

1 三维堆石体颗粒集合的随机模拟

对于人工堆石材料,其颗粒的形状和空间分布具有显著的随机性,可通过抽样统计的方法获取堆石体颗粒的特征参数,如级配、颗粒尺寸、颗粒形状等。

本文运用随机模拟技术生成形状随机的堆石颗粒及其在空间中的分布,采用Fortran语言编写堆石体随机颗粒模型的生成程序SPG(Stochastic granule Generator)。

堆石体的堆石颗粒随机分布问题,与混凝土和土石混合体有所不同,颗粒没有水泥砂浆和土的包裹,而是依靠颗粒之间的相互接触来保持平衡,此外还要满足一定的空隙率,故处理起来比较困难。本文在建立堆石体随机模型的时候,借鉴了混凝土粗骨料随机投放算法的思路,并提出了新的方法,提高了颗粒投放效率。

1.1 堆石颗粒随机生成方法

随机数的产生是随机模拟技术的基础,本文采用Mersenne Twister算法生成[0, 1]区间均匀分布的随机数^[15],它具有随机性好、序列关联小等特点,被称为目前最好的随机数发生器之一。考虑到堆石颗粒的形状及其在空间中的分布是随机均匀的,因此采用均匀分布模型模拟堆石体。影响堆石体随机颗粒模型的因素有颗粒级配曲线(粒径)、颗粒的形状、位置坐标等。

根据颗粒级配曲线确定每组粒径的上下限,按粒径从大到小生成每组粒径区间内的颗粒直到颗粒含量满足级配要求。实际颗粒集合体是不会出现相交和侵入现象的,故还要判断颗粒间的相互侵入关系。

实际的堆石体颗粒是通过人工爆破、破碎而成,主要形态是凸多面体。为了能反映堆石颗粒的不规则形态,在不等边椭球内生成随机凸多面体颗粒(见图1)。生成方法为在某不等边椭球上随机布点,颗粒的顶点数随机取值,然后按照给定的算法连点形成凸多面体,具体方法如下。

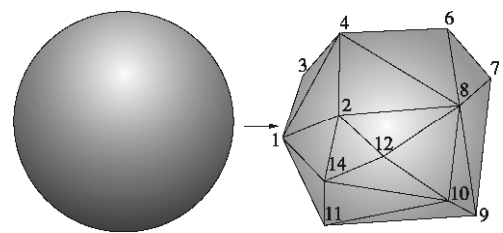


图1 凸多面体颗粒

Fig.1 Regular convex solids for particle

首先按照颗粒级配曲线生成不等边椭球的半径:

$$\left. \begin{aligned} a &= r_1 + (r_2 - r_1)\text{rand1}, \\ b &= r_1 + (r_2 - r_1)\text{rand2}, \\ c &= r_1 + (r_2 - r_1)\text{rand3}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 a, b, c 为不等边椭球的3个极半轴的长度; r_1 为某一粒径组的粒径下限; r_2 为相应粒径组的粒径上限, $\text{rand1}, \text{rand2}, \text{rand3}$ 为区间[0, 1]均匀分布上的独立随机数。

为了保证生成颗粒的形状具有足够的随机性, 颗粒的顶点数在 $[n_{\min}, n_{\max}]$ 之间均匀分布:

$$n = n_{\min} + (n_{\max} - n_{\min}) \text{rand} \quad (2)$$

式中 rand 为区间 $[0, 1]$ 均匀分布上的随机数; n_{\min} 取 8; n_{\max} 取 16。

采用球坐标确定凸多面体的顶点:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= x_0 + a \sin q_i \cos j_i, \\ y_i &= y_0 + b \sin q_i \sin j_i, \\ z_i &= z_0 + c \cos q_i. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 x_i, y_i, z_i 为不等边椭球上第 i 个点的坐标; x_0, y_0, z_0 是不等边椭球的球心坐标; q_i 是球坐标系中的天顶角, 在 $[0, \pi]$ 区间内均匀分布; j_i 是球坐标系中的方位角, 在 $[0, 2\pi]$ 区间内均匀分布。

在不等边椭球上随机布完点后, 遍历每个顶点 p_i , 寻找与顶点 p_i 距离最近的顶点 p_{i1} , 然后再在剩下的顶点中找一个点 p_{i2} , 使得其余所有顶点均在 p_i, p_{i1}, p_{i2} 这三个点确定的三角形平面的同一侧。遍历完所有顶点后, 删除具有相同节点的面, 然后存储每个凸多面体的几何信息。

