

DOI: 10.11779/CJGE201505008

基于不规则颗粒离散元的土石混合体大三轴数值模拟

金 磊¹, 曾亚武^{1*}, 李 欢¹, 李晶晶²

(1. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 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, 湖北 武汉 430071)

摘要: 在基于 CT 扫描的不规则颗粒三维离散元精细建模技术的基础上, 提出了一种不规则块石三维离散元模型随机生成技术, 并建立了符合宏观统计规律的土石混合体三维离散元模型。进行了含石量为 0, 10%, 30%, 50%, 70%, 90% 的土石混合体大三轴试验数值模拟研究, 对各种含石量下土石混合体的力学特性和变形破坏机理进行了深入地分析探讨。结果表明: 随着含石量的增加, 试样峰值强度、残余强度、弹性模量和破坏应变逐渐增大, 剪缩性减小, 剪胀性增强; 加载初期, 微裂纹主要在块石颗粒与土颗粒之间形成, 发展速度很快, 而后则主要在土颗粒间形成和扩展, 含石量越大, 块石周围微裂纹比例越高, 局部剪切带越不规则, 分布也越分散; 高含石量 (70%, 90%) 的土石混合体在加载初期即有比较明显的相互摩擦, 随后块石相互接触、咬合与相对摩擦、滑移交替出现。

关键词: 不规则颗粒; 土石混合体; 三维离散元; 含石量

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)05-0829-10

作者简介: 金 磊(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土体变形破坏机理等方面的研究。E-mail: whujinlei@whu.edu.cn。

Numerical simulation of large-scale triaxial tests on soil-rock mixture based on DEM of irregularly shaped particles

JIN Lei¹, ZENG Ya-wu¹, LI Huan¹, LI Jing-jing²

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on the refined method for constructing DEM model based on the computed tomography scanning of irregularly shaped (IRS) particles, a random technique for constructing DEM model for IRS rock block is proposed, and 3D DEM models for soil-rock mixture (SRM) which conforms to the macroscopic statistical rule are established. In order to study the mechanical properties and deformation mechanism of SRM with various rock block proportions (RBP), DEM numerical simulations of large scale triaxial tests are conducted. It is noteworthy that with the increase of RBP, the peak strength, residual strength, elastic modulus and axial strain at peak strength all increase. The increase of RBP leads to the increase of shear dilatancy deformation and the decrease of shear contraction deformation. During the initial period of axial loading, the microcracks originate mainly from the contacts between rock particles and soil particles very quickly and then develop in the soil matrix. With the increase of RBP, the proportion of microcracks around the rock particles increases, and local shear bands become more and more irregular and scattered. The rock particles of SRM with high RBP exhibit obvious inter-friction just in the early period, and then their inter-locking and relative sliding appear alternately.

Key words: irregularly shaped particle; soil-rock mixture; DEM; rock block proportion

0 引言

土石混合体是指广泛分布于地壳浅表层的由于滑坡堆积、崩塌堆积、水流堆积和风化残积等地质作用形成的由强度较高的碎块石和细粒土体组成的松散的弱胶结的地质体, 如三峡库区和西南山区广泛存在的浅表层的滑坡堆积体等^[1], 研究土石混合体变形破坏机理对于防治滑坡等地质灾害具有重要的社会经济意义。

近年来, 针对土石混合体这种特殊地质体, 国内外许多学者对其物理力学特性、渗透特性和变形破坏机制等进行了较为系统的研究, 取得了一系列研究成果。有关土石混合体的研究主要包括土石混合体原位

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41272342)

收稿日期: 2014-08-24

*通讯作者

地质调查^[2-3]、大型原位试验^[4-5]、室内试验^[6-7]和数值模拟。在数值模拟方面,徐文杰等^[8-9]和贾学明等^[10]分别采用有限元和离散元对土石混合体的大型直剪试验进行了数值模拟,分析了含石量和试样尺寸等对土石混合体力学特性的影响以及剪切面的特征。廖秋林等^[11]提出了一种基于数码图像的土石混合体结构模型自动生成方法,利用有限元分析了土石混合体在单轴压缩下应力场的结构效应。李世海等^[12]基于一种可变形块体离散元建立了土石混合体的三维随机模型,研究了单轴压缩下土石混合体内部应力场分布与含石量和块石大小的关系。丁秀丽等^[13-14]分别采用有限元和二维颗粒流对基于数字图像的土石混合体模型和土石混合体随机模型进行了双轴数值试验模拟,分析了土石界面摩擦、含石量和饱和度等因素对土石混合体力学特性的影响。国际上许多学者将具有不同形状和大小的块石镶嵌于细粒土体基质中的这种构造(见图1)的地质体称为bimrocks或混杂岩(mélanges)^[15]。Graziani等^[3]对某大坝基础附近的断层破碎带的填充成分(土石混合体)进行了双轴试验和直剪试验的二维颗粒流模拟,分析了含石量、块石形状和围压等因素的影响规律。

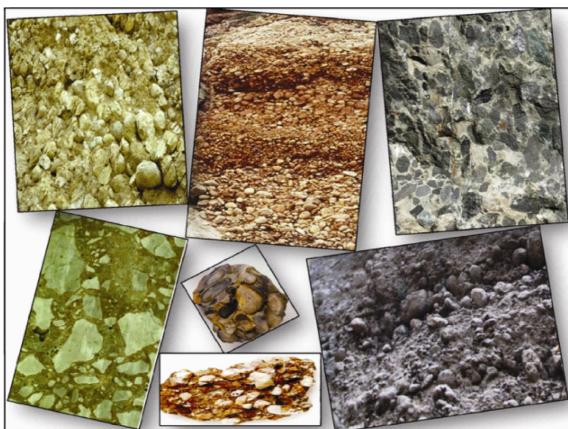


图1 典型土石混合体试样和露头^[16]

Fig. 1 Typical specimens and outcrops of SRM^[16]

土石混合体具有典型的非均质和非连续性,在力学性质上表现出强烈的各向异性,采用传统的建立在宏观连续介质上的力学模型和相应的分析方法,难以合理描述和反映其内部结构的复杂性,也难以从细观水平上揭示其变形破坏机理,而离散元法则能较好地解决上述难题。基于基本球体的颗粒流程序PFC^{3D}所采用的接触关系较之块体离散元有了很大的简化,接触搜索耗时大大降低,计算效率显著提高,有着明显的优势。

