

DOI: 10.11779/CJGE201908020

基于围压柔性加载的土石混合体大型三轴试验 离散元模拟研究

张 强^{1, 2}, 汪小刚¹, 赵宇飞¹, 周家文², 孟庆祥³, 周梦佳¹

(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;
3. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 综合运用计算机三维扫描与随机模拟技术, 建立了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和离散元模型, 考虑围压柔性加载, 基于柔性黏结颗粒膜方法, 采用颗粒流程序对不同土石混合体试样进行了不同围压下的大型离散元三轴试验模拟, 研究了块石含量和空间分布对土石混合体力学特性和变形破坏规律的影响。数值模拟结果表明: 土石混合体的强度和抵抗变形的能力随含量和围压的增大而增强, 且在相同含石量下, 受内部块石空间分布的影响, 试样的内摩擦角和黏聚力虽会表现出一定的离散性, 但总体上, 内摩擦角随着含石量增加基本呈线性增加, 而黏聚力却随着含石量增加逐渐减小; 在围压柔性加载下, 土石混合体试样表现为鼓胀变形破坏, 破坏后形成的剪切带为一个曲折条带, 形态上呈非对称的 X 形分布, 厚度约为试样高度的 1/3~1/2 倍, 且试样的破坏形态及内部剪切带大小和分布形态不仅受块石含量和空间分布影响, 而且也取决于围压大小; 土石混合体试样在破坏过程中内部剪切带的形成是伴随局部颗粒的转动开始的, 在应变到达峰值应变时, 局部发生转动的颗粒相互连接贯通, 此时剪切带已基本形成, 此后随着应变继续增加, 受峰后鼓胀变形的影响, 试样内部颗粒的转动仍会发生一定的变化, 同时伴随着剪切带大小和分布形态也发生相应的变化。

关键词: 土石混合体; 力学特性; 变形破坏; 大型三轴试验; 离散元; 柔性加载

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)08-1545-10

作者简介: 张 强(1986—), 男, 博士后, 主要从事复杂岩土体多尺度灾变机理与数值模拟等方面的研究。E-mail: zhangq@iwhr.com。

Discrete element simulation of large-scale triaxial tests on soil-rock mixtures based on flexible loading of confining pressure

ZHANG Qiang^{1, 2}, WANG Xiao-gang¹, ZHAO Yu-fei¹, ZHOU Jia-wen², MENG Qing-xiang³, ZHOU Meng-jia¹

(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; 3. College of Civil
and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Based on the computer three-dimensional scanning and stochastic simulation technologies, the three-dimensional random meso-structure models and discrete element models for soil-rock mixture (S-RM) samples with different stone contents and spatial distributions are established. Considering the flexible loading of confining pressure, the large-scale numerical triaxial tests on the S-RM samples under different confining pressures based on the flexibly-bonded particles method are conducted by particle flow code, and the effects of the stone content and spatial distribution on their mechanical properties and deformation and failure characteristics are studied. The numerical simulation results show that the strengths and deformation resistibility capacities of the S-RM samples increase with the increase of stone content and confining pressure, and their internal friction angles and cohesions vary to a certain extent under the same content but different spatial distributions of stones. However on the whole, the internal friction angle increases linearly with the increase of stone content, while the cohesion decreases. Under the flexible loading of confining pressure, the S-RM samples show bulging deformation and failure mode, and the shear band formed after failure is a meandering strip with an asymmetric X-shaped distribution, whose thickness is about 1/3~1/2 times the height of the S-

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: 2018-08-07

RM samples. Moreover, the failure mode and the thickness and shape of shear band are affected by the stone content and spatial distribution and the confining pressure. The shear band formation is accompanied by the rotations of the local particles in the S-RM sample. When the strain reaches the peak strain, the locally rotating particles are connected to each other, indicating that the shear band has basically formed at this time. Since then, as the axial strain increases continually, the rotations of the internal particles still change because of the effect of the bulging deformation after the peak, and the thickness and shape of the shear band also change accordingly.

Key words: soil-rock mixture; mechanical property; deformation and failure; large-scale triaxial test; discrete element method; flexible loading

0 引言

土石混合体^[1] (soil-rock mixture, S-RM) 系指一类由不同粒径碎块石和土体构成的特殊地质材料, 在自然界堆积层边坡和滑坡体中分布广泛, 同时也是路基和土石坝工程中常用的填筑材料。近年来, 随着中国水利水电工程及道路工程的兴建, 越来越多的岩土工程都不可避免地会涉及到土石混合体, 作为一种不同于一般岩土体的特殊岩土介质, 由于介质复杂的力学行为和变形破坏机制, 已逐渐成为了岩土工程界广泛关注和研究的对象^[2-3]。

纵观当前国内外对土石混合体的研究, 常用的研究方法有物理试验和数值试验。在物理试验方面, 为了考虑大粒径的块石, 室内常采用大型三轴试验对土石混合体力学特性与破坏机制进行研究。目前许多学者^[4-6]在此方面已开展过一系列的研究, 且研究主要集中在宏观尺度方面, 主要分析细观结构特征(如块石形态、空间分布、含量、级配等)对宏观力学特性和变形破坏的影响, 而受限于试验观察技术限制, 试验中难以从细观颗粒尺度上对土石混合体的变形破坏进行深入分析, 如土石颗粒运动规律、内部结构损伤开裂及剪切带的形成与演化。另外, 开展室内大型三轴物理试验也需要花费大量的人力、物力和财力。

