

DOI: 10.11779/CJGE201901006

# 土石混合体三维细观结构随机重构及其力学特性 颗粒流数值模拟研究

张 强<sup>1,2</sup>, 汪小刚<sup>1</sup>, 赵宇飞<sup>1</sup>, 刘立鹏<sup>1</sup>, 林兴超<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院岩土工程研究所, 北京 100038; 2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验, 四川 成都 610065)

**摘 要:** 土石混合体是一种非连续、非均质、各向异性的土石混合多相介质, 其力学性质极为复杂, 与内部土石细观结构密切相关。从细观结构层次出发, 运用计算机随机模拟技术, 建立了一种基于不规则块石的土石混合体三维细观结构重构方法, 并基于 FORTRAN 语言开发了相应的三维细观结构随机模拟系统 (RMS<sup>3D</sup>), 在此基础上, 考虑块石的不规则形状, 建立了土石混合体的离散元模型, 并采用颗粒流程序对其开展了不同法向应力下三维直剪试验模拟, 探究了块石空间分布对其力学特性的影响。研究表明: 土石混合体的力学性质受内部块石空间分布影响显著, 在相同级配和含石量下, 不同块石空间分布的土石混合体试样的剪应力-剪切位移曲线和法向位移-剪切位移曲线均不相同, 尤其是在峰后呈现出了明显的差异, 且后者开始出现差异时相对于前者滞后; 另外, 受剪切面上块石阻碍的影响, 由于试样内部块石空间分布的不同, 导致不同试样剪切破坏后所形成的剪切带的形态和厚度也存在一定的差异。  
**关键词:** 土石混合体; 力学特性; 细观结构; 随机重构; 颗粒流; 块石空间分布

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)01-0060-10

**作者简介:** 张 强(1986-), 男, 博士后, 主要从事复杂岩土介质多尺度灾变机理方面的研究工作。E-mail: zhangq@iwhr.com。

## 3D random reconstruction of meso-structure for soil-rock mixture and numerical simulation of its mechanical characteristics by particle flow code

ZHANG Qiang<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-gang<sup>1</sup>, ZHAO Yu-fei<sup>1</sup>, LIU Li-peng<sup>1</sup>, LIN Xing-chao<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The soil-rock mixture (S-RM) is a discontinuous, heterogeneous and anisotropic multiphase medium consisting of soil and rock blocks. Its mechanical characteristics are extremely complicated and closely related to the internal mesoscopic structure of soil and rock blocks. From the view of meso-structure, a reconstruction method by computer random simulation is proposed to reconstruct the 3D meso-structure for S-RM based on irregular rock blocks, and a randomly modelling system (RMS<sup>3D</sup>) is developed using the FORTRAN language. On this basis, the discrete element models for S-RM are established considering the shape of irregular rock blocks, and 3D numerical shear tests by particle flow code are conducted for them to investigate the influences of spatial distribution of rock blocks on the mechanical characteristics of S-RM. The results show that the mechanical characteristics are significantly affected by the spatial distribution of rock blocks. The shear stress-displacement and normal displacement-displacement curves are different for S-RM samples with the same content and gradation but different spatial distributions of rock blocks, especially for the post-peak curves, they show obvious differences between each other, and the latter lags behind the occurrence of differences compared to the former. In addition, the shapes and thicknesses of shear zones after failure exhibit certain differences for S-RM samples with different spatial distributions of rock blocks because of the effect of obstruction of the rock blocks located on the shear surface.

**Key words:** soil-rock mixture; mechanical characteristic; meso-structure; random reconstruction; particle flow code; spatial distribution of rock block

## 0 引 言

土石混合体<sup>[1]</sup>系指一类由粒径相对较大的碎块石

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC1501100); 国家自然科学基金项目 (11772118); 博士后科学基金项目 (2017M620838); 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室开放合作基金项目 (SKHL1725)

收稿日期: 2017-08-12

和土体混合而成的松散地质材料(体),在自然界中广泛分布,一般常见于第四系松散堆积层边坡或滑坡体中。近年来,随着中国西南地区大型水电工程的兴建,在工程建设中普遍会遇到一些不同成因、规模巨大的土石混合体,由于其形成机理复杂、力学分析手段困难,加之失稳危害性大和随机性强,土石混合体的存在给水电工程安全建设带来了巨大的潜在威胁,目前土石混合体已成为了水电工程中一个重点关注和研究对象<sup>[2-3]</sup>。

纵观现阶段国内外对土石混合体的研究表明,土石混合体的力学特性极为复杂,且很大程度上取决于其内部土石细观结构,现有的岩土力学理论尚不能对这种复杂的土石混合介质进行准确的描述和概化,同时受块石尺寸效应的影响,常规岩土力学试验方法也无法表达土石混合体的真实力学特性,而室内和原位大尺寸物理试验虽能反映其真实力学特性,但由于试验结果随机性较大且试验费用高昂,在实际研究中有很大的局限性,也难以广泛推广<sup>[4-5]</sup>。

近年来,随着计算机模拟水平及数值计算方法的发展,细观数值模拟方法已成为当前土石混合体研究中备受青睐的一种研究手段,它建立在介质细观结构基础上,并结合某种数值计算方法(如有限元、离散元)开展相关模拟分析<sup>[6]</sup>。目前,对于土石混合体二维细观数值模拟的研究已经较为成熟,但由于二维研究中忽略了石块空间三维形态的影响,导致研究结果与实际可能存在较大偏差,难以反映土石混合体的真实力学行为。近年来,随着研究的不断深入,对土石混合体细观数值模拟研究已逐步由二维转向三维<sup>[7]</sup>。在三维研究方面,李世海等<sup>[8]</sup>基于可变形块体模型建立了土石混合体三维离散元随机计算模型,研究了土石混合体在单轴压缩状态下的应力-应变特性和强度特性。金磊等<sup>[9]</sup>基于不规则块石随机生成技术和不规则颗粒离散元模拟技术建立了土石混合体的三维离散元模型,并利用离散元三轴试验对不同含石量下土石混合体的力学特性和变形破坏机理进行了探讨研究。徐文杰等<sup>[10]</sup>利用三维扫描获取的真实石块形态构建了土石混合体的数字模型,并基于多球体模拟方法建立了土石混合体的离散元模型,利用离散元直剪试验研究了土石混合体的细观力学特性。从上述研究来看,目前对于土石混合体三维细观数值模拟研究已开展了一定的研究,并获得了一些有价值的研究成果,但当前三维研究中仍存在一些不足。即,目前仍未建立一套较为简单而又成熟的土石混合体三维模型重构及其离散元模型构建方法;在研究内容方面,多数集中在块石形状、含量和级配对土石混合体力学特性的影响,