目前土石混合体细观结构模型的生成方法主要包括基于数字图像处理的模型生成技术和基于统计分析

层次上的随机模型生成技术。前者是研究原位实际情况的一种有效的手段和方法,但是也存在一些不足,例如很难对所有研究区域进行拍照;很难找到为某种研究目的而需要的理想剖面^[2];而且图像处理得到的仅是露头处的局部的平面情形。后者是根据土石混合体结构组成在宏观层次上的统计规律性,建立其相应的细观结构模型,更适合于开展机理性研究,如研究不同含石量对土石混合体物理力学特性和变形破坏机理的影响等。

鉴于上述分析,建立土石混合体三维离散元随机模型,采用颗粒流程序进行数值模拟和分析是从细观水平上研究土石混合体变形破坏机理的一个比较合适的方法。从前文列出的已有成果可以看出,目前对土石混合体的颗粒流模拟主要集中在二维的情形,而且绝大多数都没有考虑块石形状的影响,对其变形破坏的细观机理研究得还不够深入。在含石量对土石混合体力学特性影响的研究成果中,考虑的含石量都分布在中低量的水平上(70%以下),而未见高含石量下的数值模拟研究。笔者在所在课题组已有的基于CT扫描的不规则颗粒三维离散元精细建模技术的基础上提出了一种不规则块石几何模型随机生成技术,进而可以建立不规则块石的三维离散元随机模型;根据土石混合体中块石形状、大小、位置和方向的统计特征,建立符合宏观统计规律的土石混合体三维离散元随机模型;对土石混合体大三轴试验进行了颗粒流数值模拟,重点分析了各含石量(0, 10%, 30%, 50%, 70%, 90%)的土石混合体的应力应变关系特征、体变特征、裂纹扩展特征和摩擦功特征,从多个方面、多个尺度上对各含石量的土石混合体的变形破坏机理进行了深入地分析,获得了一些有意义的结论。

1 不规则块石随机模型

土石混合体中块石颗粒形状和大小在一定程度上反映了其形成历史,土石混合体的宏观力学行为取决于细观水平上颗粒之间的相互作用,而颗粒形状是影响颗粒间相互作用的一个非常重要的因素。已有颗粒材料的研究结果表明:颗粒形状越不规则,自然堆积状态下孔隙比越大、整体刚度越小、临界摩擦角越大、对应力状态的变化越敏感^[17]。因此,要准确模拟土石混合体的力学性质和运动特性,必须首先实现不规则块石的模拟。

1.1 不规则块石随机几何模型

目前对随机形状块石的模拟多见于混凝土中粗骨料的研究,已有的建模方法基本上可分为两种,一种是通过将随机生成的三角形或多边形或具有简单数学

表达的曲面作为基, 然后按一定算法进行延拓生成骨料, 并通过凹凸判断来控制骨料为凸形, 最后通过冲突判断来实现骨料的无重叠投放^[18]。另外一种方法则是将基本几何体用多个平面进行随机切割来获得随机多面体模型^[19]。已有的这些随机块体建模方法算法都比较复杂, 效率也都不高, 很难生成高含石量的模型, 而且随机块体都是凸体, 而实际的土石混合体滑坡中的块石体更多表现为凹凸并存, 因此有必要提出一种新的适用于模拟土石混合体中块石形态特征的建模方法。

目前国际上对不规则颗粒形态的描述主要是分3个尺度来进行: 第一个是颗粒尺寸尺度上的, 可以定义为球度, 它反映了颗粒的总体形状, 表示颗粒三向尺寸(长、宽、高)之间的比例; 第二个是比颗粒尺寸小一个数量级尺度上的, 可以定义为凹凸度, 它反映了颗粒表面的宏观凹凸程度; 第三个是细观尺度上的颗粒表面的粗糙度。为了更好地模拟土石混合体中块石体的随机几何形态, 本文提出了一种基于APDL(ANSYS参数化设计语言)参数化建模的随机块石体建模新技术。现将该技术的主要原理和步骤概述如下:

(1) 随机球度基面生成

将实际块石体三向尺寸中最大的作为建模时X向长度, 根据另外两个方向的长度与X向长度之比得到Y向长度和Z向长度(规定Y向长度比Z向长度大)。根据得到的X, Y, Z向尺寸即可建立一个中心在原点的长方体, 删掉长方体, 保留组成长方体的6个面, 即可得到规定球度的基面。

应用时可根据实际统计得到的块石三向尺寸的特征, 设定三向尺寸的随机数变化范围, 由此可得到符合实际统计规律的随机球度的基面。

(2) 随机凹凸面生成

将第一步得到的球度基面划分网格, 单元形状宜选择三角形壳单元, 单元尺寸可根据颗粒表面凹凸点个数确定, 如较少(4个左右)则可将各边的分段个数设为1, 以此类推。划分网格后记录各三角形面单元的组成节点信息, 得到各个节点的球坐标, 然后对各节点球坐标中的第一个分量(该节点到原点的距离)进行随机比例的缩小变换, 随机数的取值范围根据实际颗粒表面凹凸程度确定。接下来根据前面记录的三角形面单元与其组成节点的关系以及随机变换后的新节点坐标重新生成面, 即可得到需要的随机凹凸度的曲面。

(3) 随机几何模型生成

根据变换后得到的随机曲面围成的空间即可建立随机几何体模型, 将单元类型改为四面体单元, 对生

成的几何体进行体网格划分, 即可得到满足后续离散元建模要求的几何模型。

根据已有土石混合体中块石形态特征的统计调查并经试算对比, 本文在块石随机模型的生成过程中进行了一定的简化, 将块石颗粒Y, Z向尺寸设为相同, Y, Z向长度与X向长度比值设为在0.3~0.8的范围内随机取值, 初始随机基面网格划分尺寸设为每个边的分段数为2, 各节点球坐标第一分量缩小比例在0.4~1的范围内随机取值。在上述参数取值情形下, 由第一步得到的某个随机球度的基面(X向长度为40 mm)如图2(a)所示, 由第二、三步得到的随机几何模型(进行体网格划分之前)如图2(b)所示。