1.2 堆石颗粒相互侵入关系的判别准则

颗粒侵入判别在三维随机颗粒模型生成中至关重要, 判别准则的好坏直接影响程序实现的难易与算法的效率和生成颗粒的质量。因此本文力求寻找一种方便、快捷的颗粒侵入关系判别准则。对于二维随机颗粒模型, 周伟等^[8]提出了一个简便易行的颗粒侵入判别, 并取得了较好的结果。对于三维随机颗粒模型, 球形颗粒的判别相对简单, 只需判断任意 2 个颗粒球心之间的距离是否大于二者的半径和即可, 对于凸多面体颗粒的相互侵入关系判别则相对复杂很多。本文在二维颗粒侵入判别^[8]基础上作了一些扩充, 形成了三维颗粒侵入判别。判别方法如下(见图 2): 当凸多面体 $A_1A_2A_3 \cdots A_n$ 所有顶点在凸多面体 $B_1B_2B_3 \cdots B_n$ 任意一个面 $B_1B_2B_3$ 的一侧, 而凸多面体 $B_1B_2B_3 \cdots B_n$ 的形心在另一侧, 那么可以断定这 2 个凸多面体是相互分离的。这种方法简单明了, 避免了前述研究中判别方法中出现的不必要的麻烦。由于所有颗粒均在不等边椭球面上内接而成, 为了进一步加快颗粒侵入的判断, 提高算法的效率, 当两颗粒球心的距离大于两颗粒最大极半轴之和时, 颗粒是互不侵入的, 不需要调用颗粒侵入判断准则。

2 细观本构模型与颗粒破碎

堆石体除了具有不连续性以外, 还具有材料非均匀性。梁正召等^[16-17]通过引入材料的非均匀性, 建立

岩石的细观软化损伤本构模型, 模拟了岩石的三维破裂过程, 取得了较好的结果。本文假定细观尺度的单元物理学性质服从 Weibull 概率分布, 采用细观软化损伤本构模型描述单元的行为, 当单元损伤度达到一定的阈值后, 即删除该单元, 以模拟颗粒破碎。

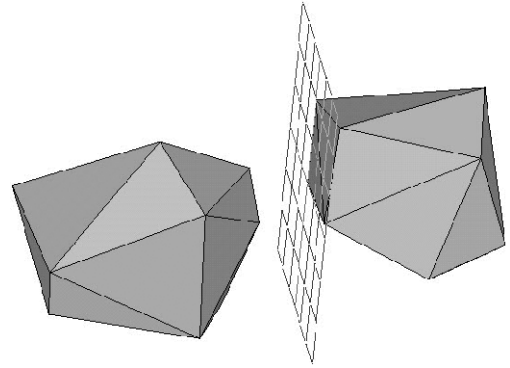


图 2 凸多面体分离判别

Fig. 2 Discrimination of regular convex solids

2.1 材料非均匀性

堆石体是一种参数变异性很大的非均质各向异性体, 可以用统计分布函数来描述堆石体细观单元的物理学性质的非均匀性。岩石力学参数常用的概率分布形式有正态分布、指数分布、伽马分布、Weibull 分布、对数正态分布。本文采用 Weibull 分布来随机生成堆石体细观单元的物理学性质。

Weibull 分布的概率密度函数为

$$f(x, l, k) = k l^{-k} x^{k-1} e^{-(x/l)^k} \quad (4)$$

式中 k 是形状参数, 描述力学参数的均匀程度; l 是比例参数。以抗拉强度为例, 抗拉强度的期望值与 l, k 的关系为

$$E(f_l) = l \Gamma(1 + 1/k) \quad (5)$$

2.2 本构模型

细观尺度上堆石是一种准脆性材料, 因此可以采用弹脆性损伤本构模型。细观单元在达到峰值应力之前保持线弹性应力应变关系, 当达到峰值应力之后承载能力逐渐降低, 采用幂函数曲线表示应变软化阶段。

单轴压缩下应力应变关系可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_c &= \begin{cases} E_0 e_c & e_c < e_{c0} \\ E_0 (e_c + e_p) \left(\frac{e_{c0}}{e_c + e_p} \right)^N & e_c \geq e_{c0} \end{cases} \\ e_p &= \left(\frac{E_0 e_{c0}^N}{E_0 e_{c0}} - e_{c0} \right)^{\frac{1}{N-1}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 E_0 为弹性模量; e_{c0} 为峰值压应力对应的应变; N 为损伤常数, 描述损伤的快慢, N 越大, 损伤越快, 软化段的曲线越陡。