而对块石空间分布的影响研究尚少。

为此,本文从土石混合体细观结构出发,运用计算机随机模拟技术,建立一种基于不规则凸多面体的土石混合体三维细观结构重构方法,并开发相应的三维随机细观结构模拟系统;其次考虑块石不规则形状,建立一种土石混合体三维离散模型建立方法;最后以西南某水电站左岸坝前土石混合体为例,利用大型离散元直剪试验开展土石混合体力学特性研究,并分析块石空间分布对土石混合体力学特性的影响。

## 1 土石混合体三维细观结构随机重构

### 1.1 不规则块石几何模型构造

实际中,由于土石混合体内部块石形状极为复杂,在进行三维细观结构随机重构时,需要对块石形状作适当的简化处理。鉴于实际中块石多以棱角或次棱角状占优,本文选用不规则凸多面体来近似代替实际复杂形状的块石。目前,对于不规则凸多面体的构造方法种类比较多,大致可以归纳为三类:第一类是基于初始多面体(如,四面体、六面体、八面体)按照一定的规则向外延拓来构造不规则凸多面体<sup>[11]</sup>;第二类是基于 Voronoi 多面体经过一定的伸缩变换来构造不规则凸多面体<sup>[12]</sup>;第三类是基于球体或椭球体等基元来构造不规则凸多面体<sup>[13,14]</sup>。

考虑3种方法的简易性,本文选用第三种方法中基于椭球体基元来构造不规则的凸多面体。图1给出了基于椭球体基元构造不规则凸多面体的过程,其包括两个主要的步骤:①基于给定的椭球体基元,在基元表面上选择一定数目的随机点作为多面体的顶点,见图1(a);②根据凸多面体的顶点和面之间的拓扑关系,将选取的随机点连接起来构成不规则的多面体,见图1(b)。

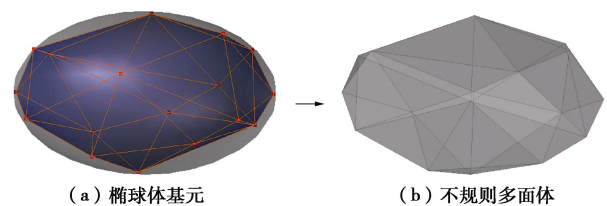


图1 基于椭球体基元构造任意不规则形状凸多面体

Fig. 1 Construction of an irregular convex polyhedron based on an primitive ellipsoid

下面详细介绍基于椭球体基元构造不规则凸多面体的过程。

#### (1) 随机顶点的选择

如图2,对于任意一个椭球体基元,在球坐标系下,基元表面上任意一点的位置可由5个参数( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ )来确定,其中 $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ 分别代

表椭球体基元的第一、第二和第三主轴的长度。

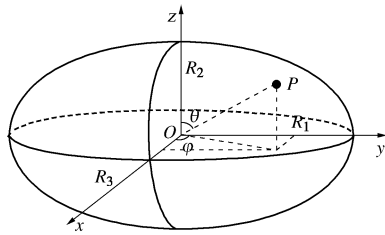


图2 椭球体基元表面上任一随机点位置的描述

Fig. 2 Description of position of a random point on surface of primitive ellipsoid

当基于椭球体基元构造一个  $N$  个顶点的凸多面体时, 需要先从基元表面上选取相同数目的随机点来作为凸多面体的顶点。在选点时, 文中是将椭球体基元的表面拆分为上下两半部分, 分别从这两部分表面上独立地选取相应数目的随机点。假设从基元上半表面上选取的随机点数目为  $N_1$ , 则这些随机点对应的  $\theta_i$  和  $\varphi_i$  为<sup>[15]</sup>

$$\begin{cases} \theta_i = \frac{2\pi}{N_1} + \delta \frac{2\pi}{N_1} (2\eta_1 - 1) \\ \varphi_i = \eta_2 \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (i=1, 2, 3, \dots, N_1), \quad (1)$$

式中,  $\eta_1$  和  $\eta_2$  是两个相互独立的随机数, 取值介于  $[0, 1]$ ,  $\delta$  为一个变量, 一般可取为 0.3。剩余的  $N - N_1$  个随机点则从基元表面下半部分进行选取, 其相应的  $\theta_i$  和  $\varphi_i$  可以根据公式 (1) 类似地确定。在笛卡尔坐标系下, 这些随机点的位置  $(x_i, y_i, z_i)$  为

$$\begin{cases} x_i = x_0 + R_1/2 \sin \theta_i \cos \varphi_i \\ y_i = y_0 + R_2/2 \sin \theta_i \sin \varphi_i \\ z_i = z_0 + R_3/2 \cos \theta_i \end{cases}, \quad (2)$$

式中,  $(x_0, y_0, z_0)$  是椭球体基元的中心位置。

## (2) 随机顶点的连接

当多面体的随机顶点的位置确定后, 可以根据凸多面的顶点与面之间所满足的空间拓扑关系 (即, 对于任一个面而言, 除该面所包含的顶点以外, 其余顶点均位于该面的同一侧), 利用若干个三角形面将这些随机点连接起来构成凸多面体, 其具体思想为: 遍历每个顶点  $p_i$ , 先寻找与该顶点距离最近的顶点  $p_j$ , 然后从剩余的顶点中寻找一个点  $p_k$ , 使得其余  $N-3$  个顶点均位于  $p_i p_j p_k$  这个三角形面的同一侧; 依次遍历完所有顶点后, 删除相同的面 (既由相同顶点构成的面), 将剩余的三角面组合起来即可构成凸多面体。

## 1.2 不规则块石集合生成

在构建土石混合体随机细观结构模型时, 需要先生成一个不规则块石的集合, 保证集合中块石的粒径分布与给定的粒径分布相一致。通常而言, 土石混合体内部块石服从一定的粒径分布, 在给定的石块粒径

分布下, 根据块石最大最小粒径界限, 可划分为若干个粒径区间  $[D_i, D_{i+1}]$ , 并计算出每个粒径区间对应的块石体积百分含量为  $P[D_i, D_{i+1}]$ , 利用不规则块石构造方法, 依次生成每个粒组区间所包含的块石, 所有粒组区间生成的块石总和既构成了一个块石集合。

对于某一粒径区间  $[D_i, D_{i+1}]$  而言, 生成该粒径所包含的块石子集合, 可按如下步骤来完成:

(1) 先根据该粒径区间块石的体积百分含量  $P[D_i, D_{i+1}]$ , 确定该粒组区间预生成的块石总体积  $V[D_i, D_{i+1}]$ , 由如下公式计算:

$$V[D_i, D_{i+1}] = P[D_i, D_{i+1}] V_C, \quad (3)$$

式中,  $V$  和  $C$  分别为预投放区域的体积和块石体积百分含量。

(2) 在该粒径区间内随机选择一个椭球体基元, 基元的 3 个主轴长度, 可按如下公式计算:

$$\begin{cases} R_{1i} = D_i + \eta(D_{i+1} - D_i) & (\eta \in [0, 1]) \\ R_{2i} = f_1 R_{1i} & (f_1 \in [f_{\min}, f_{\max}]) \\ R_{3i} = f_2 R_{1i} & (f_2 \in [f_{\min}, f_{\max}]) \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $f_1$  和  $f_2$  分别为椭球体基元的第二和第三主轴与第一主轴的长度比值,  $f_1 = R_{2i}/R_{1i}$ ,  $f_2 = R_{3i}/R_{1i}$ 。为了模拟实际中块石复杂多样的形状, 文中假设  $f_1$  和  $f_2$  均服从一个独立的均匀随机分布, 在  $[f_{\min}, f_{\max}]$  区间内随机取值, 其中,  $0 < f_{\min} \leq f_{\max} \leq 1$ 。

(3) 为了保证生成的块石形状具有足够的随机性, 将块石顶点数目  $N$  作为一个随机整数, 其在  $[N_{\min}, N_{\max}]$  区间内均匀随机取值。

(4) 基于选取的椭球体基元, 根据不规则石块构造方法, 生成一个随机块石, 并计算该块石的体积  $V_p$ 。

(5) 将该块石加入到块石子集合中, 并更新该粒径区间已生成的块石的总体积  $V'[D_i, D_{i+1}]$ :

$$V'[D_i, D_{i+1}] = V'[D_i, D_{i+1}] + V_p. \quad (5)$$

(6) 重复步骤 (2) ~ (5) 直到  $V'[D_i, D_{i+1}]$  大于等于  $V[D_i, D_{i+1}]$ 。

## 1.3 块石投放过程

块石投放是土石混合体三维细观结构随机重构的一个关键环节, 此过程是将块石集合中的每一块石逐个投放到指定的区域内, 并在投放过程对块石进行入侵判断, 保证预投放块石与已投放石块间不存在相互入侵情形。总而言之, 块石投放过程是一个不断地试投放和入侵判断的过程, 直到将块投放石成功到给定区域内。块石投放的具体流程如下:

(1) 在指定的投放区域内随机地选取一个点  $(x_0, y_0, z_0)$  作为块石中心 (即基元中心) 的预投放位置, 并根据式 (2) 确定块石顶点位置。块石中心预投放位置为

$$\begin{cases} x_0 = x_{\min} + \chi_x(x_{\max} - x_{\min}) \\ y_0 = y_{\min} + \chi_y(y_{\max} - y_{\min}) \\ z_0 = z_{\min} + \chi_z(z_{\max} - z_{\min}) \end{cases}, \quad (6)$$

式中,  $x_{\min}$  和  $x_{\max}$ ,  $y_{\min}$  和  $y_{\max}$ ,  $z_{\min}$  和  $z_{\max}$  分别为投放区域在全局坐标系沿  $x$ ,  $y$ ,  $z$  三个方向的最小和最大值;  $\chi_x$ ,  $\chi_y$ ,  $\chi_z$  为3个独立的随机数, 在  $[0, 1]$  内随机取值。

(2) 为了考虑块石空间方位的随机性, 在将块石投放至预投放位置前, 先对块石作一个随机转动, 转动后块石顶点的位置为

$$\bar{X}'_i = R(\alpha, \beta, \gamma) \cdot \bar{X}_i. \quad (7)$$

式中  $\bar{X}_i$  和  $\bar{X}'_i$  分别是块石第  $i$  个顶点在转动前后的位置矢量;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  为块石基元长轴绕全局坐标系  $x$ ,  $y$ ,  $z$  三个坐标轴的转动角;  $R(\alpha, \beta, \gamma)$  为旋转矩阵, 可由如下式计算:

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}. \quad (8)$$

(3) 将块石试投放到预投放位置, 并判断块石是否完全位于投放区域内。若块石没有完全位于投放区域内, 则重复执行步骤 (1) 和 (2)。

(4) 判断预投放块石与已投放块石是否存在相互入侵。若预投放块石与已投放的块石存在相互入侵情形, 则重复执行步骤 (1) ~ (3)。

(5) 若步骤 (3) 和 (4) 均满足, 则块石投放成功, 并将块石投放至预投放位置。

(6) 重复执行步骤 (1) ~ (5), 依次将块石集合中所有块石投放到区域内, 为了保证投放过程的顺利完成, 对块石按粒径区间大小进行降序投放。

#### 1.4 块石入侵判断

在块石投放过程中, 为保证预投放块石与已投放块石间不发生相互入侵, 需要进行块石入侵判断。如图3所示, 任意两块石彼此间可能存在两种入侵情形: 第一种是一个块石的部分或全部顶点入侵到另一块石内部; 第二种类是两石块相互贯穿。对于第一种入侵情形来说, 可以采用判断一点是否位于凸多面体内部的方法来确定两块石是否存在相互入侵; 对于第二种入侵情形来说, 除了需要进行第一种情形的入侵判断, 还需要进一步判断两块石的边和面彼此之间是否存在相交, 此时可以将判断两个石块相互贯穿的问题简化为判断线段与三角形面相交的问题进行处理。上述这两个问题均属于计算机图形中的基本问题, 判别方法

可以参考相关的书籍和文献, 这里不再赘述。

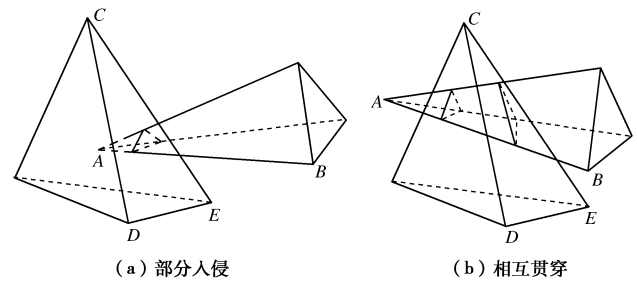


图3 块石间入侵类型

Fig. 3 Types of intrusions between two rock blocks

#### 1.5 三维细观结构随机模拟系统开发与生成实例

基于上述原理, 文中利用 Fortran 语言开发了土石混合体三维细观结构随机模拟系统 (RMS<sup>3D</sup>), 为后续数值模拟提供技术支持。另外, 为了可视化系统生成的随机细观结构, RMS<sup>3D</sup> 中选择 AutoCAD 软件作为系统图形显示界面, 并采用 AutoCAD 软件 dxf 文件作为模型数据输出与交换的接口。图4给出了土石混合体三维细观结构随机模拟系统的开发流程图。