近年来, 随着非连续数值模拟方法的发展, 基于离散元的虚拟数值试验技术在土石混合体的研究中发挥了重要作用。相较于物理试验, 基于离散元的虚拟数值试验不仅花费代价小且具有可重复性, 而且在上述的细观颗粒尺寸研究方面也具有巨大的优势。虽然目前已有关于学者^[7-8]采用离散元对土石混合体的大型三轴试验进行了模拟, 但其模拟中均存在一个较大的缺陷: 即, 当前离散元三轴试验模拟中是通过对侧向圆柱形刚性墙体进行伺服来对试样进行围压加载, 由于刚性墙体不发生变形, 在围压加载过程中将会限制试样的侧向自由变形。相反, 室内三轴试验则是通过试样外层橡皮膜对试样进行围压加载, 加载过程中可以允许试样侧向自由变形, 故在离散元中采用刚性圆柱形墙体不能合理地模拟室内三轴试验中橡皮膜对围压的柔性加载特性。然而, 对于土石混合体这种复杂非

均匀介质, 在轴向荷载作用下, 其将会发生极不均匀的变形, 采用刚性墙体加载围压将对土石混合体的变形破坏产生影响。张强等^[9]通过对土石混合体在刚性和柔性两种围压加载方式下的双轴试验模拟已证实, 不同围压加载方式对土石混合体的破坏过程与破坏型式均有显著影响。

针对常规离散元三轴试验中对于室内三轴试验围压加载模拟的不合理性, 目前一些学者尝试采用分段组合墙体^[10]和柔性黏结颗粒膜^[11-12]替代圆柱形墙体来模拟室内试验中橡皮膜对围压的柔性加载特性, 并在应用中取得了较好的模拟效果。金磊等^[13]采用改进分段组合墙体方法对土石混合体的大型三轴试验进行了模拟, 数值试验中也模拟出了土石混合体的鼓胀变形。该方法虽然原理简单且易于实现, 但由于受离散元中墙体伺服机制的限制, 各分段墙体在围压伺服过程中只能沿试样径向发生水平移动, 使得试验中各分段墙体施加在试样上的侧向围压始终沿水平径向方向, 而却忽略了试验加载过程中由于试样发生鼓胀变形后所引起围压加载方向的变化, 其对试验模拟结果也将会产生影响, 故采用分段组合墙体方法仍难以对室内三轴试验中橡皮膜的柔性加载特性做出合理的模拟。相比而言, 目前柔性黏结颗粒膜方法是最为合理的模拟方法, 在离散元模拟中应用也极为广泛。

为此, 本文综合运用计算机三维扫描与随机模拟技术, 建立土石混合体的三维随机细观结构模型, 在此基础上, 建立不同块石含量和空间分布的土石混合体离散元模型, 并基于柔性黏结颗粒膜的围压柔性加载模拟方法, 利用 PFC5.0 程序开展不同围压下土石混合体大型三轴试验模拟, 研究块石含量和空间分布对土石混合体力学特性与变形破坏的影响, 并从颗粒细观尺度上分析在变形破坏过程中土石混合体内部剪切带的形成与演化规律。

1 土石混合体三维模型生成

1.1 随机细观结构模型构建

由于实际中土石混合体内部块石分布极为复杂且随机性较大, 建立土石混合体的三维真实细观结构模

型难度较大, 在数值模拟时, 通常构建符合统计意义上的随机细观结构模型来开展研究。对于土石混合体细观结构随机模型的构建, 目前较为常用的方法是首先通过随机构造方法^[14-15]或计算机扫描方法^[16]获得不规则块石的三维几何模型, 然后, 以此为基础, 利用计算机随机模拟建立土石混合体的随机细观结构模型。为了考虑块石的真实复杂形态, 文中综合运用计算机三维扫描和随机模拟技术构建土石混合体的三维细观结构模型。

如图 1, 具体步骤如下: 在试验前, 先从土石混合体制样料中选取不同粒径的块石进行计算机三维激光扫描, 获得块石的三维几何模型, 以此建立不同粒径块石数据库; 其次, 以块石数据库为样本, 从数据库中随机选取块石模型, 并按照土石混合体中块石级配对块石大小进行缩放后, 生成不同含石量块石集合; 最后, 将块石集合中所有块石随机投放到指定区域内, 建立土石混合体的三维随机细观结构模型。另外, 在进行块石投放时, 可以通过设置不同随机数序列的生成种子, 以改变块石在区域空间内的投放位置和方位, 由此生成相同含石量而不同块石空间分布的随机细观结构模型, 既模型中块石集合是相同的, 但块石在模型中的空间分布形式是不同的。

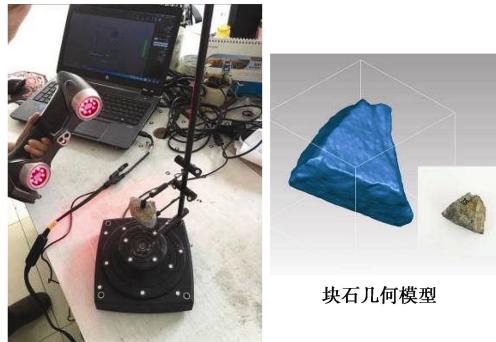


图 1 块石计算机三维激光扫描过程

Fig.1 3D laser scanning process of stones by computer

图 2 所示为室内大型三轴试验中所用的土石混合体的颗粒级配曲线。根据 Medley 等^[17]建议的土/石阀值的取值, 文中将土/石阀值定为 20 mm, 结合试验中所允许的最大粒径, 只选取粒径尺寸在 20~60 mm 的颗粒级配曲线进行模型重构。如图 3, 根据试验尺寸, 建立了不同结构特征的土石混合体随机细观结构模型, 模型尺寸为 30 cm×60 cm (直径×高度)。其中, 为了考虑含石量的影响, 分别建立了含石量为 30%, 45%, 60% 的随机细观结构模型, 见图 3 (a)。同时, 考虑块石空间分布的影响, 在每一含石量下, 又分别生成了 3 个不同随机细观结构模型。图 3 (b) 给出了含石量为 30% 下的不同空间分布随机细观结构模型。