对应的压缩损伤演化方程为

$$d_c = \begin{cases} 0 & e_c < e_{c0} \\ 1 - \left(\frac{e_c + e_p}{e_c}\right) \left(\frac{e_{c0}}{e_c + e_p}\right)^N & e_c \geq e_{c0} \end{cases} \quad (7)$$

拉伸损伤演化方程可将式 (7) 中的下标 c 换成 t 即可。

在三维应力状态下分别采用 θ_t, θ_c 代替 e_t, e_c , 带入式 (7) 中求得拉伸和压缩损伤变量 d_t, d_c 。

$$\theta_t = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \langle e_i \rangle^2}, \quad \theta_c = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \langle -e_i \rangle^2}, \quad (8)$$

式中 e_i 为第 i ($i=1,2,3$) 个主应变; $\langle \rangle$ 为 Macaulay 符号, 即当 $x \geq 0$ 时, $\langle x \rangle = x$, 当 $x < 0$ 时, $\langle x \rangle = 0$ 。

堆石颗粒的应力状态比较复杂, 堆石体在受荷后处于持续调整的动态过程, 在此过程中应力状态可能在拉压之间交替, 此时的刚度退化机制比较复杂, 它涉及到预先存在裂缝的开闭以及裂缝间的相互作用。试验表明: 准脆性在单轴循环荷载下, 当荷载由拉变压时, 弹性刚度将得到恢复; 当荷载由压变拉时, 弹性刚度的恢复并不明显。本文采用的细观损伤模型假定材料刚度的退化是各向同性的, 刚度退化变量 d 是单轴损伤变量 d_t, d_c 的函数。为了反映堆石颗粒在复杂应力下的刚度恢复特性, 细观损伤模型引入了两个与应力方向有关的状态函数 k_t, k_c 。

$$\left. \begin{aligned} (1-d) &= (1-k_t d_t)(1-k_c d_c), \\ k_t &= 1-w_t r(s_{11}), \\ k_c &= 1-w_c(1-r(s_{11})), \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中 k_t, k_c 为与应力方向有关的状态函数; w_t, w_c 控制荷载反向时的刚度恢复能力, 等于 1 时刚度完全恢复, 等于 0 时刚度不恢复, 取中间值意味着刚度部分恢复; 阶跃函数 $r(s_{11}) = H(s_{11})$, 当 $s_{11} > 0$ 时, $r(s_{11}) = 1$, 当 $s_{11} < 0$ 时, $r(s_{11}) = 0$ 。

在多轴应力状态下, 采用多轴应力权重应力 $r(\bar{s})$ 代替阶跃函数 $r(s_{11})$, 将式 (9) 给出的单轴下的损伤值转化为适用于多轴应力条件, $r(\bar{s})$ 表示为

$$r(\bar{s}) = \frac{\sum_{i=1}^3 \langle \bar{s}_i \rangle}{\sum_{i=1}^3 |\bar{s}_i|} \quad 0 \leq r(\bar{s}) \leq 1, \quad (10)$$

式中 \bar{s}_i ($i=1,2,3$) 为有效应力张量的主应力分量。

计算时, 先将多轴状态下的应变张量进行正负分解, 代入式 (8) 求得 θ_t, θ_c , 按照式 (7) 分别求得拉伸和压缩损伤变量 d_t, d_c , 最后由式 (9) 求得损伤变量 d 。

2.3 堆石体颗粒尖端破裂

人工堆石体材料是通过爆破、破碎而来, 虽然经过碾压密实, 仍然存在较多的棱角, 这使得堆石坝在

施工期和蓄水运行期的自重、水荷载作用下, 堆石体颗粒棱角尖端会产生破碎, 并引起堆石体颗粒位置的调整。堆石体颗粒的破碎是影响其宏观力学特性的主要内因之一, 因此有必要在细观数值模拟中体现堆石体颗粒的破碎, 本文假设当尖端处的积分点的损伤度 $d > 0.99$ 时, 积分点不再承受应力, 对刚度矩阵的贡献置零, 积分点失效; 当单元的所有积分点都失效时, 删除该单元, 以模拟颗粒破碎。