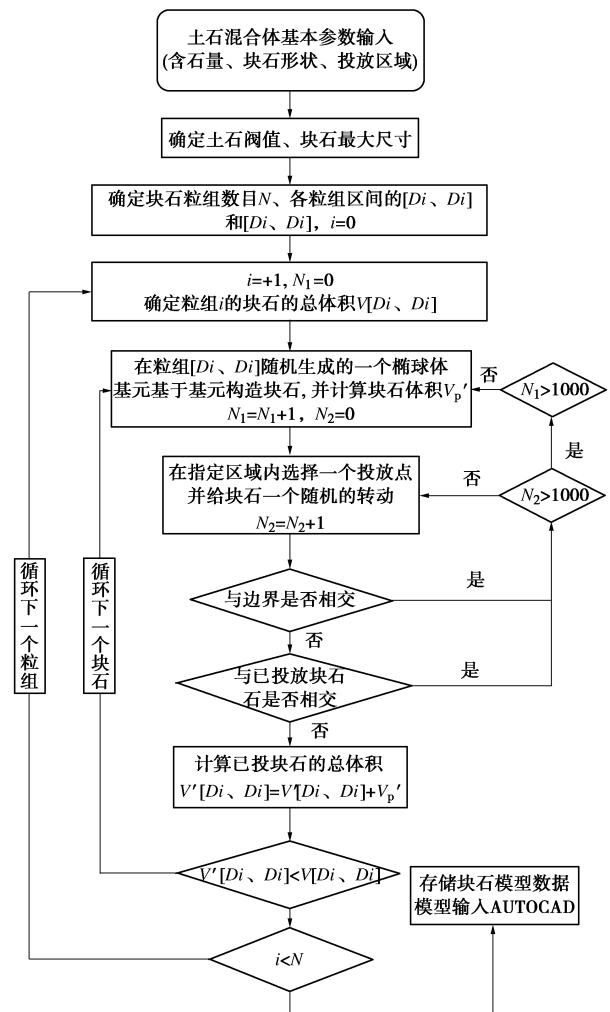


图4 土石混合体三维细观结构随机模拟系统的开发流程图

Fig. 4 Flow chart of developing a randomly modelling system of 3D meso-structure for S-RM



在已知块石级配的情况下,块石含量及空间分布是表征土石混合体细观结构的两个重要指标,其中块石含量是描述细观结构中土石成分所占的比例,块石空间分布是描述细观结构中块石集合的空间排列方式。利用开发的 RMS<sup>3D</sup> 系统可在指定投放区域内生成不同块石含量和空间分布的土石混合体三维随机细观结构模型。如图 5 所示,以立方柱体投放区域为例,利用 RMS<sup>3D</sup> 系统生成了具有不同细观结构特征的三维随机细观结构模型。图 5 (a) 所示为生成的 3 个不同含石量的三维随机细观结构模型,图 5 (b) 为生成的 3 个相同含石量而不同块石空间分布的三维随机细观结构模型。需要指出的是,在利用 RMS<sup>3D</sup> 生成相同含石量而不同块石空间分布的三维随机细观结构时,需要在块石投放时设置不同的随机数序列,以保证在每次投放过程中块石具有不同的中心位置和空间方位。

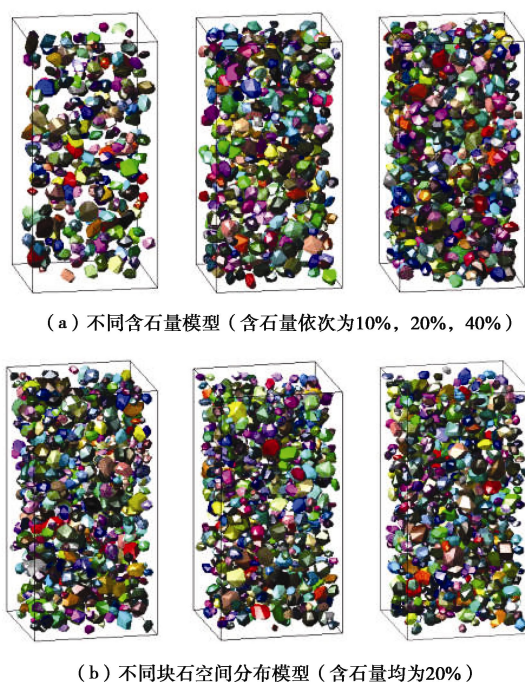


图 5 利用 RMS<sup>3D</sup> 生成的不同结构特征的土石混合体三维随机细观结构模型

Fig. 5 3D random meso-structures of S-RM with different characteristics generated by RMS<sup>3D</sup>

## 2 颗粒流三维直剪试验模拟原理

### 2.1 直剪试验模拟

在颗粒流模拟中,直剪试验中的剪切盒是采用无摩擦的刚性墙体 (wall) 进行模拟。图 6 所示为本文所建立的颗粒流三维直剪试验模型。该模型由上下两个剪切盒组成,每个剪切盒均由 6 个墙体所构成 (图

中以不同颜色显示),其中中间两个墙体为辅助墙体,其作用是防止在剪切过程中由于上下剪切盒的错动导致颗粒飞出剪切盒。

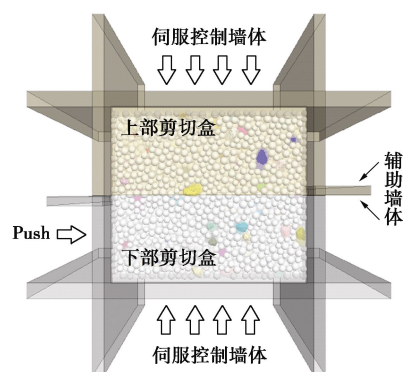


图 6 颗粒流三维直剪试验模型

Fig. 6 Particle flow model for 3D direct shear tests

在试验模拟时,文中将下剪切盒选为主动剪切盒,在剪切过程中,下部剪切盒墙体整体保持缓慢移动,移动速度为 0.05 mm/s,而上剪切盒则作为被动剪切盒,在剪切过程中保持固定,同时在剪切过程中,利用伺服控制在顶部和底部墙体上施加恒定的法向应力。另外,在试验前,需要先将试样伺服到初始的法向应力状态。