需要指出的是, 文中所述的含石量为质量含石量 (C), 即块石总质量占土石混合体试样总质量的百分比。

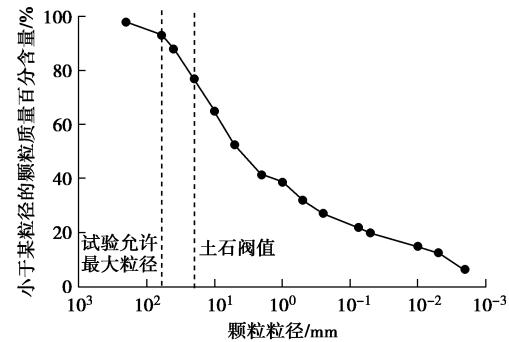
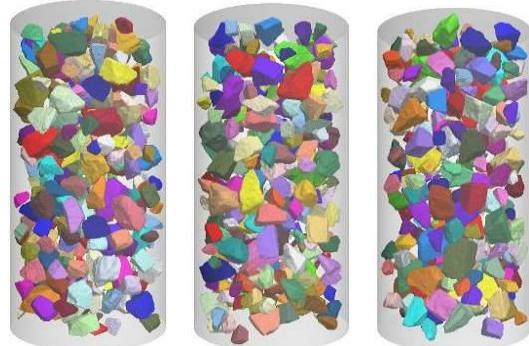


图 2 土石混合体颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle-size distribution curves of S-RM



(a) 不同含石量 (C 依次为 30%, 45%, 60%)



(b) 相同含石量不同空间分布 ($C=30\%$)

图 3 不同结构特征的土石混合体随机细观结构模型

Fig. 3 Random meso-structural models for S-RM with different characteristics

1.2 复杂块石的颗粒簇模型生成

在三维情况下, 离散元中的基本颗粒单元为球体, 对于复杂形态的块石, 通常采用由多个球体组成的颗粒簇 (clump) 进行模拟。一般情况下, 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, 颗粒簇越能够较好地表征块石的不规则形状, 但也会降低离散元模拟的计算效率。尤其是在高含量下, 由于土石混合体中块石数目较多, 将会极大地降低数值计算的效率。在模拟中, 为了获得一个可接受的计算效

率, 文中在建立块石的颗粒簇模型时, 在块石形状表征精度上和数值计算效率之间做了一个折中处理, 既保证颗粒簇能够表征块石的不规则形状, 又确保颗粒簇模型中的球体数目适中, 以提高模拟效率。

文中采用 PFC5.0 程序自带的 clump template 模板中的 bubblepack 方法来建立复杂块石的颗粒簇模型。该方法有 4 个控制参数 (distance, ratio, radfactor, refinenum, 具体介绍见 PFC 手册^[18]), 通过调整这 4 个参数可以生成不同球体数目的颗粒簇。如图 4, 通过调整参数, 生成了不同球体数目的块石颗粒簇模型。通过对不同球体数目的颗粒簇模型的数值计算效率, 文中最终选用 112 个球体数目的颗粒簇模型来模拟不规则块石, 该模型既能满足在高含石量下的计算效率要求, 又基本上能够表征块石的不规则形状。该模型生成所对应的 4 个控制参数为 distance=150.0, radfactor=2.0, ratio=0.3, refinenum=1。

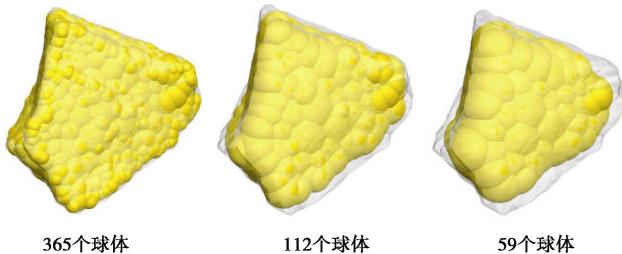


图 4 不同球体数目的块石颗粒簇模型

Fig. 4 Clump models for a stone with different numbers of spheres

1.3 土石混合体离散元模型建立

基于构建的随机细观结构模型, 考虑块石复杂形态, 文中采用如下方法建立土石混合体离散元模型, 模型中土体颗粒采用单个球体模拟, 块石采用颗粒簇模拟。如图 5 所示, 该方法包括以下 3 个步骤:

(1) 先将构建的随机细观结构模型导入 PFC 中, 然后根据前文已确定的控制参数, 利用 clump template 模板中的 bubblepack 方法, 依次建立细观结构中每个块石的颗粒簇模型, 见图 5 (a)。

(2) 根据随机细观模型尺寸, 建立一个相同尺寸的纯土体模型, 模型中球体颗粒的平均半径约取为最小块石粒径的 1/5 倍, 见图 5 (b)。

(3) 将建立的块石颗粒簇模型加入到纯土体模型中, 删除与颗粒簇相重叠的土体颗粒, 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, 不存在局部架空的情况, 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 1‰ 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。图 5 (c) 所示为最终建立的土石混合体离散元模型。



(a) 块石颗粒簇 (b) 纯土模型 (c) 土石混合体模型
图 5 土石混合体离散元模型建立

Fig. 5 Establishment of DEM model for S-RM

利用上述方法可以生成较为密实的不同块石含量可空间分布下的土石混合体离散元模型, 保证了数值模拟结果的可靠性。

2 离散元三轴试验围压柔性加载模拟原理

2.1 柔性橡皮膜的模拟

在三轴试验模拟中, 采用由相同大小彼此相互黏结的颗粒组成的柔性颗粒膜模拟室内试验中试样外层的橡皮膜, 且颗粒膜内部颗粒间的黏结均被设置为接触黏结模型, 以保证颗粒间只传递力而不传递力矩, 模拟三轴试验中橡皮膜的柔性加压功能。