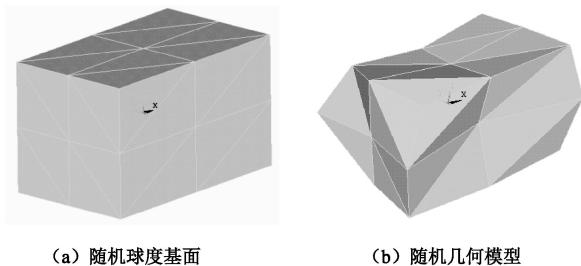


图2 典型不规则块石几何模型

Fig. 2 Typical geometrical model for IRS rock block

从以上建模方法和结果可以看出, 本文提出的建模方法简单实用, 只需要经过三步操作即可获得与实际土石混合体中块石相似度较高的随机几何模型, 而且建模过程也完全按照不规则颗粒形态的3个尺度的定义进行控制, 具有独特的优势。至于不规则颗粒表面的粗糙度, 几何模型中暂不用考虑, 因为一方面可以通过数值模拟时对颗粒设定不同的细观摩擦系数来表示, 另一方面由基本球体填充后建立的离散元数值模型的表面是不平整的, 可近似模拟粗糙度。

1.2 不规则块石离散元模型及其密度优化

根据1.1节方法所得到的不规则块石几何模型, 利用本课题组已提出的基于CT扫描的不规则颗粒三维离散元精细模拟技术^[20], 可以获得不规则块石的三维离散元模型, 从而可以用于土石混合体的三维颗粒流数值模拟。现将主要步骤归纳如下:

(1) 针对所获得的已划分网格的不规则块石几何模型, 导出模型的表面节点坐标和内部节点坐标信息。

(2) 对于任意一个内部节点, 计算其到每个表面节点的距离, 只记录并存储其中的最小值。对所有内部节点都进行一次计算, 即可得到所有内部节点到表面各自对应的最小距离值。然后以内部节点为球心, 以对应的最小距离值为半径生成球体。所有的球体组合就能刻画出不规则块石的外形。

(3) 根据研究需要, 引入最小球体半径 R_{\min} 和有

效空间系数 K 来对基本填充球体数量进行优化, 以节省计算资源。

图 2 (b) 中建立的不规则块石几何模型划分体网格后有 2314 个表面节点和 6671 个内部节点, 则初始填充球个数为 6671 个, 这样生成颗粒集合体时球体数量将会非常庞大, 造成计算效率降低, 因此需要引入控制参数进行优化。这里, 最小球体半径 R_{lim} 取为 2 mm, 有效空间系数 K 取为 1.10, 优化后的离散元模型如图 3 所示, 该离散元模型由 544 个球体构成。由图 3 可见, 优化后的模型填充球体数大大减少, 能基本刻画图 2 (b) 中几何模型的形态特征, 而且可以大大节省计算资源。

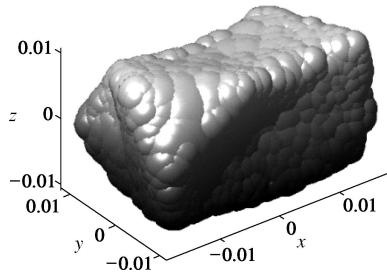


图 3 典型不规则块石三维离散元模型

Fig. 3 Typical DEM model for IRS rock block

基于基本球体重叠构建不规则块石的建模方法不可避免地会出现模型密度分布不均匀的现象, 为此本文采用平均密度的方法使得模型的质量与实际块石的质量相等, 表达式为

$$\rho_m = \frac{V_{\text{clump}} \cdot \rho_0}{\sum V_i} , \quad (1)$$

$$\sum V_i = \sum V_i^{\text{overlap}} + V_{\text{clump}} . \quad (2)$$

式中 ρ_m 为优化后各球体赋值密度; V_{clump} 为模型体积; ρ_0 为颗粒实际密度; V_i^{overlap} 为每个球体中重叠的体积。

2 土石混合体三维离散元建模

2.1 颗粒流 (PFC^{3D}) 概述

三维颗粒流是根据颗粒离散元理论, 采用显示差分算法, 交替运用力-位移定律和牛顿运动定律来模拟颗粒之间的相互作用和运动过程。PFC^{3D} 提供了 3 种基本的接触模型, 分别为接触刚度模型、滑移模型和黏结模型。其中黏结模型分为接触黏结和平行黏结。根据土石混合体的结构组成特征, 本文选取接触刚度模型、滑移模型和接触黏结模型来进行模拟。

PFC^{3D} 中提供了 clump 以供不规则颗粒的模拟, 它由基本的球体颗粒聚集而成, 组成颗粒间相对位置保持固定, 组成颗粒间的接触计算在循环的过程中被

跳过, 因此大大节约了计算时间。clump 边缘颗粒与其外部颗粒产生相互作用, 但是不管是否有接触力作用在其上面, clump 不会解体。土石混合体中的块石的强度和刚度较细粒土体基质要大得多, 因此采用 clump 来模拟不规则块石是比较合适的。

在后处理方面, PFC^{3D} 可以获得模型的速度场、位移场、接触力等信息。利用 history 可以对各种变量的变化过程进行采样和存储。利用内嵌的 fish 语言编程, 还可以获得其它更多的信息, 比如记录黏结的破裂即微裂纹的形成情况。PFC 颗粒模型微裂纹的定义: PFC 颗粒试样的微裂纹只能在有黏结的颗粒之间形成, 潜在微裂纹的个数和位置都受初始试样中黏结的个数和位置所限制。每个微裂纹的几何形态和位置都取决于母颗粒 (形成该处黏结的两个颗粒) 的尺寸和当前位置。这里将微裂纹抽象地定义为圆柱体, 其几何形态和位置由厚度、半径、单位法向量和形心位置描述。其中厚度即为微裂纹的宽度, 也就是两个母颗粒的间隙; 半径为圆柱二分面和公切面的交界面长度一半; 单位法向量沿着两个母颗粒的球心连线方向; 形心位于两个母颗粒球心连线上, 并平分两球的间隙。上述几何关系如图 4 所示, 其中两个母颗粒球标记为 A 和 B。圆柱体厚度为

$$t_c = d - (R^{[A]} + R^{[B]}) , \quad (3)$$

式中, d 为两球心之间的距离, R 为颗粒球的半径。形心位置为

$$x_i = x_i^{[A]} + (R^{[A]} + t_c/2)n_i , \quad (4)$$

式中, $x_i^{[A]}$ 为球心坐标, n_i 为从 A 球心指向 B 球心的单位法向量。圆柱的半径为

$$R_c = R^{[A]} + (R^{[B]} - R^{[A]})[(R^{[A]} + t_c/2)/d] . \quad (5)$$

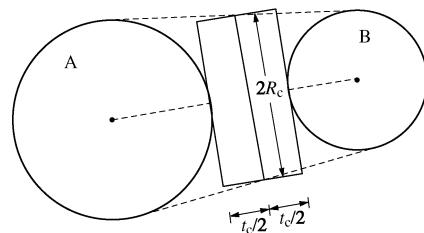


图 4 微裂纹几何形状和位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of geometry and position of a microcrack