### 2.2 数值试样模型建立

基于随机细观结构模型,考虑块石不规则形状,文中提出采用如下方法建立土石混合体的颗粒流模型,模型中土体颗粒采用单个球体模拟,块石采用由多个球体组成的颗粒簇模拟。如图 7 所示,该方法包括了以下 4 个主要步骤:①首先根据块石含量及粒径级配,利用 RMS<sup>3D</sup> 生成指定尺寸的三维随机细观结构模型,见图 7(a)。②其次将随机细观结构模型导入 PFC5.0 中,利用程序提供的 clump template 命令中的 bubblepack 方法,建立随机细观结构中每个块石的颗粒簇模型,见图 7(b)。③根据随机细观模型尺寸,建立一个相同尺寸的纯土体的球体颗粒模型,见图 7(c)。④最后将建立的细观结构块石颗粒簇模型加入到纯土体模型中,删除与块石重叠的土体颗粒,建立土石混合体模型。在这一步中,为了确保生成的模型中土石颗粒彼此处于紧密接触状态,不存在局部的架空,在将块石颗粒簇模型加入到纯土体模型中后,先将纯土体模型中球体的半径缩小到原来的 0.001 倍,再将与块石颗粒簇存在接触的球体删除,其次再将纯土体模型中剩余球体的半径再逐步放大到原值,且在每次球体半径放大后均进行一定步数的循环,迫使土石颗粒相互挤压并处于紧密接触状态。7(d) 所示为最终建立的土石混合体颗粒流模型。

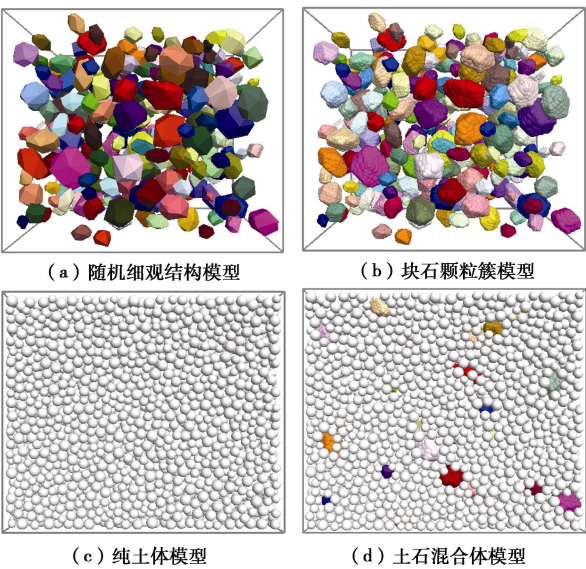


图 7 土石混合体颗粒流模型建立过程

Fig. 7 Generation processes of particle flow model for S-RM

利用该方法可以生成密实的土石混合体颗粒流模型, 保证模型内部土石颗粒间彼此相互接触, 确保数值模拟结果的可靠性。

2.3 块石颗粒簇模型优化

一般情况下, 在采用颗粒簇模拟不规则块石时, 若颗粒簇模型中球体数目越多, 颗粒簇就越能够较好地描述块石的不规则形状, 然而当球体数目较多时往往会导致颗粒流计算效率的恶化。尤其是在高含量下, 由于土石混合体随机细观结构模型中块石数目相对较多, 这会极大地降低颗粒流计算的效率。为了获得合理的计算效率, 模拟中通常需要在计算效率和块石形状表征精度之间做一个折中, 既保证颗粒簇能够表征块石的不规则形状, 又可确保颗粒簇模型中的球体数目适中, 以提高模拟效率。

文中不规则块石的颗粒簇模型是采用 PFC5.0 中提供的 clump template 命令中的 bubblepack 方法进行生成, 该方法包括了 4 个控制参数(distance, radfactor, ratio, refinenum, 具体含义见 PFC 手册<sup>[16]</sup>), 通过调整这 4 个参数可以生成不同球体数目的颗粒簇模型。

表 1 不同试验点平硐颗分试验数据

Table 1 Data of grain-size distribution tests at different sites in drift

试验点 编号	颗粒大小/mm														
	200	60	40	20	10	5	2	1	0.5	0.25	0.075	0.05	0.01	<	<
	~ 60	~ 40	~ 20	~ 10	~ 5	~ 2	~ 1	~ 0.5	~ 0.25	~ 0.075	~ 0.05	~ 0.01	~ 0.005	0.005	0.002
TG08707	2	2	4	7	10	12	3	8	6	12	3	10	5	16	11
TG08708	11	9	16	11	13	12	2	5	4	7	1	3	1	5	4
TG08709	3	4	13	15	12	12	3	8	5	8	2	5	2	8	6
TG08710	11	7	11	13	12	12	2	6	4	7	3	4	2	6	5
TG08711	7	4	13	14	14	13	3	7	5	7	1	3	2	7	5
平均	6.8	5.2	11.4	12	12.2	12.2	2.6	6.8	4.8	8.2	2	5	2.4	8.4	6.2

如图 8 所示, 通过调整 4 个控制参数, 生成了不同球体数目的块石颗粒簇模型。通过对不同块石颗粒簇模型的计算效率进行对比, 最终选用 48 个球体数目的颗粒簇模型来模拟不规则块石, 该模型既能够满足计算效率的要求, 又基本上能够准确地描述块石的不规则形状。4 个控制参数取值为 radfactor=1.05, ratio=0.25, distance=150.0, refinenum=1500。

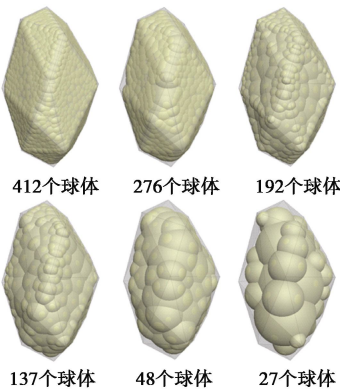


图 8 不同球体数目的块石颗粒簇模型

Fig. 8 Clump models for an irregular stone composed of different numbers of spheres

3 土石混合体力学特性研究

3.1 建立模型

以西南某水电站左岸坝前土石混合体为例, 建立土石混合体颗粒流模型。表 1 列出了现场不同部位试验点平硐颗分试验数据。

采用颗分试验数据进行随机细观结构模型重构时, 需要先确定试验模型尺度下的土-石阈值( $d_{ST}$ ), 将粒径小于土-石阈值的颗粒看作为“土体”, 而将粒径大于土-石阈值的颗粒看作为“石块”。在模型重构时, 只需考虑粒径大于土-石阈值部分的颗粒。其中, 土-石阈值  $d_{ST} = 0.05L_c$ <sup>[17]</sup>,  $L_c$  为土石混合体工程特征尺度, 对直剪试验而言, 其可取为剪切盒的高度。

为了考虑大粒径块石, 文中选用的剪切试验模型尺寸为 70 cm×70 cm×60 cm (长×宽×高)。由此确





定出在该模型尺度下的土-石阈值为 30mm。根据土-石阈值界限,在重构随机细观结构模型时,只考虑粒径大于 30 mm 的部分颗粒,即 20~40, 40~60, 60~200 mm 这 3 个粒径区间的颗粒。据此,根据 5 个试验点颗分试验数据的平均值,利用 RSM<sup>3D</sup> 重构了 10 个不同块石空间分布的三维随机细观结构模型,分别标记为#1~#10,并相应地建立了不同随机试样细观结构颗粒簇模型见图 9。