如图 6, 柔性颗粒膜是由若干层相互错位排列的颗粒组成, 且颗粒间彼此相切。根据颗粒位置的几何关系, 可确定柔性膜的每个颗粒的初始中心位置。

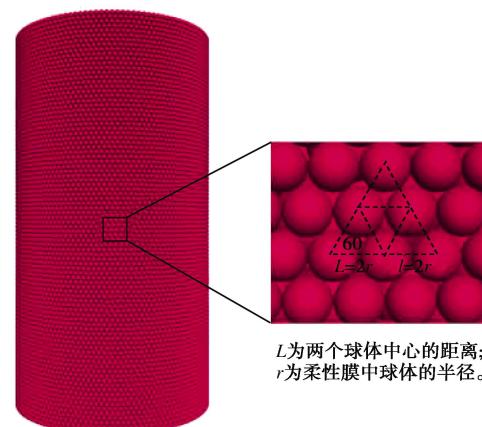


图 6 柔性颗粒膜

Fig. 6 Flexible membrane composed of balls with same radii being tangent to each other

2.2 围压恒定加载原理

在试验加载过程中, 围压是以等效集中力的形式施加到外侧的柔性膜颗粒上, 且在每一步计算中, 根据膜颗粒的位置变化来更新颗粒上所施加的等效集中力, 以保持加载过程中围压的恒定。见图 6, 对于任一膜颗粒而言, 除底层和顶层颗粒外, 每个颗粒均与周围 6 个颗粒黏结在一起。如图 7, 以[#]0 球体为例, 根据有限元等效节点力计算原理, 施加在该颗粒上的等效集中力 \bar{F} 可按如下公式计算:

$$\bar{F} = \sum_{i=1}^6 \frac{1}{3} \sigma_3 A_i \bar{n}_i , \quad (1)$$

式中, σ_3 为试验围压, A_i 和 \bar{n}_i 分别为第 i 个三角形单元的面积和单位法向量。以第一个三角形 $\triangle 012$ 为例, 其面积 A_i 可按如下式计算:

$$A_i = \frac{1}{2} |\bar{l}_1 \times \bar{l}_2| , \quad (2)$$

式中, \bar{l}_1 , \bar{l}_2 为由[#]0 球体中心位置 \bar{p}_0 到[#] i 球体中心位置 \bar{p}_i 的向量,

$$\bar{l}_i = \bar{p}_i - \bar{p}_0 \quad (i=1,2,3,\dots,6) , \quad (3)$$

相应地, \bar{n}_i 可由如下公式计算:

$$\bar{n}_i = \frac{\bar{l}_1 \times \bar{l}_2}{|\bar{l}_1 \times \bar{l}_2|} . \quad (4)$$

基于上述原理, 在试验过程中, 通过调整施加在柔性颗粒膜上的等效集中力, 维持试验围压的恒定, 模拟室内三轴试验中围压的加载。同时, 试验中为了防止柔性颗粒膜的破坏, 将颗粒间的黏结强度设置为一个较大的值 (表 1)。

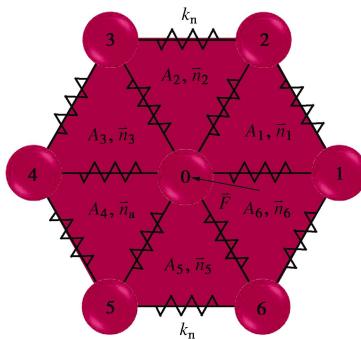


图 7 柔性膜颗粒上施加的等效集中力计算示意图

Fig. 7 Schematic diagram of calculation of equivalent concentration force exerted on membrane particles

2.3 细观模型与参数标定

根据上述建立的基于围压柔性加载的离散元三轴试验, 对土石混合体室内大型三轴试验进行参数标定, 根据土石颗粒的接触特性, 标定中土体颗粒间的接触由线性接触黏结模型 (linearcpnd model) 进行模拟, 块石颗粒及土石颗粒间的接触由线性接触模型 (linear

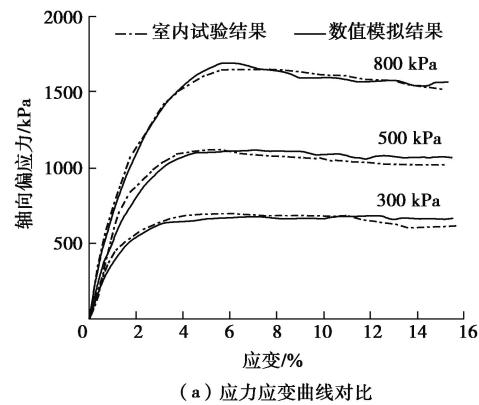
model) 进行模拟。文中通过对含石量约为 25% 的土石混合体试样室内大型三轴试验结果的标定, 获得了土石颗粒细观接触模型参数, 见表 1。

表 1 土石混合体颗粒细观接触模型参数

Table 1 Contact parameters between particles in S-RM

颗粒	密度 /(kg·m ⁻³)	接触刚度/(N·m ⁻¹)		黏结强度/N		摩擦系数
		法向	切向	法向	切向	
土体	1900	5.0×10^6	2.0×10^6	3.0×10^2	3.0×10^2	0.45
块石	2650	1.0×10^8	1.0×10^8	—	—	1.0
土-石	—	4.8×10^6	1.9×10^6	0.0	0.0	0.45
膜	1000	5.0×10^5	5.0×10^5	1×10^{300}	1×10^{300}	0.0

图 8 给出了土石混合体室内大型三轴试验与数值试验对比结果。由图 8 (a) 可以看出, 数值试验获得的试样应力应变曲线与室内试验的吻合度较好, 且由图 8 (b) 也可以看出, 数值试验模拟的试样破坏形态与室内试验的也较为一致。



(a) 应力应变曲线对比



(b) 破坏形态进行对比 (500 kPa)

图 8 土石混合体室内大型三轴试验结果与数值模拟结果对比

Fig. 8 Comparison of results obtained by indoor large-scale triaxial tests and numerical simulations for S-RM

3 土石混合体大型三轴试验模拟分析

采用标定出的土石混合体参数, 利用上述围压加载原理, 分别对建立的不同块石含量和空间分布的土石混合体试样开展围压为 300, 500, 800 kPa 下的大型离散元三轴试验模拟, 根据模拟结果进行如下分析。