3 堆石体三轴剪切试验细观数值模拟

本文以水布垭面板堆石坝的茅口组堆石为研究对象, 进行三轴剪切试验的细观数值模拟。图 3 为水布垭堆石室内试验级配曲线, 试样大小为 $\phi 300 \text{ mm} \times 650 \text{ mm}$, 在建模的时候, 考虑到计算能力的限制, 适当去掉极小粒径颗粒, 采用较大粒径颗粒等体积替代, 堆石体随机颗粒模型如图 4 所示。整个模型共有 3783 个颗粒, 由于颗粒形状极不规则, 采用二阶四面体单元离散为 142788 个单元。

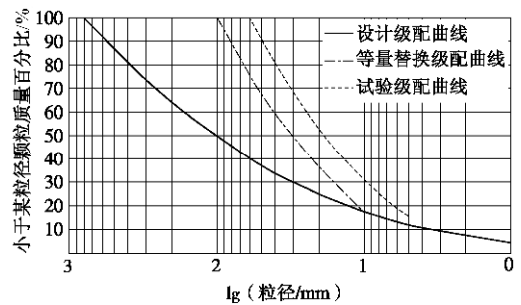


图 3 堆石料级配曲线

Fig. 3 Particle size distribution curves of rockfill

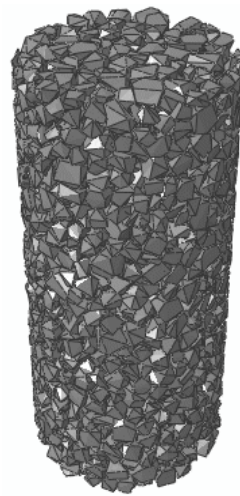


图 4 随机颗粒模型

Fig. 4 Stochastic granule model

根据水布垭茅口组堆石母岩的试验资料: 细观单元抗压强度期望值取 250 MPa, Weibull 分布形状参数

为 10；泊松比期望值取 0.2，Weibull分布形状参数为 100；弹性模量的期望值为 30.0 GPa，Weibull分布形状参数为 20；颗粒内摩擦角为 30°；密度取 2180 kg/m³。弹性模量、泊松比和抗压强度是独立随机分布。颗粒间的摩擦系数取 0.65，残余摩擦系数为 0.2。

为了模拟室内三轴剪切试验的试验条件，模型上下两端为刚性板，底部刚性板全约束，采用应变控制式加载施加在顶部刚性板上，加载速率 0.0001 mm/步，模型四周用橡胶膜包裹住，橡胶膜上下端绑定在刚性板上，围压施加在橡胶膜上，橡胶膜厚度取 2 mm。橡胶膜采用膜单元离散，采用超弹性本构模型描述其应力应变关系。

数值模拟开始时，先对试样施加围压进行固结，然后采用应变控制进行轴向加载，图 5 为细观数值模拟的加载示意图（中心剖面），图 6 为加载曲线。

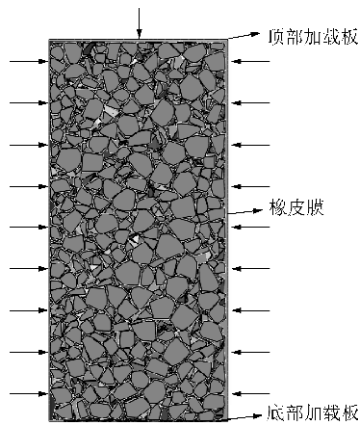


图 5 加载示意图

Fig. 5 Loading diagram

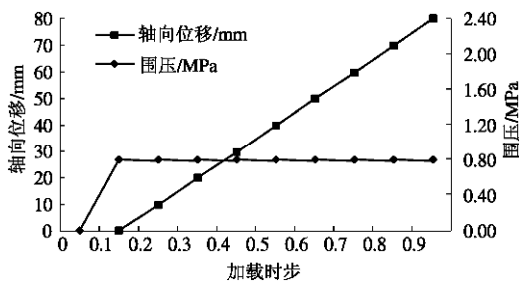


图 6 加载曲线

Fig. 6 Loading curves

3.1 颗粒的运动规律

随机堆石颗粒模型在各围压下的变形如图 7 所示（图中 ϵ_1 为轴向应变）。围压为 0.8 MPa 时，峰值偏应力为 3.52 MPa，相应的轴向应变为 11.64%，模型的上下端出现圆锥形的“死区”，该部分颗粒只有轴向位移，侧向位移很小，在上下端“死区”之间有一条较明显的 X 型剪切破坏带，在加载的后期，模型的侧向出现明显的鼓胀现象，符合一般试验规律；在围压为 1.6 MPa 时，峰值偏应力为 7.04 MPa，相应的轴向应变为