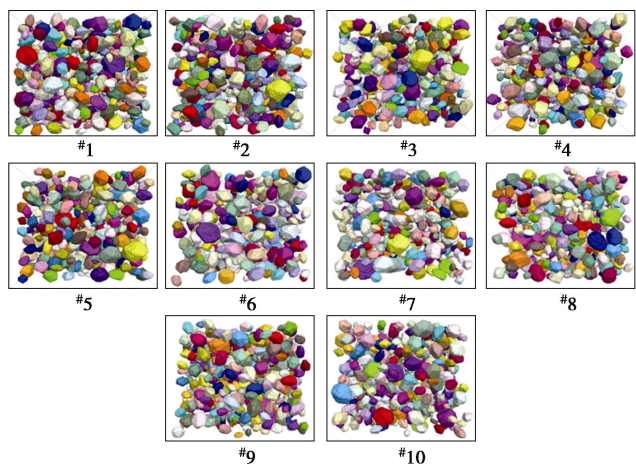


图 9 不同空间分布随机试样细观结构颗粒簇模型  
Fig. 9 Clump models for meso-structures of random samples with different spatial distributions

3.2 颗粒接触模型及参数

根据土石颗粒的力学接触特性,文中选用 PFC5.0 中性模型 (linear model) 来土石混合体内部土-石及块石颗粒间的接触摩擦特性,选用线性黏结模型 (linearcbond model) 来模拟土体颗粒间的接触摩擦特性和黏结特性。通过对现场土石混合体大型直剪试验进行标定,获得了土石颗粒的细观参数,见表 2。图 10 给出了不同法向应力下土石混合体大型直剪试验曲线与数值模拟的对比结果,由图 10 可以看出,数值模拟获得的应力应变曲线与现场物理试验获得的应力应变曲线吻合度较好。

表 2 土石颗粒接触模型参数

Table 2 Parameters of contact models for soil and rock block particles						
颗粒	密度 (kg·m <sup>-3</sup> )	刚度/(N·m <sup>-1</sup> )		黏结强度/N		摩擦 系数
		法向	切向	法向	切向	
土体	2000	5.0×10 <sup>6</sup>	3.5×10 <sup>6</sup>	5.0×10 <sup>2</sup>	5.0×10 <sup>2</sup>	0.65
块石	2700	2.0×10 <sup>8</sup>	2.0×10 <sup>8</sup>	—	—	1.0

利用选用的土石颗粒接触模型和参数,对不同块石空间分布随机试样进行不同法向应力下的直剪试验,试验中选取的不同法向应力分别为 0.2, 0.4, 0.6 MPa, 根据直剪试验结果,分析土石混合体的力学特性。

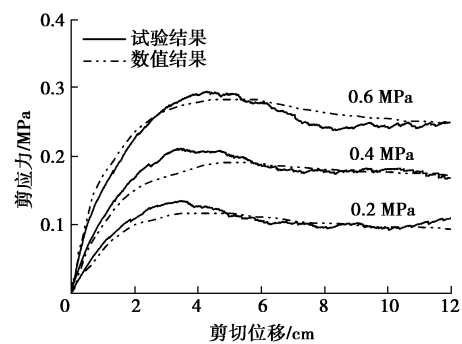
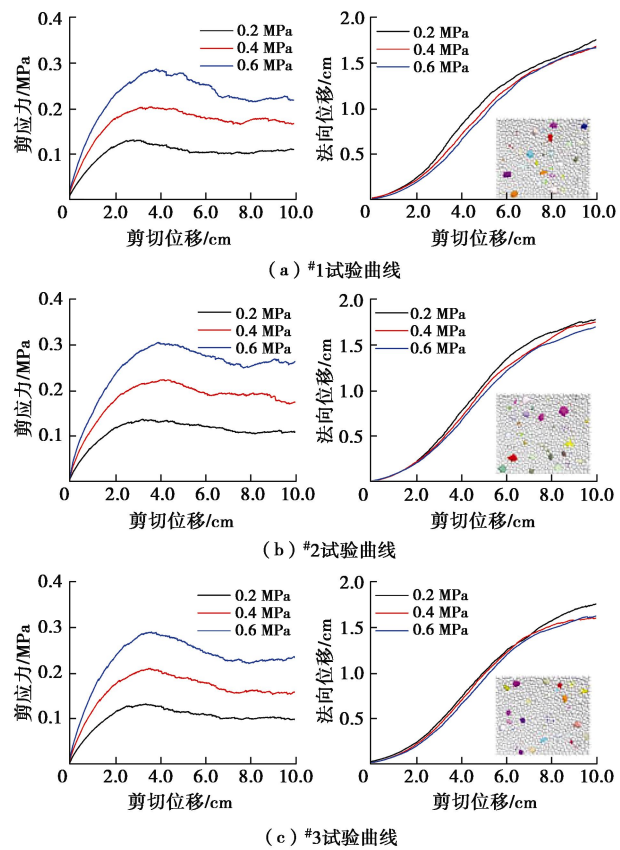


图 10 土石混合体大型直剪试验曲线与数值模拟结果对比  
Fig. 10 Comparison of results of S-RM obtained by in-situ and numerical direct shear tests

3.3 试验结果分析

(1) 试验曲线分析

通过数值试验结果发现,不同随机试样的试验曲线的变化规律相一致。鉴于篇幅有限,图 11 只给出了 5 个不同土石混合体试样的试验曲线。从剪应力-剪切位移曲线可以看出,不同随机试样的剪应力-剪切位移曲线的变化规律基本一致,在峰值前,随着剪切位移增加,剪应力在不断增大,表现出了非线性变形特性;在峰后,随着剪切位移继续增加,剪应力在逐渐地降低,表现出一定的软化特性。从法向位移-剪切位移曲线可以看出,在剪切过程中,随着剪切位移的增加,不同试样的法向位移均在不断增大,试样表现出了剪胀特性,且对于同一试样来说,法向应力越大,试样的剪胀越小。