3.1 力学特性分析

图 9 给出了不同含石量土石混合体试样三轴试验模拟获得的应力应变曲线。分析图 9 得出：①对于同一试样，随着围压的增大，其峰值应力在逐渐增大，且峰值应力对应的轴向应变也在相应地增大；②对于不同试样，随着含石量的增加，在相同围压下，试样峰值应力在逐渐增大，且峰值应力对应的轴向应变也在逐渐增大。由此表明，随着围压和含石量的增加，土石混合体的强度和抵抗变形的能力均得到相应的提高。

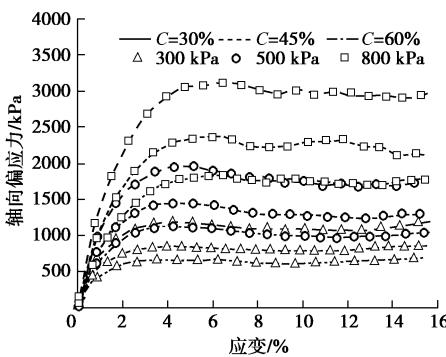


图 9 不同含石量土石混合体试样的应力应变曲线 ($C=30\%$, 45% , 60%)

Fig. 9 Stress-strain curves of S-RM samples with different stone contents of 30%, 45% and 60%

图 10 给出了相同含石量 ($C=45\%$) 下不同块石空间分布的土石混合体试样三轴试验模拟获得的应力应变曲线。由图 10 可以看出，即使由相同含量的块石集合构成的土石混合体试样，由于试样内部块石空间分布的不同，试样应力应变曲线表现出了差异，且差异主要表现在峰后阶段，而且在高围压下差异较明显。

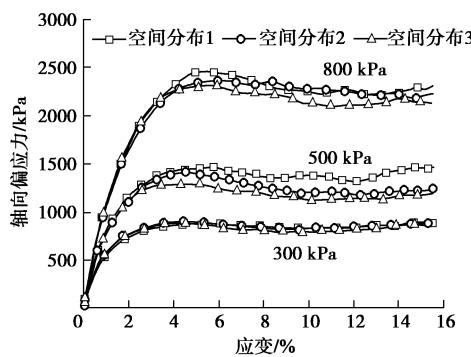


图 10 相同含石量下不同块石空间分布的土石混合体试样应力应变曲线 ($C=45\%$)

Fig. 10 Stress-strain curves of S-RM samples with same stone content but different spatial distributions of stones ($C=45\%$)

根据数值试验获得的不同土石混合体试样应力应变曲线，由莫尔库仑强度计算公式，获得了不同试样

的抗剪强度，见图 11。由图 11 可以看出，相同含石量的试样，由于内部块石空间分布不同，试样的内摩擦角和黏聚力虽表现出了一定的离散性，但从总体上来看，土石混合体试样的内摩擦角随着含石量增加基本呈线性增加，而黏聚力却随着含石量增加逐渐减小，这主要是由于土石混合体的黏聚力主要来自于细颗粒的土体部分，而随着含石量增加，发挥黏聚力作用的土体含量逐渐减少，因而其黏聚力也逐渐减低，这一变化规律与文献[19]研究结果相一致。

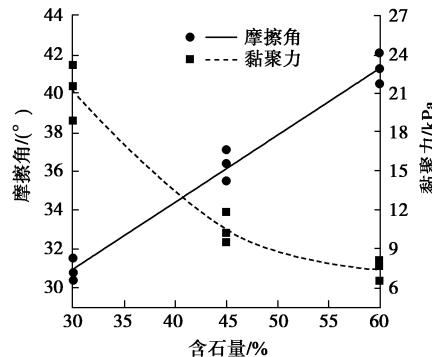
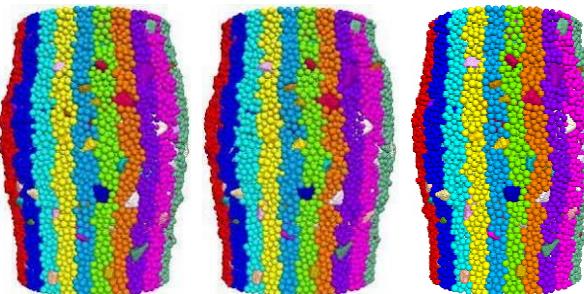


图 11 土石混合体试样抗剪强度参数与含石量的关系

Fig. 11 Relationship between shear strength parameters and stone content of S-RM samples

3.2 变形破坏特征分析

图 12 给出了不同土石混合体试样试验后的破坏形态。总体上，从图 12 中可以看出，在围压柔性加载下，土石混合体试样破坏后侧向均表现出了不均匀的鼓胀变形，与室内试验破坏后的结果相吻合。具体而言，由图 12 (a) 可以看出，对于同一土石混合体试样，在不同围压下，试样破坏后的形态是不同的，围压大小影响土石混合体的变形破坏形态，由此也体现出了土石混合体的非均质、非均匀特性。由图 12 (b) 可以看出，在相同围压下，不同含石量的土石混合体试样破坏后的形态也是不同的，且由图 12 (c) 可以看出，在相同围压下，即使由相同含量的块石集合构成的土石混合体试样，由于试样内部块石的空间分布不同，其破坏形态也不相同的，这体现出了土石混合体变形破坏规律的复杂性。



(a) 同一试样不同围压下的破坏形态 ($C=45\%$, 围压为 300, 500, 800 kPa)