15.4%，其颗粒运动规律与围压为 0.8 MPa 时相似。

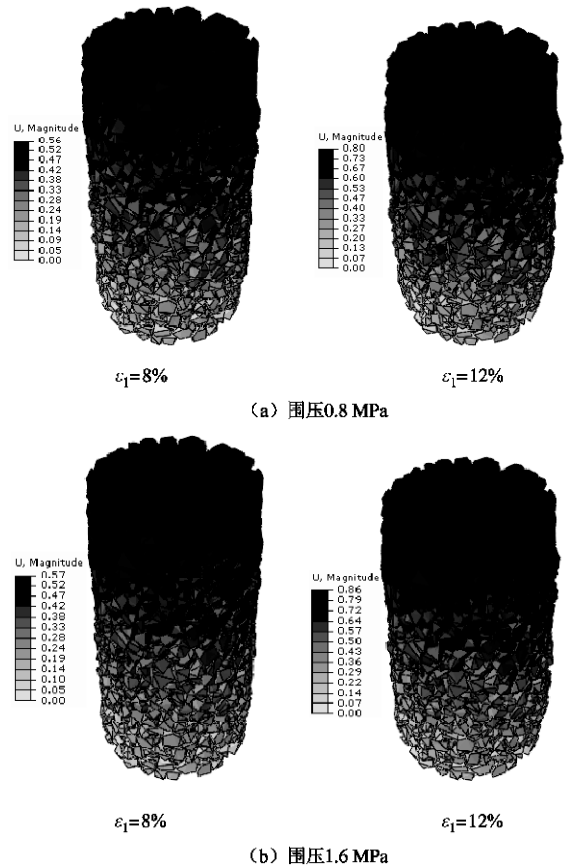


图 7 随机颗粒模型的变形

Fig. 7 Displacements of stochastic granule model

观察颗粒在整个加载过程中的运动规律，在施加围压阶段，堆石体颗粒开始滑移、滚动，少部分颗粒出现损伤和破碎，颗粒被紧密压实，呈现出明显的上部位移大、下部位移小的特征，符合一般规律。逐渐施加轴向位移，颗粒被进一步压实，伴随着颗粒不断地损伤和破碎，当超过峰值应变后，开始发生错动，侧向明显鼓胀起来。在整个加载过程中顶部三角区有较大位移，中部次之，下部最小，整个堆石体从中间部位开始错动破坏，这和试验结果基本一致。

3.1 应力 - 应变关系

随机堆石颗粒模型在各围压下的偏应力与轴向应变关系曲线如图 8 所示。从图 8 可以看出，在加载的初始阶段，偏应力随轴向应变的增长有较快增长，这说明堆石体在围压作用下还没有完全压实；随着轴向应变的进一步加大，偏应力缓慢地增大，直达到峰值偏应力，此后曲线出现软化，随着轴向应变的增大，偏应力有所减小。不同围压下的随机堆石颗粒模型的偏应力 - 轴向应变关系呈现略微硬化的弹塑性关系，达到峰值偏应力后，表现出应变软化的特性。由图 8 可以看出，不同围压下的轴向应变 - 偏应力数值模拟结果和试验结果符合的较好。由轴向应变 - 体积应变关

系曲线可以看出, 在加载的初始阶段, 堆石体出现剪缩, 随着加载的进行, 堆石体由剪缩转为剪胀。不同围压下的轴向应变 - 体积应变数值模拟结果和试验结果的规律比较相似, 但数值上差别较大, 主要是由于随机颗粒模型中略去了小粒径颗粒数, 大颗粒错动比较明显。