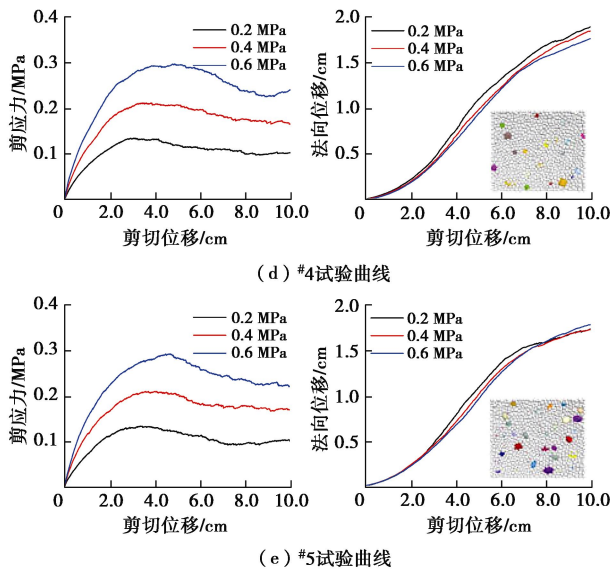


图 11 不同空间分布土石混合体随机试样的试验曲线

Fig. 11 Test curves of 5 random samples of S-RM with different spatial distributions

为了分析块石空间分布对土石混合体力学特性的影响, 取不同试样在同一法向应力下的试验曲线进行对比。图 12 给出了相同法向应力下不同随机试样的剪应力 - 剪切位移曲线及法向位移 - 剪切位移曲线。

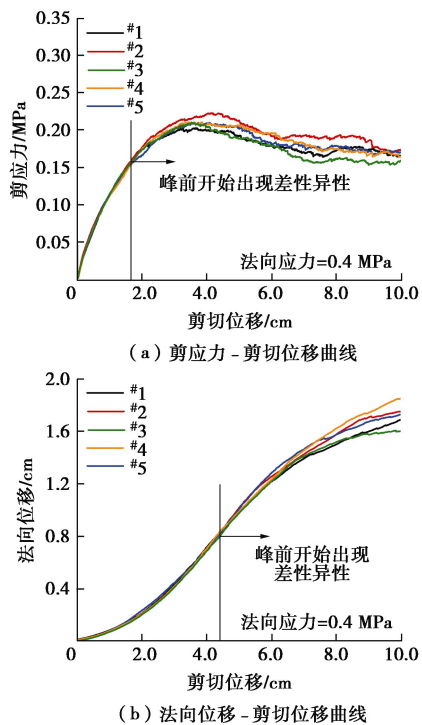


图 12 相同法向应力下不同土石混合体随机试样的试验曲线

Fig. 12 Test curves of 5 random samples of S-RM under normal stress of 0.4 MPa

从图 12 (a) 中可以看出, 在剪应力到达峰值之前, 不同随机试样的剪应力 - 剪切位移曲线基本一致, 均表现出了非线性的变形特性; 此后, 随着剪切位移

的继续增加, 不同试样的剪应力 - 剪切位移曲线开始出现差异性, 且当剪应力到达峰值时, 不同试样的峰值剪应力大小也各不相同; 尤其在剪应力到达峰值之后, 不同试样剪应力 - 剪切位移曲线形状呈现出了显著的差异性, 这表明了块石空间分布对土石混合体试样的应力应变关系和峰值强度均有影响。

从图 12 (b) 中可以看出, 在剪应力到达峰值之前, 不同随机试样的法向位移 - 剪切位移曲线也基本一致, 而在剪应力到达峰值之后, 开始呈现出了明显的差异性, 导致不同试样表现出了不同程度的剪胀大小, 这表明块石空间分布对土石混合体试样的剪胀特性也有影响。

此外, 通过对比图 12 (a)、(b) 可以发现, 不同随机试样的剪应力 - 剪切位移曲线与法向位移 - 剪切位移曲线是在不同剪切状态时刻开始呈现出各自的差异性, 其中前者是剪应力到达峰值之前, 而后者基本是在剪切应到达峰值之后, 这表明法向变形开始出现差异性相对于剪应力滞后。造成这一现象的主要原因是在剪应力到达峰值后, 土石混合体试样内部土石间的初始咬合发生了破坏, 土石颗粒开始发生相对错动, 而受制于不同随机试样剪切面上块石分布不同的影响, 导致了不同试样表现出了不同的变形特征。

### (2) 剪切破坏形态分析

在剪切过程中, 由于上下剪切盒之间的相对错动, 导致剪切面附近的颗粒发生相互错动, 通过剪切后试样的颗粒位移云图, 可以直观地显示出试样破坏后剪切带的形态。图 13 给出了不同随机试样在相同法向应力下剪切后的颗粒位移云图。由图 13 中可以明显看出, 不同试样其内部颗粒的相对错动只发生在剪切面附近的一定区域内, 此区域即为试样剪切破坏后所形成的剪切带, 且受剪切过程中剪切面上块石阻碍的影响, 剪切带表现出了明显的“绕石”现象, 导致试样剪切带形态曲折不平。

通过对比不同块石空间分布试样的剪切带形态可以发现, 不同随机试样的剪切带形态和厚度均存在显著差异, 表明块石空间分布对土石混合体的剪切破坏形态有着直接的影响, 且影响主要取决于剪切面附近块石的分布。此外, 通过对比不同试样试验前后内部块石的位置发现, 位于剪切带内部及块石在剪切过程中发生了一定平移和转动, 这也是造成不同块石空间分布试样剪切带形态差异较大的一个主要原因。

### (3) 抗剪强度分析

根据莫尔-库仑强度准则, 通过对不同随机试样的峰值剪应力和法向应力进行线性拟合, 获得了不同随机试样的抗剪强度, 见表 3。

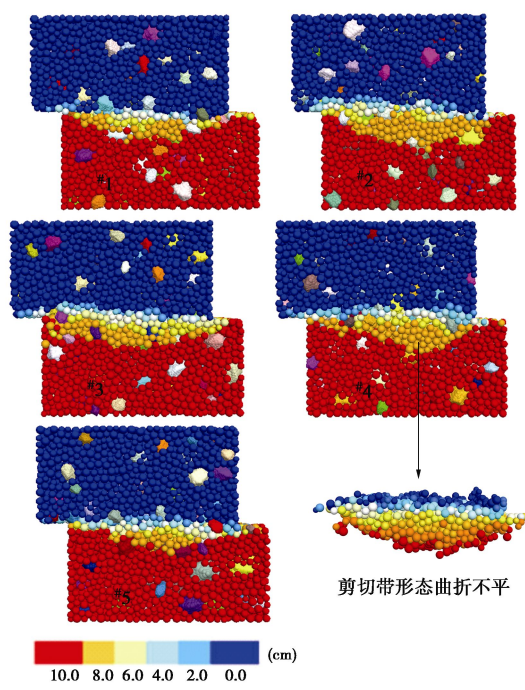


图 13 不同随机试样剪切后的颗粒位移云图 (0.2 MPa)

Fig. 13 Particle displacement contours for different random samples of S-RM

表 3 不同随机试样抗剪强度参数

Table 3 Shear strength parameters of 5 random samples

试样 编号	$\varphi$ /( $^{\circ}$ )	$c$ /kPa	试样 编号	$\varphi$ /( $^{\circ}$ )	$c$ /kPa
#1	29.8	51.6	#6	28.7	60.2
#2	29.6	55.4	#7	31.7	40.6
#3	31.1	44.1	#8	29.4	51.3
#4	30.5	45.3	#9	31.5	42.8
#5	30.2	53.8	#10	32.3	39.5