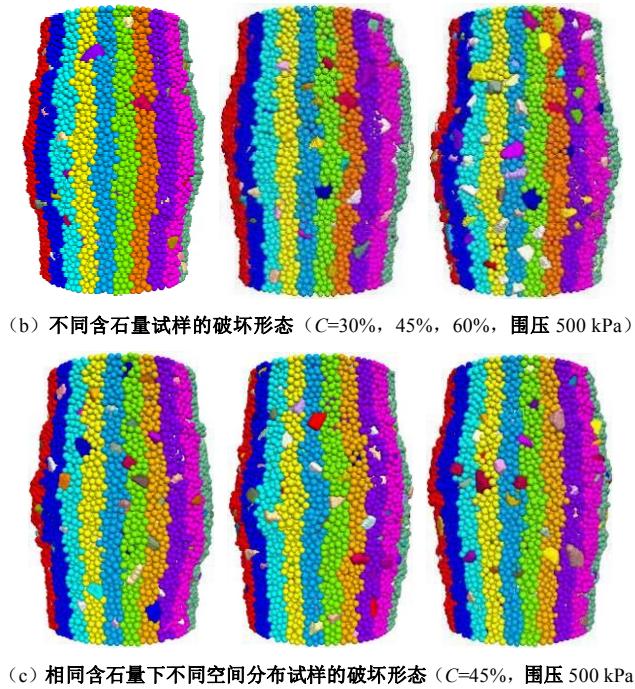


图 12 不同土石混合体试样的破坏形态

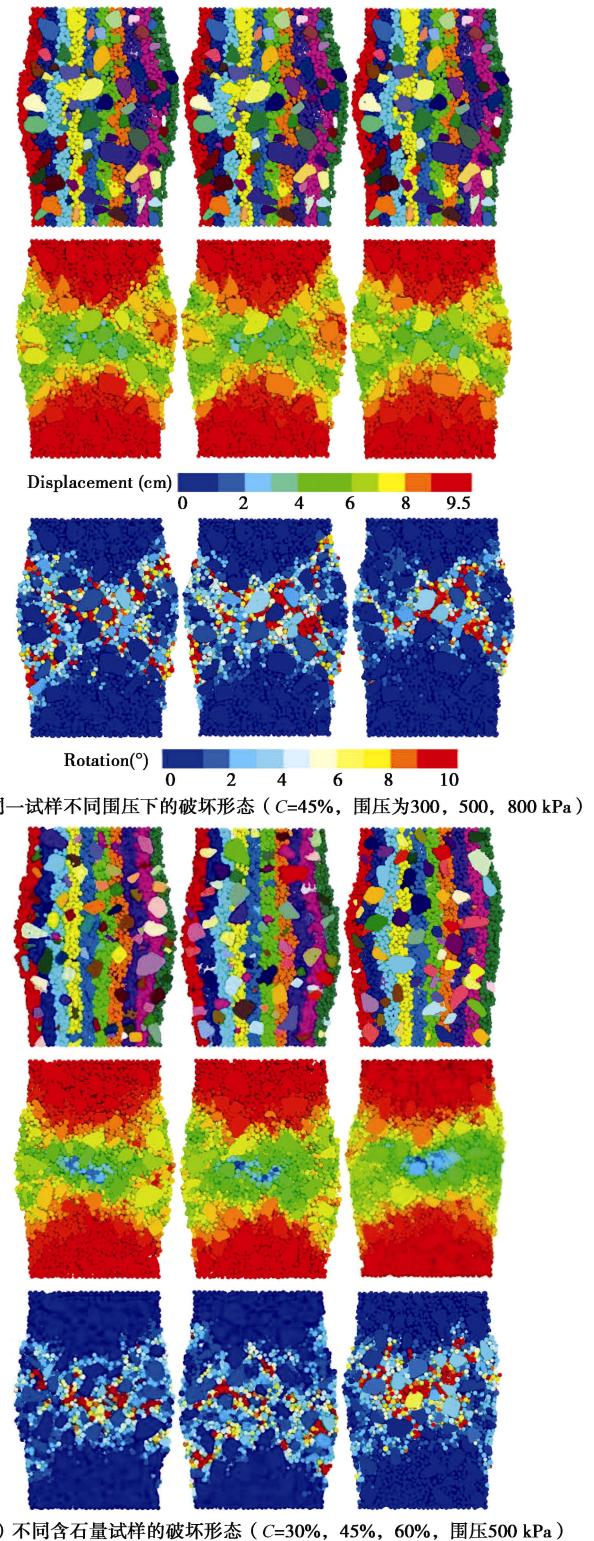
Fig. 12 Failure shapes of different S-RM samples

文献[20]研究表明, 颗粒材料破坏后通常形成一个剪切带, 并且剪切带内部颗粒存在明显的转动。通过对破坏后的土石混合体试样进行切片后, 根据试样内部颗粒的位移和转动特征, 分析土石混合体试样破坏后形成的剪切带。

通过对图 12 中的土石混合体破坏样沿中心进行竖向切片后, 得到了试样内部的剖切图, 如图 13 所示, 图中给出了剖切图上试样内部颗粒的位移云图和转动云图。由图 13, 首先从破坏样的剖切图可以看出, 破坏后, 试样内部的竖直标记条带发生了明显的鼓胀弯曲变形, 且越靠近试样边缘两侧的条带弯曲变形程度越大; 其次, 由剖切图上颗粒位移云图可以明显看出土石混合体试样破坏后形成的剪切带, 由于受试样内部块石的影响, 剪切带并非一个规则的条带, 而是一个曲折的条带, 其位置基本上位于接近于试样的中部, 且形态上大致呈一个非对称的 X 形分布, 厚度大致约为试样高度的 $1/3 \sim 1/2$ 倍; 最后, 由剖切图中颗粒转动云图可以看出, 土石混合体试样破坏后, 只有剪切带内部的颗粒发生了显著的转动, 而其它部位颗粒的转动则相对较小, 且通过对比土石颗粒转动幅度大小可以发现, 剪切带内部的土体颗粒转动幅度明显较块石的大, 说明了剪切带内部的土石颗粒存在差异性转动, 这主要是由于土石颗粒的转动惯量彼此间存在差异所导致的结果。