通过编制微裂纹监测及绘图程序包, 可以对试验过程中黏结发生破裂事件 (形成微裂纹) 进行追踪, 并记录发生时间、位置和破裂类型 (拉裂或剪裂) 等相关信息, 统计微裂纹的数量, 并在微裂纹形成位置使用八边形或圆形等来进行标记并可以绘图显示, 以

供观察研究^[21]。

本文在已有微裂纹监测及绘图程序包的基础上进行了二次开发, 从多个方面对土石混合体三轴试验中微裂纹的演化规律进行了分析。

2.2 土石混合体大三轴数值试样的生成

本文研究所建立的大三轴数值试样是直径为 200 mm, 高度为 500 mm 的圆柱形试样。根据 Medley^[15] 研究, 土石阈值可定义为

$$d_{S/RT} = 0.05L_c, \quad (6)$$

式中, $d_{S/RT}$ 为土/石阈值, L_c 为土石混合体的工程特征尺度, 对于三轴试验试样, 可取为试样直径。因此本文的土/石阈值可定为 10 mm。考虑到当前计算机的计算能力, 为了提高计算效率, 本文对土石混合体颗粒级配进行了一定的简化处理, 土体颗粒简化为球体, 粒径取值范围为 8~10 mm, 块石粒径简化为在 20~40 mm 范围内服从正态分布, 这里所说的粒径并不是块石的实际粒径, 而是指与该粒径的球体体积相同的当量粒径。采用第 1 节所述的土石混合体中块石的形态特征参数取值范围和随机建模方法建立 20~40 mm 范围内块石的随机离散元模型库, 本次研究所建立的块石颗粒库包括 100 个粒径的随机颗粒, 基本满足统计规律的要求。

建立随机颗粒库以后, 就可以着手建立土石混合体大三轴数值试样了。首先要将块石投放到随机的位置上, 这里提出一个简单实用的方法: 先利用 PFC^{3D} 中 generate 命令生成的球体不会重叠的特点, 在比试样高一些的空间中生成较大量数目的粒径较大的球体 (为了避免投放的块石重叠), 则这些球体的球心坐标是随机的, 将这些坐标输出即可获得足够的空间随机点坐标; 选取第一个随机点的坐标, 随机选择颗粒库中的颗粒球体坐标文件, 利用 C++ 语言编制程序将选择的颗粒平移到选取的相应的随机点上, 同时进行随机旋转, 这样就投放好了第一个块石颗粒; 同理继续投放, 直到块石颗粒的总体积达到需要的含石量; 投放结束以后, 在 PFC^{3D} 平台上试运行块石颗粒文件, 查看有无接触, 若无接触即满足要求, 若存在接触则需重新设定取随机坐标的空间高度或者球体直径大小。

块石投放结束以后, 可以通过半径膨胀法生成符合级配要求的土体。这里根据所需的含石量 (块石体积与土石总体积的比值) 计算土颗粒和块石颗粒体积时, 试样孔隙率假设为 0, 这样得到的初始试样是比 500 mm 高一些的颗粒之间非常疏松的颗粒集合体。然后, 让颗粒在较大的重力加速度 (本文中取 4g) 下自由下落到基本达到平衡, 将位置高于 500 mm 的颗粒删除, 循环至平衡, 即可得到一个较为密实、块石

分布与实际较为相似的土石混合体大三轴数值试样。本文研究建立了含石量 (RBP) 为 0, 10%, 30%, 50%, 70%, 90% 的土石混合体大三轴数值试样。这里给出含石量为 0, 50% 和 90% 的大三轴试样的颗粒流模型, 如图 5 所示, 块石由不同颜色的 clump 表示。

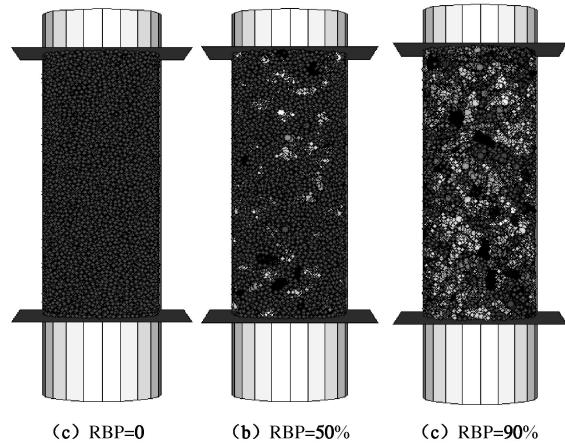


图 5 土石混合体大三轴数值试样

Fig. 5 Numerical specimens of SRM

2.3 模型参数和试验方法

参考已有土石混合体的文献并经试算, 本文选取了一组具有代表性的颗粒细观参数。其中, 土颗粒与土颗粒之间的接触黏结法向强度和切向强度设为 20 N, 土颗粒与块石颗粒之间的接触黏结法向强度和切向强度设为 2 N, 块石与块石颗粒间无接触黏结。上下边界墙的法向刚度为 1×10^9 N/m, 侧墙的法向刚度为 2×10^5 N/m, 切向刚度和摩擦系数均为 0。其它参数见表 1。

表 1 土石混合体细观力学参数

Table 1 Meso-mechanical parameters of SRM

颗粒	密度 /(kg·m ⁻³)	法向刚度 /(N·m ⁻¹)	切向刚度 /(N·m ⁻¹)	摩擦系数
土	2300	2×10^6	2×10^6	0.4
块石	2680	12×10^7	12×10^7	0.5

进行数值试验时, 首先要利用伺服控制程序加载并保持围压恒定, 模型的上下边界墙作为加载板, 加载速度为 0.05 m/s, 采用应变控制加载方式, 当轴向应变达到 15% 时停止加载并终止试验。本文研究围压选为 0.2, 0.4, 0.8 MPa。在加载过程中对轴向偏应力、轴向应变、体变、摩擦能、动能、应变能、微裂纹总数、剪切裂纹数、张拉裂纹数、土颗粒间裂纹数、土与块石颗粒间裂纹数等量进行了采样和记录, 以便后续进行分析。