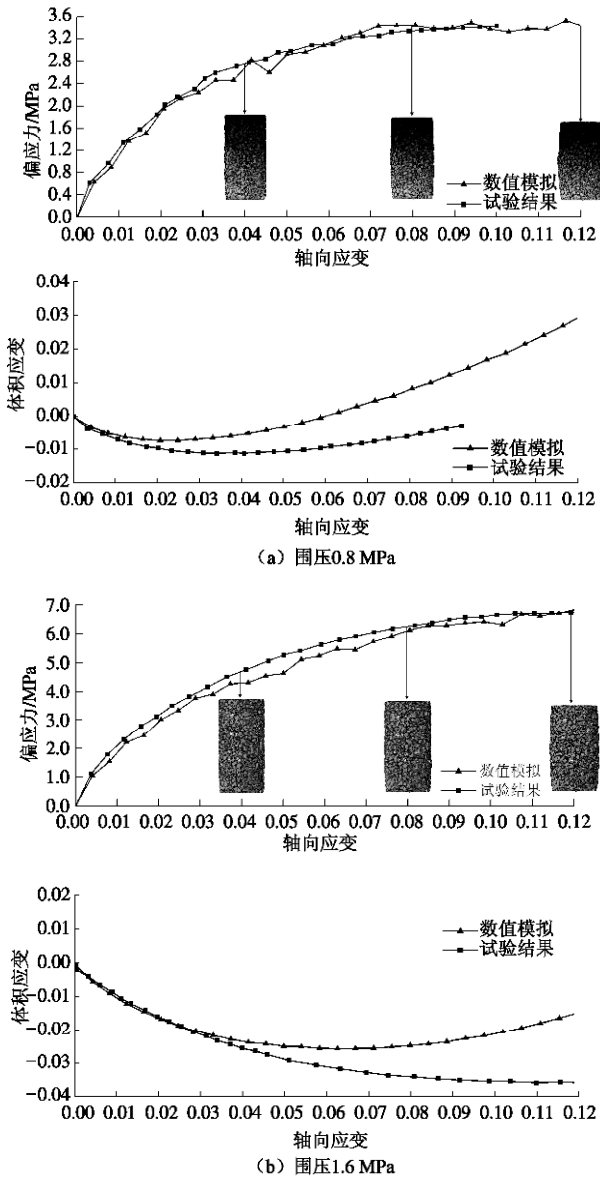


图 8 随机堆石颗粒模型轴向应变 - 偏应力与轴向应变 - 体积应变曲线

Fig. 8 Deviatorial stress-axial strain curves of stochastic granule models

从数值模拟的结果, 我们可以得出如下结论: 相同的轴向应变下, 围压越高, 偏应力也越大, 对应的剪缩体积应变越大, 剪胀体积应变越小; 围压越高, 峰值偏应力越大; 围压越高, 软化段越不明显。这和堆石体室内试验结果规律基本一致。

在建立随机颗粒模型的过程中, 考虑到计算能力

的限制, 略去了粒径较小的颗粒采用大颗粒等量替代, 以减小模型规模和计算成本, 所以数值模拟得到的轴向应变 - 偏应力曲线波动比较明显, 达到峰值偏应力后, 颗粒骨架发生比较明显地突然错动, 使得低围压下的曲线软化比较明显, 而实际堆石体颗粒级配完整, 错动应该是缓慢而持续地, 试验得到的轴向应变 - 偏应力曲线比较光滑、没有明显的软化。同样, 由于颗粒级配不完整, 失去了小粒径颗粒的填充, 大颗粒的滚动变得相对容易, 得到的轴向应变 - 体积应变曲线中剪缩体积应变较小, 而剪胀体积变形较大。

3.2 加载过程中的能量耗散

堆石体是一种复杂的不连续介质, 其在外荷荷载下的响应是颗粒间摩擦、颗粒破碎、颗粒变形、颗粒运动等综合作用的结果, 而轴向应变 - 偏应力、轴向应变 - 体积应变曲线只能从宏观上反映堆石体的力学变形特性, 不能描述各种作用在加载的不同阶段对宏观力学变形特性的影响大小。数值模拟方法可以方便地提取堆石体在加载过程中的各种能量及其变化的过程, 通过分析堆石体的弹性应变能、损伤破碎耗散能、摩擦耗散能、黏性效应耗散能 (由于材料阻尼耗散的能量)、系统动能在堆石体加载过程中占系统总能量的比重, 可以反映颗粒变形、颗粒破碎、颗粒间摩擦、颗粒运动在加载的不同阶段对整个系统的贡献大小。图 9 为随机颗粒模型在各个时步的各种能量与系统总能量之比。