另外, 由图 13, 通过对不同土石混合体试样在不同围压下破坏后剪切带形态对比分析发现, 同一试样在不同围压下, 破坏后形成的剪切带的大小和形态也

是不同的, 且剪切带内部颗粒的转动情况也存在差异, 见图 13 (a); 在相同围压下, 即使由相同含量的块石集合构成的土石混合体试样, 由于块石的空间分布不同, 剪切带的大小和形态也各不同, 且剪切带内部颗粒的转动情况也不同, 见图 13 (b); 在相同围压下, 不同含石量试样破坏后的形成的剪切带的大小和形态彼此存在显著差异, 而且剪切带内部颗粒的转动情况也明显不同, 见图 13 (c)。



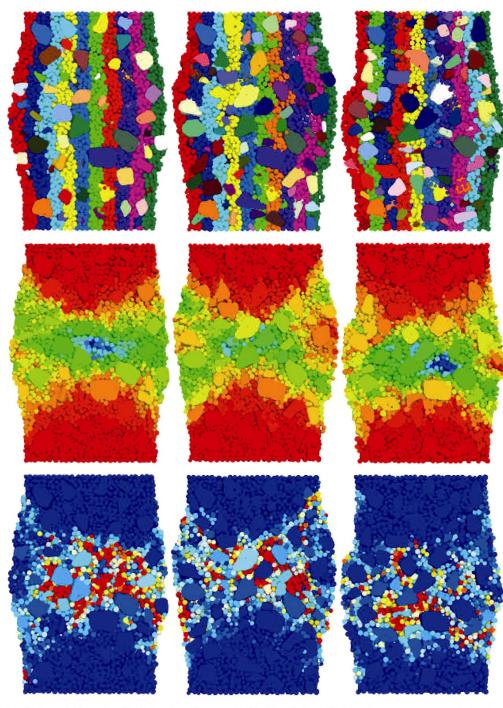
(c) 相同含石量下不同空间分布试样的破坏形态 ($C=45\%$, 围压500 kPa)

图 13 不同结构特征的土石混合体试样的内部剖切图

Fig. 13 Internal profiles of S-RM samples with different structural characteristics

综合上述, 在围压柔性加载下, 土石混合体试样表现为鼓胀变形破坏, 且破坏后形成的剪切带为一个

曲折条带, 其形态大致呈非对称的 X 型分布, 而且试样的破坏形态及其内部剪切带的大小和分布形态不仅受块石含量和空间分布影响, 而且也取决于围压大小。

3.3 剪切带形成演化过程分析

下面选取土石混合体试样在不同轴向应变下的模拟结果进行切片分析, 进一步研究土石混合体在变形破坏过程中剪切带的形成与演化规律。

图 14 给出了含石量为 45% 的土石混合体试样在不同轴向应变下的剖切图, 图中由上到下分别为不同轴向应变下试样的形态及试样内部颗粒的位移云图和转动云图。

由图 14, 首先通过对比不同轴向应变下试样的形状变化可以看出, 在轴向加载下, 随着轴向应变增加, 试样内部竖直标记条带开始向两侧逐渐发生鼓胀弯曲, 试样的不均匀鼓胀变形也逐渐显现出来, 且试样的鼓胀变形在峰前阶段不明显, 在峰后阶段则较为明显。

其次, 由不同轴向应变下试样内部颗粒的转动云图可以看出, 在轴向加载下, 试样内部剪切带的形成是从局部颗粒的转动开始的, 且随着轴向应变增加, 局部发生转动的颗粒逐渐增多, 当轴向应变到达峰值应变时, 局部发生转动的颗粒已相互连接贯通, 此时剪切带已基本形成, 此后随着轴向应变继续增加, 由于峰后试样的侧向不均匀鼓胀变形逐渐凸显出来, 进