3 土石混合体大三轴数值试验分析

3.1 应力 - 应变关系

根据以上模型数值试验结果, 绘制各含石量的土

石混合体的偏应力 - 轴向应变关系曲线, 这里给出 0.4 MPa (下同) 围压下的曲线, 如图 6 所示。

由图 6 可见, 随着含石量增大, 土石混合体的峰值强度、残余强度、弹性模量和破坏应变都随之增大, 这与已有文献中的结果是一致的。在含石量较低 (0, 10%, 30%) 时增大幅度较小, 在较高含石量 (50%, 70%) 时增大幅度明显提高, 而含石量为 90% 时表现尤为显著, 其峰值强度是同等条件下土体峰值强度的 3.5 倍。从曲线的峰前段形态可以看出, 在含石量较低时, 曲线较为平顺, 在轴向应变较小时基本为直线, 然后平稳过渡到峰值阶段; 而在含石量较高时, 轴向应变较小时也基本为直线, 但在过渡到峰值阶段过程中, 出现了若干应力水平波动和迅速增大交替的现象, 这可能是由于较高含石量形成的块石骨架调整位置造成的。从曲线的峰后段形态可以看出, 随着含石量增大, 应变软化特征越来越明显, 曲线波动也越来越剧烈, 这可能是由于较高含石量时块石之间相互接触、咬合与摩擦滑移、翻越不断交替造成的。

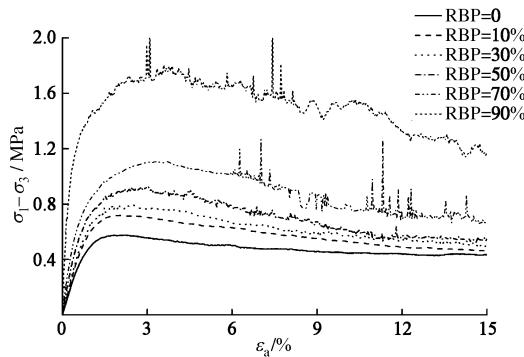


图 6 应力应变关系曲线

Fig. 6 Relationship between stress and strain

上述应力应变关系曲线表现出来的现象可以从细观的颗粒之间接触力的变化进行揭示, 这里给出轴向应变为 15% 时的各含石量的土石混合体接触力分布图, 如图 7 所示。为直观起见, 这里给出的接触力分布图是三轴试样一个中间纵截面上的, 接触力用两种颜色的短线表示, 压力为黑色, 拉力为深灰色, 其粗细代表了接触力的大小 (最粗的 5000 N), 球体用浅灰色的圆盘代替。

从图 7 可见, 随着含石量增大, 试样的孔隙率随之增大, 试样中块石之间的接触力数量随之增加, 大小也逐渐增大, 说明较高含石量的土石混合体中的块石已经相互接触、咬合, 形成了骨架结构, 整体性增强, 强度参数和变形参数均提高。

3.2 剪胀/剪缩性

剪切引起试样体积变化, 有可能导致试样体积收缩, 称为剪缩, 亦可能导致试样体积膨胀, 称为剪胀。

剪缩剪胀性可以通过体应变 - 轴向应变关系曲线进行探究。各含石量土石混合体的体变 - 轴向应变关系曲线见图 8, 纵轴为体变, 正值表示剪缩, 负值表示剪胀。

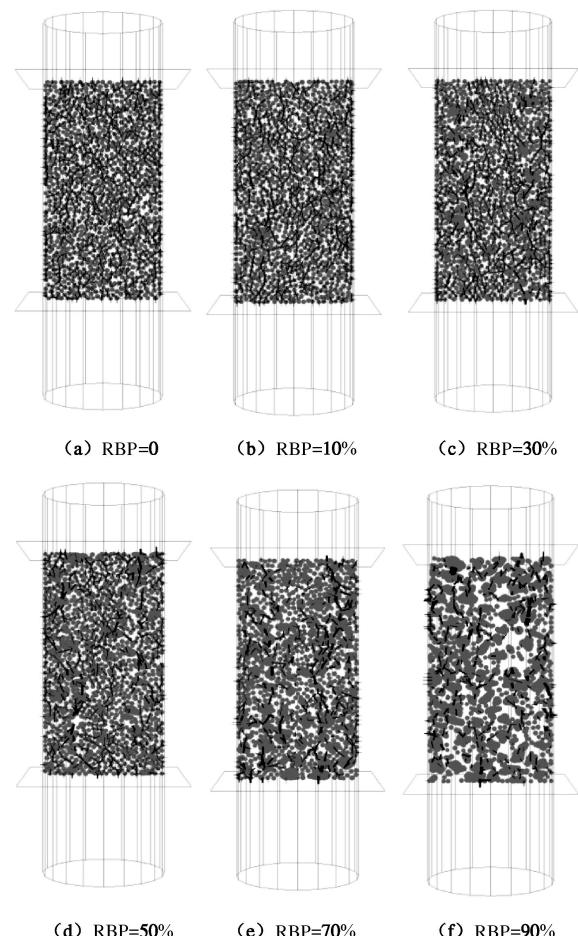


图 7 接触力分布图

Fig. 7 Distribution of contact forces

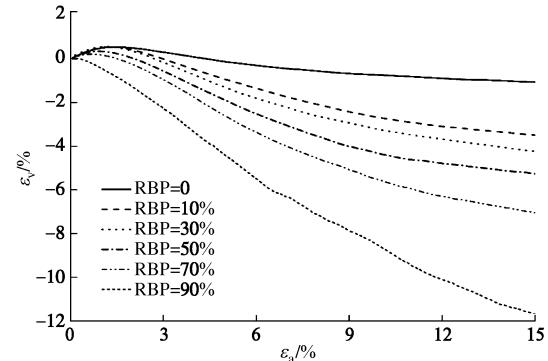


图 8 体变 - 轴变关系曲线

Fig. 8 Relationship between volumetric strain and axial strain

从图 8 可见, 各含石量的土石混合体在初始加载阶段均表现出一定程度的剪缩, 在轴向应变达到破坏应变以前即进入剪胀阶段, 剪胀幅度快速增大, 轴向应变较大时逐渐平稳。随着含石量增大, 剪缩性减小,

剪胀性增强。初始剪缩是由于试样的压密造成, 而随着轴向应变的增大, 颗粒之间相互错动与翻越, 体变增大, 不规则块石越多, 剪胀越明显。含石量为 90% 的土石混合体的剪缩性不明显, 剪胀性突出, 并且体变曲线有较为明显的波动, 这是由于块石之间咬合与错动交替进行所造成。