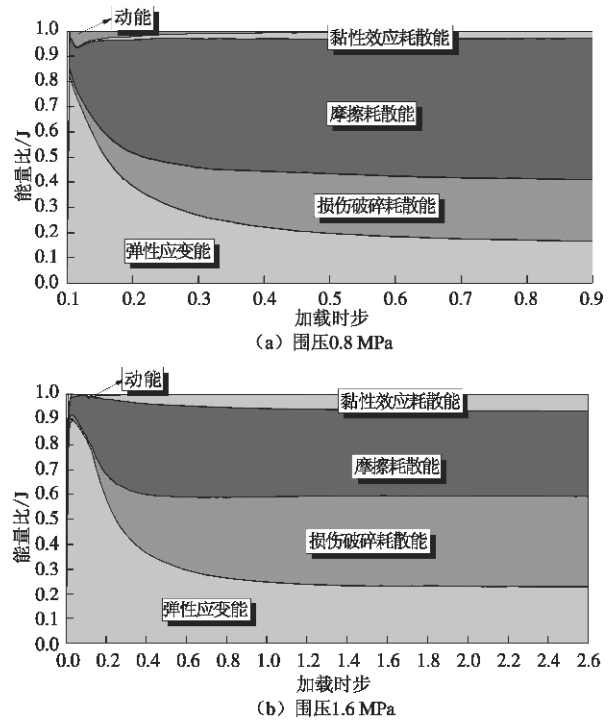


图 9 随机堆石颗粒模型能量耗散过程

Fig. 9 Course of energy dissipation of stochastic granule models

从图9可以看出,在加载的初始阶段,堆石体主要发生颗粒的弹性变形,随着加载的进行,颗粒间出现相互错动,摩擦耗散能占系统总能量的比重逐渐增大,此后,颗粒出现损伤和破碎,损伤破碎耗散能的比重逐渐增大。系统动能和由于体积黏性效应产生的能量耗散在整个加载过程中的比重都很小。围压越低,颗粒间摩擦作用越明显,围压越高,颗粒的损伤破碎效应越显著。

可以看出,颗粒间摩擦、颗粒破碎和颗粒自身变形是影响堆石体系统的3个重要内因,合理的数值模拟方法必须同时考虑这3个作用,目前一些将堆石体作为刚性体,不考虑颗粒破碎的方法值得商榷。

4 结 论

(1)采用随机模拟技术生成具有一定级配特征的三维随机颗粒模型,由于颗粒在不等边椭球内生成,且颗粒顶点数随机均匀分布,产生的颗粒形状随机性好。同时本文采用的分离判别方法较其他方法更简洁,容易实现,颗粒生成效率高。

(2)采用变形体离散单元法,基于修正的增广Lagrangian算法的非线性接触算法模拟颗粒间的相互接触,采用损伤软化模型描述细观单元的应力应变关系,当细观单元的损伤度超过某一阈值时删除该单元,采用Weibull概率分布函数描述堆石材料物理力学性质的非均匀性。

(3)以水布垭面板堆石坝茅口组堆石为研究对象,采用应变控制式加载进行三轴剪切试验的细观数值模拟。结果表明,数值模拟结果能够较好地反映堆石体三轴试验的瞬时变形规律,颗粒运动规律与堆石体三轴试验规律基本一致,试验得到轴向应变-偏应力曲线与试验曲线吻合的较好,轴向应变-体积应变曲线符合试验规律但数值上仍有一定差距,主要是由于随机颗粒模型中略去了较小粒径的颗粒。

(4)堆石体是一种复杂的不连续介质,其在外荷载下的响应是颗粒间摩擦、颗粒破碎、颗粒变形、颗粒运动等综合作用的结果,本文从能量角度分析了堆石体的颗粒变形、颗粒间摩擦、颗粒的损伤破碎、颗粒运动在不同加载阶段对堆石体系统的贡献,认为针对堆石体等散粒体材料的数值模拟方法必须同时考虑颗粒变形、颗粒破碎和颗粒间摩擦这三个主要作用。

(5)堆石体的宏观力学特性是颗粒摩擦、变形、破碎、运动等效应综合作用的结果,因此宜系统分析各个作用效应。小粒径颗粒对堆石体的力学特性影响较大,特别是对体积变形,而限于目前的计算能力,

略去了较小粒径的颗粒,使得数值模拟的结果与试验结果仍有一定的差距。采用删除单元的方式考虑颗粒破碎与实际情况有一定的差别,会对数值模拟结果产生一定的影响,本文数值模拟时围压不大,被删除单元的数目占随机颗粒模型的比例较小,大多数单元处于损伤状态,但在高围压下颗粒破碎比较明显时,采用删除单元的方式将产生较大的误差。