从表 3 中可以看出,即使不同随机试样的块石含量和级配均相同,但由于试样内部块石空间分布的不同,不同试样抗剪强度参数也表现出了一定的离散性。对表中数据进行统计分析得出,不同试样的内摩擦角的最大值和最小值相差了  $3.6^{\circ}$ ,标准差为 1.15,而黏聚力最大值和最小值相差了 20.7 kPa,标准差为 6.96。本文将不同随机试样的抗剪强度均值作为土石混合体的综合抗剪强度,最终得到的综合抗剪强度参数的内摩擦角为  $30.5^{\circ}$ ,黏聚力为 48.5 kPa,这与现场工程反演得出的抗剪强度参数(内摩擦角为  $30.0^{\circ}$ ,黏聚力为 50.0 kPa)较为吻合,基本可证实了该方法的合理性。

4 结 论

本文从细观结构层次出发,运用计算机随机模拟技术,建立了土石混合体三维细观结构模型的随机重

构方法,考虑块石的不规则形状,建立了土石混合体离散元模型,利用大型三维直剪试验研究了块石空间分布对土石混合体的力学特性,得到如下 2 点结论。

(1) 土石混合体的力学特性受内部块石空间分布影响显著。在相同含石量和级配下,不同块石空间分布的土石混合体试样的剪应力 - 剪切位移曲线和法向位移 - 剪切位移曲线均不相同,尤其是在峰后表现出了明显的差异性,且后者开始出现差异性相对于前者滞后。另外,块石的空间分布不仅影响了土石混合体的应力应变关系和强度特性,而且也影响了其剪胀特性。

(2) 土石混合体剪切破坏后形成的剪切带的形态与其内部块石空间分布密切相关。在剪切过程中,受剪切面上块石阻碍的影响,剪切带表现出了明显的“绕石”现象,导致剪切带形态曲折不平;且受这一因素的影响,在相同含石量下,不同块石空间分布的土石混合体试样,剪切破坏后形成的剪切带的形态也均不相同,且差异较大。

参考文献:

[1] 油新华. 土石混合体的随机结构模型及其应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2002. (YOU Xin-hua. Stochastic structural model of the earth-rock aggregate and its application[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2001. (in Chinese))

[2] ZHANG Q, XU W Y, ZHANG J C, et al. Deformation and control engineering related to huge landslide on left bank of Xiluodu reservoir, Southwest China[J]. European Journal of Environmental & Civil Engineering, 2013, 17(S1): 249 - 268.

[3] ZHOU J W, WU W Y, YANG X G, et al. The 28 October 1996 landslide and analysis of the stability of the current Huashiban slope at the Liangjiaren Hydropower Station, Southwest China[J]. Engineering Geology, 2010, 114(1): 45 - 56.

[4] 廖秋林, 李 晓, 郝 钊, 等. 土石混合体的研究现状及研究展望[J]. 工程地质学报, 2006, 14(6): 800 - 807. (LIAO Qiu-lin LI Xiao HAO Zhao, et al. Current status and future trends of studies on rock and soil aggregates (RSA)[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(6): 800 - 807 (in Chinese))

[5] 孙华飞, 鞠 杨, 王晓斐, 等. 土石混合体变形破坏及细观机理研究的进展[J]. 中国科学 (技术科学), 2014, 44(2): 172 - 181. (SUN Hua-fei, JU Yang, WANG Xiao-fei, et al. Review of the study on deformation, failure and the

- mesomechanisms of rock-soil mixture[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2014, **44**(2): 172 - 181. (in Chinese))
- [6] ZHANG Q, XU W Y, LIU Q Y, et al. Numerical investigations on the mechanical characteristics and failure mechanism of outwash deposits based on random meso-structures using the discrete element method[J]. *Journal of Central South University*, 2017, **24**(12): 2894 - 2905.
- [7] 王 宇, 李 晓, 赫建明, 等. 土石混合体细观特性研究现状及展望[J]. *工程地质学报*, 2014, **22**(1): 112 - 123. (WANG Yu, LI Xiao, HE Jian-ming, et al. Research status and prospect of rock and soil aggregate[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, **22**(1): 112 - 123. (in Chinese))
- [8] 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))
- [9] 金 磊, 曾亚武, 李 欢, 等. 基于不规则颗粒离散元的土石混合体大三轴数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(5): 829 - 838. (JIN Lei, ZENG Ya-wu, LI Huan, et al. Numerical simulation of large-scale triaxial tests on soil-rock mixture based on DEM of irregularly shaped particles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(5): 829 - 838. (in Chinese))
- [10] 徐文杰, 王 识. 基于真实块石形态的土石混合体细观力学三维数值直剪试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, **35**(10): 2152 - 2160. (XU Wen-jie, WANG Shi. Meso-mechanics of soil-rock mixture with real shape of rock blocks based on 3D numerical direct shear test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, **35**(10): 2152 - 2160. (in Chinese))
- [11] 马怀发. 全级配大坝混凝土动态性能细观力学分析研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2005. (MA Huai-fa. Study on dynamic behaviors of fully-graded dam concrete based on meso-mechanics[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2005. (in Chinese))
- [12] ELIÁŠ J. Simulation of railway ballast using crushable polyhedral particles[J]. *Powder Technology*, 2014, **264**: 458 - 465.
- [13] 马 刚, 周 伟, 常晓林, 等. 堆石体三轴剪切试验的三维细观数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(5): 746 - 753. (MA Gang, ZHOU Wei, CHANG Xiao-lin, et al. 3D mesoscopic numerical simulation of triaxial shear tests for rockfill[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(5): 746 - 753. (in Chinese))
- [14] 武 亮, 王 菁, 何修伟. 多面体骨料大体积混凝土三维细观模型生成[J]. *应用力学学报*, 2015, **32**(4): 657 - 663. (WU Liang, WANG Jin, HE Xiu-wei. Generation of 3D mesoscopic model of mass concrete based on polyhedral aggregate[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2015, **32**(4): 657 - 663. (in Chinese))
- [15] WANG Z M, KWAN A K H, CHAN H C. Mesoscopic study of concrete: I generation of random aggregate structure and finite element mesh[J]. *Computers & Structures*, 1999, **70**(5): 533 - 544.
- [16] Itasca Consulting Group Inc. PFC 5.0 help manual[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc, 2014.
- [17] LINDQUIST E S. The strength and deformation properties of mélange[D]. Berkeley: University of California at Berkeley, 1994.