3.3 微裂纹演化机理

(1) 微裂纹类型

将加载过程中监测的微裂纹(颗粒间黏结破裂)总数、剪切破坏形成的微裂纹数和张拉破坏形成的微裂纹数随轴向应变的发展绘成曲线如图 9 所示。

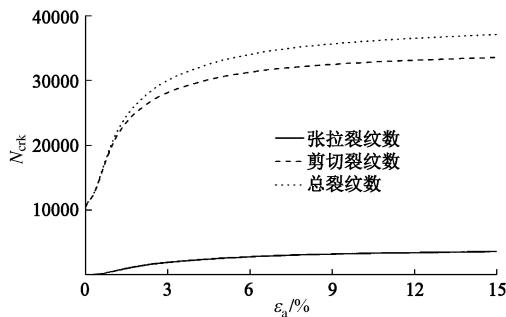


图 9 不同类型微裂纹数与轴向应变关系曲线

Fig. 9 Relationship between microcrack number of different types and axial strain

根据试验结果, 各含石量土石混合体的不同类型微裂纹数发展规律基本一致, 这里只给出含石量为 50% 的曲线图。从图 9 可见, 张拉裂纹数、剪切裂纹数和微裂纹总数的变化趋势基本一致: 加载初期微裂纹数比较少, 增长缓慢, 峰值前后发展迅速, 裂纹数量急剧增加, 后期趋于平稳。还可以看到, 张拉破坏形成的微裂纹数很少, 以剪切破坏形成的微裂纹为主, 这与大三轴试验中试样发生的主要剪切破坏是一致的。这里需要注意的是, 图 9 中剪切裂纹数在开始时不为 0, 这是由于试验过程中采样间隔设置较大(200 steps), 即开始加载时的一些循环中并没有采样。

(2) 微裂纹位置

将加载过程中监测的微裂纹总数、土颗粒与土颗粒间黏结破坏形成的微裂纹数和土颗粒与块石颗粒间黏结破坏形成的微裂纹数随轴向应变的发展绘成曲线如图 10 所示。

从图 10 可以看出, 加载初期, 微裂纹主要在块石颗粒与土颗粒之间形成, 发展速度非常快, 很小应变下即达到稳定, 而后则主要在土颗粒间形成和发展。这是因为模型中土颗粒与块石颗粒间的黏结强度为土颗粒间黏结强度的 1/10, 土颗粒与块石界面为土石混合体中的薄弱环节, 最容易发生破裂, 这与其它文献得到的结论是一致的。

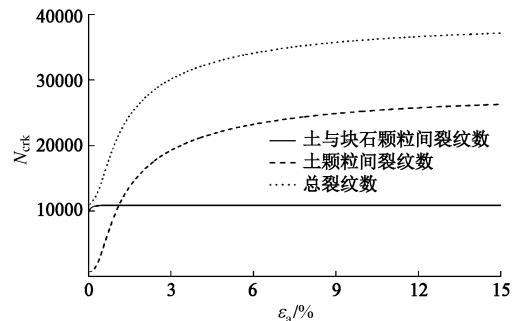


图 10 不同位置微裂纹数与轴向应变关系曲线

Fig. 10 Relationship between microcrack number at different locations and axial strain

(3) 不同阶段微裂纹特征

为了更直观地表现土石混合体大三轴试验过程中微裂纹的发生和发展情况, 现将各含石量的土石混合体在加载到峰值应力 P_u 的 50% 时、峰值应力 P_u 时和停止加载(end)时 3 个时刻的微裂纹分布图绘制出来。限于篇幅, 这里只给出具有代表性的含石量为 0, 30%, 90% 的分布图, 如图 11 所示。为清晰直观起见, 这里绘出的是中间纵截面前后各 2 mm 范围内的微裂纹, 微裂纹用八边形表示, 剪切裂纹为黑色, 张拉裂纹为深灰色, 球体用中间纵截面上的圆盘表示, 为浅灰色。

从图 11 可见, 各含石量的土石混合体在试验的 3 个阶段微裂纹的发展规律: 50% P_u 时微裂纹较少, 主要集中在块石颗粒与周围的土颗粒之间, 而含石量为 0 的土体中的微裂纹分布呈随机状态; 加载到峰值应力 (P_u) 时, 中低含石量 (10%, 30%, 50%) 的土石混合体试样中微裂纹数目大大增加, 主要集中在块石颗粒周围, 一部分在土颗粒之间, 说明破裂已开始向土体基质扩展, 而高含石量 (70%, 90%) 的土石混合体中微裂纹数目增加得不多, 主要在 50% P_u 前后出现; 加载结束时, 中低含石量的土石混合体试样中微裂纹数目进一步增多, 并且从宏观上来看, 裂纹绕过块石, 在块石周边和土体中相互贯通, 形成多个剪切带, 而高含石量的土石混合体由于填充的土体颗粒少, 孔隙多, 微裂纹仍主要集中在块石周围。可以看出, 含石量越大, 块石周围微裂纹比例越高, 局部剪切带越不规则, 分布也越分散。造成以上现象的原因, 笔者认为是不规则块石对微裂纹的演化发展起到了双重作用。一方面, 块石与土体接触处为薄弱环节, 裂纹往往沿着这些位置发生、扩展, 含石量增大就会导致微裂纹更加容易形成; 而另一方面, 由于块石自身强度和刚度都很大, 一定程度上阻碍和限制了土石混合体试样中微裂纹的扩展和贯通。这两个方面的综合作用最终导致了上述的微裂纹演化机制。