参考文献:

- [1] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive, large scale movements in blocky rock systems[C]// Proceedings of the ISRM Symposium on Rock Fracture. Rotterdam: A. A. Balkema, 1971: 129 - 136.
- [2] ZHANG C H, PEKAU O A, JIN F. Application of distinct element method in dynamic analysis of high rock slope and blocky structures[J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 1997, 16(6): 385 - 394.
- [3] SU S, STEPHANSSON O. Effect of a fault on in situ stresses studied by the distinct element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(1): 93 - 99.
- [4] 周 健, 池 永. 土的工程力学性质的颗粒流模拟[J]. 固体力学学报, 2004, 25(4): 377 - 382. (ZHOU Jian, CHI Yong. Simulating soil properties by particle flow code[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2004, 25(4): 377 - 382. (in Chinese))
- [5] KEMENY J. Time-dependent drift degradation due to the progressive failure of rock bridges along discontinuities[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(1): 35 - 46.
- [6] ROCKEFELLER R T. Augmented Lagrange multiplier functions and duality in non-convex programming[J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 1974, 12(2): 268 - 285.
- [7] 郭培玺, 林绍忠. 粗粒料力学特性的 DDA 数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(1): 58 - 60. (GUO Pei-xi, LIN Shao-zhong. Numerical simulation of mechanical characters of coarse granular materials by discontinuous deformation analysis[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(1): 58 - 60. (in Chinese))
- [8] 周 伟, 常晓林, 周创兵, 等. 堆石体应力变形细观模拟的随机散粒体不连续变形模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 491 - 499. (ZHOU Wei, CHANG Xiao-lin, ZHOU Chuang-bing, et al. Stochastic granule discontinuous deformation model of rockfill and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3):

- 491 - 4995. (in Chinese))
- [9] 李世海, 汪远年. 三维离散元土石混合体随机计算模型及单向加载试验数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(2): 172 - 177. (LI Shi-hai, WANG Yuan-nian. Stochastic model and numerical simulation of uniaxial loading test for rock and soil blending by 3D DEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(2): 172 - 177. (in Chinese))
- [10] 油新华. 土-石混合体的随机结构模型及其应用研究[博士学位论文][D]. 北京: 北方交通大学, 2001. (YOU Xin-hua. Stochastic structural model of the earth-rock aggregate and its application(PhD thesis)[D]. Beijing: Northern Jiaotong University, 2001. (in Chinese))
- [11] 徐文杰, 胡瑞林, 岳中崎. 土-石混合体随机细观结构生成系统的研发及其细观结构力学数值试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(8): 1652 - 1665. (XU Wen-jie, HU Rui-lin, YUE Zhong-qi. Development of random mesostructure generating system of soil-rock mixture and study of its mesostructural mechanics based on numerical test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(9): 1652 - 1665. (in Chinese))
- [12] 刘光廷, 高政国. 三维凸型混凝土骨料随机投放算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, **43**(8): 1120 - 1123. (LIU Guang-ting, GAO Zheng-guo. Random 3D aggregate structure for concrete[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2003, **43**(8): 1120 - 1123. (in Chinese))
- [13] CHANG X L, ZHOU W. A contact model on basis of the augmented Lagrange method and engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(9): 1568 - 1572.
- [14] 张楚汉, 金峰. 岩石和混凝土离散-接触-断裂分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. (ZHANG Chun-han, JIN Feng. Discrete-contact-fracture analysis of rock and concrete[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese))
- [15] MATSUMOTO M, NISHIMURA T. Mersenne twister: a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator[J]. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, 1998, **8**: 3 - 1. (in Chinese))
- [16] 梁正召, 杨天鸿, 唐春安. 非均匀性岩石破坏过程的三维损伤软化模型与数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(12): 1448 - 1452. (LIANG Zheng-zhao, YANG Tian-hong, TANG Chun-an. Three-dimensional damage soften model for failure process of heterogeneous rocks and associated numerical simulation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(12): 1447 - 1452. (in Chinese))
- [17] 梁正召, 唐春安, 张永彬, 等. 岩石三维破裂过程的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(5): 931 - 936. (LIANG Zheng-zhao, TANG Chun, ZHANG Yong-bin, et al. 3D numerical simulation of failure process of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(5): 491 - 4995. (in Chinese))