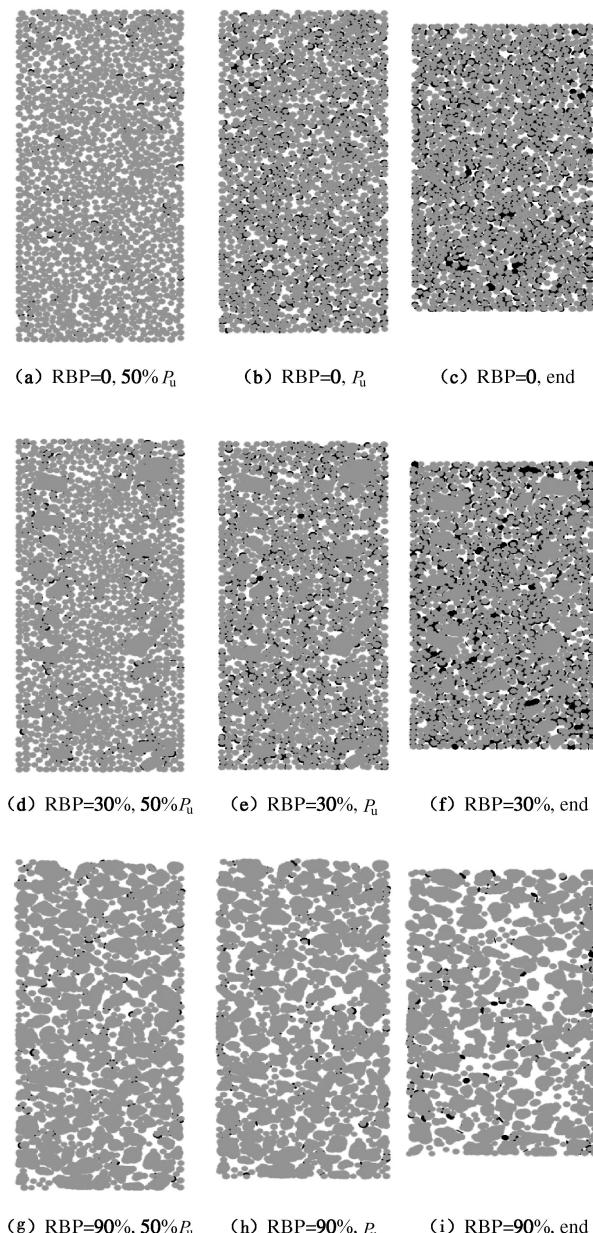


图 11 微裂纹演化图

Fig. 11 Evolution of microcracks

3.4 摩擦滑移分析

为了反映土石混合体大三轴数值试验过程中颗粒之间相互摩擦滑移的特征, 可以从试验过程中摩擦功随轴向应变的发展规律中进行探究。现将各含石量土石混合体的摩擦功与轴向应变的关系曲线绘出, 如图 12 所示。

从图 12 可见, 中低含石量(0%, 10%, 30%, 50%)的土石混合体的摩擦功在加载初期很小, 峰值应力附近开始增长, 而且增长平稳, 基本随轴向应变呈线性增长, 随含石量增大稍有提高。70%含石量的土石混合体在轴向应变小于 6%时基本与中低含石量的规律一致, 但随后即发生了较大波动, 表现为较陡段与较

平缓段交替出现。90%含石量的土石混合体在加载初期即有比较明显的相互摩擦, 随后也出现了较陡段与较平缓段交替的现象, 而且更为显著。高含石量(70%、90%)的土石混合体的摩擦功较中低含石量的提高了很多, 特别是 90%含石量的土石混合体, 摩擦功达到了近 5000 J。

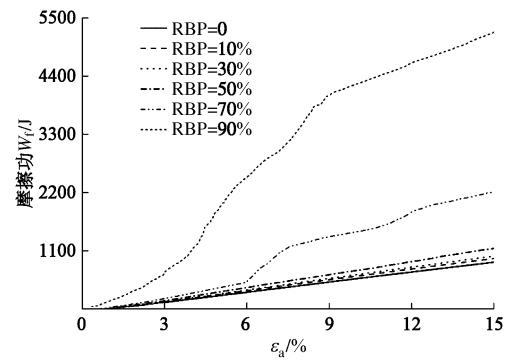


图 12 摩擦功与轴向应变关系曲线

Fig. 12 Relationship between frictional work and axial strain

上述现象表明, 随含石量增大, 特别是高含石量的土石混合体, 在加载过程中不规则块石相互接触、咬合与相对摩擦、滑移交替出现, 块石结构不断调整, 最终决定了土石混合体的宏观力学特性和变形破坏机制。

4 结 论

为探究不同含石量土石混合体的变形破坏机理, 本文提出了一种不规则块石模型随机生成技术, 建立了符合宏观统计规律的土石混合体三维离散元随机模型, 对土石混合体大三轴试验进行了颗粒流数值模拟, 得到以下 6 点结论。

- (1) 土石混合体的含石量对其宏观力学性质影响较大, 随着含石量的增加试样峰值强度、残余强度、弹性模量和破坏应变逐渐增大。
- (2) 随着含石量增大, 剪缩性减小, 剪胀性增强。含石量为 90%的土石混合体的剪缩性不明显, 剪胀性突出, 并且体变曲线有较为明显的波动。
- (3) 张拉破裂形成的微裂纹数很少, 以剪切破裂形成的微裂纹为主。
- (4) 加载初期, 微裂纹主要在块石颗粒与土颗粒之间形成, 发展速度非常快, 很小应变下即达到稳定, 而后则主要在土颗粒间形成和扩展。含石量越大, 块石周围微裂纹比例越高, 局部剪切带越不规则, 分布也越分散。
- (5) 不规则块石对微裂纹的演化发展起到了双重作用。一方面, 块石与土体接触处为薄弱环节, 裂纹往往沿着这些位置发生、扩展, 含石量增大就会导致

微裂纹更加容易形成; 另一方面, 由于块石自身强度和刚度都很大, 一定程度上限制了土石混合体试样中微裂纹的扩展和贯通。这两个方面的综合作用最终决定其微裂纹演化机制。

(6) 高含石量的土石混合体在加载初期即有比较明显的相互摩擦, 随后不规则块石相互接触、咬合与相对摩擦、滑移交替出现, 摩擦功大大增加。

参考文献:

- [1] 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**(8): 1652–1665. (in Chinese))
- [2] 油新华. 土石混合体的随机结构模型及其应用研究[D]. 北京: 北方交通大学, 2001. (YOU Xin-hua. Stochastic structural model of the earth-rock aggregate and its application[D]. Beijing: Northern Jiaotong University, 2001. (in Chinese))
- [3] GRAZIANI A, ROSSINI C, ROTONDA T. Characterization and DEM modeling of shear zones at a large dam foundation[J]. International Journal of Geomechanics, 2012, **12**(6): 648–664.
- [4] 李晓, 廖秋林, 赫建明, 等. 土石混合体力学特性的原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(12): 2377–2384. (LI Xiao, LIAO Qiu-lin, HE Jian-ming, et al. Study on in-situ tests of mechanical characteristics on soil-rock aggregate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(12): 2377–2384. (in Chinese))
- [5] COLI N, BERRY P, BOLDINI D. In situ non-conventional shear tests for the mechanical characterisation of a bimrock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, **48**(1): 95–102.
- [6] 董云. 土石混合料强度特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(6): 1269–1274. (DONG Yun. Experimental study on intensity character of rock-soil aggregate mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(6): 1269–1274. (in Chinese))
- [7] WANG Y, LI X, ZHANG B, et al. Meso-damage cracking characteristics analysis for rock and soil aggregate with CT test[J]. Science China (Technological Sciences), 2014, **57**(7): 1361–1371.
- [8] XU Wen-jie, YUE Zhong-qi, HU Rui-lin. Study on the mesostructure and mesomechanical characteristics of the soil-rock mixture using digital image processing based finite element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, **45**(5): 749–762.
- [9] 徐文杰, 张海洋, 许强, 等. 土石混合体直剪离散元数值试验研究[J]. 计算力学学报, 2014, **31**(2): 228–233. (XU Wen-jie, ZHANG Hai-yang, XU Qiang, et al. Numerical simulations of direct shear test with soil-rock mixture using discrete element method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2014, **31**(2): 228–233. (in Chinese))
- [10] 贾学明, 柴贺军, 郑颖人. 土石混合料大型直剪试验的颗粒离散元细观力学模拟研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(9): 2695–2703. (JIA Xue-ming, CHAI He-jun, ZHENG Ying-ren. Mesomechanics research of large direct shear test on soil and rock aggregate mixture with particle flow code simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(9): 2695–2703. (in Chinese))
- [11] 廖秋林, 李晓, 朱万成, 等. 基于数码图像土石混合体结构建模及其力学结构效应的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(1): 155–162. (LIAO Qiu-lin, LI Xiao, ZHU Wan-cheng, et al. Structure model construction of rock and soil aggregate based on digital image technology and its numerical simulation on mechanical structure effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(1): 155–162. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] 丁秀丽, 李耀旭, 王新. 基于数字图像的土石混合体力学性质的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(3): 477–484. (DING Xiu-li, LI Yao-xu, WANG Xin. Particle flow modeling mechanical properties of soil and rock mixtures based on digital image[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(3): 477–484. (in Chinese))
- [14] 丁秀丽, 张宏明, 黄书岭, 等. 基于细观数值试验的非饱和土石混合体力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(8): 1553–1566. (DING Xiu-li, ZHANG

- Hong-ming, HUANG Shu-ling, et al. Research on mechanical characteristics of unsaturated soil-rock mixture based on numerical experiments of mesostructure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(8): 1553 - 1566. (in Chinese))
- [15] MEDLEY E W. The engineering characterization of melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks)[D]. Berkeley: Department of Civil Engineering, University of California, 1994.
- [16] AFIFIPOUR M, MOAREFVAND P. Mechanical behavior of bimrocks having high rock block proportion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, **65**(1): 40 - 48.
- [17] CHO G C, DODDS J, SANTAMARINA J C. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(5): 591 - 602.
- [18] 宋来忠, 彭 刚, 姜 袁. 混凝土三维随机参数化骨料模型[J]. 水利学报, 2012, **43**(1): 91 - 98. (SONG Lai-zhong, PENG Gang, JIANG Yuan. A three dimensional model for concrete with random parameterized irregular aggregate[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, **43**(1): 91 - 98. (in Chinese))
- [19] DE PELLEGRIN D V, STACHOWIAK G W. Simulation of three-dimensional abrasive particles[J]. Wear, 2005, **258**: 208 - 216.
- [20] 杜 欣, 曾亚武, 高 睿, 等. 基于 CT 扫描的不规则外形颗粒三维离散元建模[J]. 上海交通大学学报, 2011, **45**(5): 711 - 715. (DU Xin, ZENG Ya-wu, GAO Rui, et al. 3-D modeling of irregular shape particles for discrete element method based on X-ray tomography[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, **45**(5): 711 - 715. (in Chinese))
- [21] Itasca Consulting Group, Inc. Universal distinct element code Version 3.1[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, 2006.

第九届全国青年岩土力学与工程会议第 1 号通知

(2016 年 10 月, 重庆)

主办单位: 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会; 中国力学学会岩土力学专业委员会; 中国水利学会岩土力学专业委员会; 中国建筑学会地基基础分会; 中国振动工程学会土动力学专业委员会。

承办单位: 重庆交通大学; 重庆大学; 招商局重庆交通科研设计院有限公司。

会议内容: 征文内容涵盖岩土力学及岩土工程的各研究领域, 包括但不限于以下内容: ①土的本构关系及强度理论; ②土工测试及仪器; ③岩土工程数值模拟; ④非饱和土与特殊土; ⑤软土工程; ⑥高边坡与危岩; ⑦地下水渗流; ⑧土工合成材料; ⑨库岸再造与防治; ⑩桩基础; ⑪地基处理; ⑫土石坝工程; ⑬航道整治工程; ⑭港口码头工程; ⑮土动力学与地震工程; ⑯环境岩土工程; ⑰岩土工程设计与施工; ⑱地下空间开发利用; ⑲岩土工程风险与管理; ⑳重大岩土工程实例分析。

投稿要求: 大会组委会于 2015 年 6 月 1 开始接受论文投稿。应征论文须符合上述会议内容要求且未公开发表过。每篇

论文由两位专家评审, 决定是否录用。根据被录用论文的学术水平, 推荐具体发表刊物。部分优秀论文在《岩土工程学报》、《地下空间与工程学报》、《重庆交通大学学报(自然科学版)》正刊发表, 其它优秀论文发表在非正式出版的论文集, 供会议期间交流。论文投稿格式参照《岩土工程学报》投稿要求。投稿时须向会务组提交全文电子文件(投稿邮箱附后), 来稿务请注明作者的详细通讯地址、E-mail 及联系电话。

主办单位联系方式: 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会秘书处, 电话: 010-62797915, 传真: 010-62785593, 邮箱: cismge@tsinghua.edu.cn, 邮编: 100084, 地址: 清华大学新水利馆 118。

承办单位联系方式: 联系人: 王俊杰, 梁 越, 电话 023-62896924, 13883116938, 023-62459033 18983369809, 传真: 023-62652841, Email: nycgge2016@163.com, 会议网址: nycgge2016.cqjtu.edu.cn, 邮编: 400074, 地址: 重庆市南岸区学府大道 66 号国家内河航道整治工程技术研究中心。

(中国土木工程学会土力学及岩土工程分会秘书处 供稿)