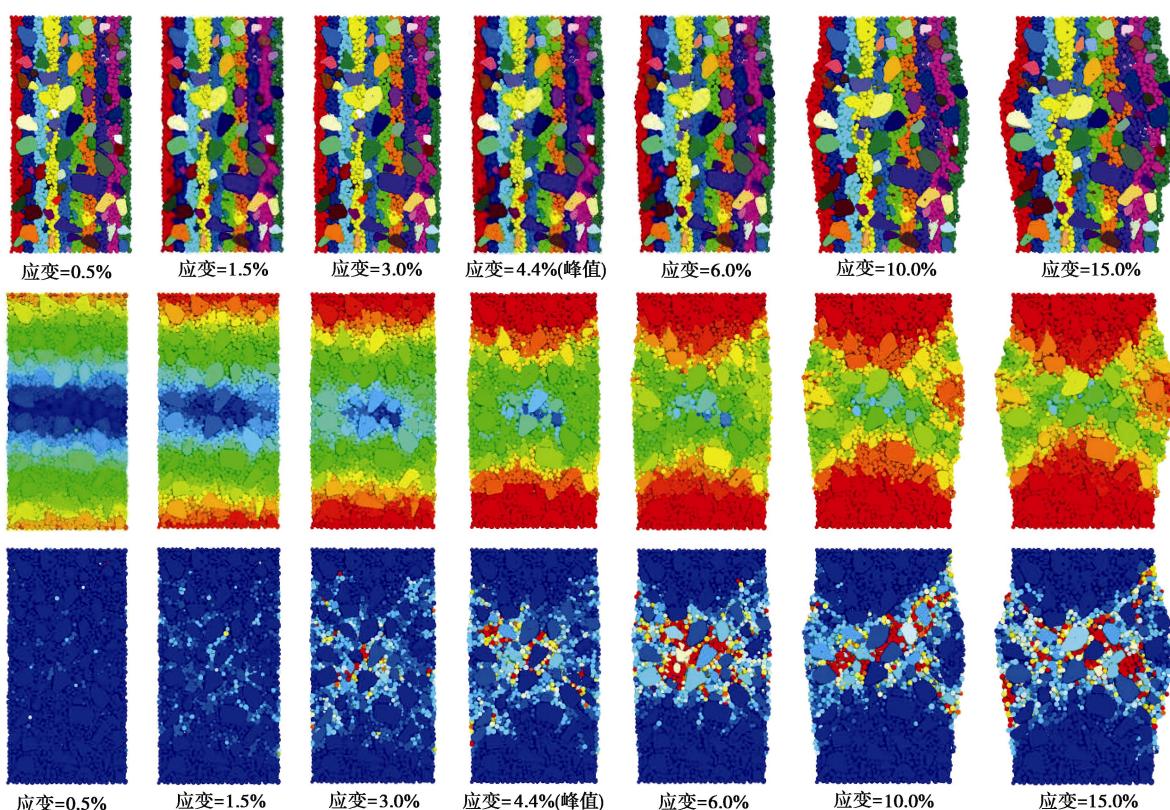


图 14 不同轴向应变下土石混合体试样的内部剖切图

Fig. 14 Internal profiles of S-RM samples under different axial strains

一步引起试样内部的颗粒转动情况发生变化, 同时也伴随着剪切带分布形态和大小发生相应变化。由此可以得出, 在轴向加载下, 土石混合体试样发生破坏后, 所形成的剪切带大小和分布形态取决于当前破坏状态下所对应的轴向应变大小。

最后, 通过综合对比不同轴向应变下试样内部颗粒的位移云图可以发现, 在轴向加载过程中, 由颗粒位移云图的变化, 可以清楚看出剪切带在峰后的演化过程, 但从其变化上却无法反映出剪切带在峰前的形成过程, 相比而言, 从颗粒转动云图上可以反映出剪切带的形成与演化的整个过程。因此, 在颗粒尺度上, 相比颗粒的位移, 颗粒的转动更适合用来分析土石混合体变形破坏过程中剪切带的形成发育过程。

4 结 论

本文综合运用计算机三维扫描和随机模拟建立了不同块石含量和空间分布的土石混合体三轴随机细观结构模型, 基于柔性黏结颗粒膜的围压柔性加载模拟方法, 开展了不同围压下土石混合体的大型离散元三轴试验模拟, 对土石混合体的力学特性与变形破坏规律进行了分析, 得出如下结论:

(1) 土石混合体的强度和抵抗变形的能力随含量和围压的增大而增强。即使在相同含石量下, 由于块石空间分布不同, 土石混合体的内摩擦角和黏聚力虽表现出了一定的离散性, 但总体上来看, 土石混合体的内摩擦角随着含石量增加基本呈线性增加, 而黏聚力却随着含石量增加逐渐减小。

(2) 在围压柔性加载下, 土石混合体试样表现为鼓胀破坏, 破坏后所形成的剪切带为一个曲折条带, 形态上呈非对称的X形分布, 厚度大小约为试样高度的 $1/3 \sim 1/2$ 倍。另外, 土石混合体试样的破坏形态及其内部剪切带大小和分布形态不仅受块石含量和空间分布影响, 而且也取决于围压大小。

(3) 通过对剪切带形成过程分析发现, 土石混合体试样内部剪切带的形成是伴随局部颗粒的转动开始的, 在应变到达峰值应变时, 局部发生转动的颗粒相互连接贯通, 此时剪切带已基本形成, 此后随着应变继续增加, 受峰后不均匀鼓胀变形的影响, 试样内部颗粒的转动仍会发生一定的变化, 同时伴随着剪切带分布形态和大小也发生着相应的变化。在颗粒尺度上, 相比颗粒的位移, 颗粒的转动更适合用来分析土石混合体变形破坏过程中剪切带的形成发育过程。

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, 2002. (in Chinese))

- [2] 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 (RSM)[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2014, 44(2): 172 - 181. (in Chinese))
- [3] 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, HAO 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))
- [4] 夏加国, 胡瑞林, 邱生文, 等. 含超径颗粒土石混合体的大型三轴剪切试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(8): 2031 - 2039. (XIA Jia-guo, HU Rui-lin, QI Sheng-wen, et al. Large-scale triaxial shear testing of soil rock mixtures containing oversized particles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(8): 2031 - 2039. (in Chinese))
- [5] 王江营, 曹文贵, 蒋中明, 等. 不同应力路径下土石混填体变形力学特性大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 424 - 430. (WANG Jiang-ying, CAO Wen-gui, JIANG Zhong-ming, et al. Large-scale triaxial tests on deformation and mechanical behavior of soil-rock aggregate mixture under different stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 424 - 430. (in Chinese))
- [6] 金磊, 曾亚武, 张森. 块石含量及形状对胶结土石混合体力学性能影响的大型三轴试验[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 141 - 149. (JIN Lei, ZENG Ya-wu, ZHANG Sen. Large scale triaxial tests on effects of rock block proportion and shape on mechanical properties of cemented soil-rock mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(1): 141 - 149. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 王新. 土石混合体力学特性影响因素及破坏机制研究[D].

- 武汉：长江科学院，2010.(WANG Xin. Research on influence factors of mechanical characteristics and failure mechanism of soil-rock mixture[D]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2010. (in Chinese))
- [9] 张 强, 汪小刚, 赵宇飞, 等. 不同围压加载方式下土石混合体变形破坏机制颗粒流模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(11): 2051 - 2060. (ZHANG Qiang, WANG Xiao-gang, ZHAO Yu-fei, et al. Particle flow modelling of deformation and failure mechanism of soil-rock mixture under different loading modes of confining pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11): 2051 - 2060. (in Chinese))
- [10] ZHAO X L, EVANS T M. Discrete simulations of laboratory loading conditions[J]. International Journal of Geomechanics, 2009, 9(4): 169 - 178.
- [11] DE B J P, McDOWELL G R, WANATOWSKI D. Discrete element modelling of a flexible membrane for triaxial testing of granular material at high pressures[J]. Géotechnique Letters, 2012, 2(2): 199 - 203.
- [12] CIL M B, ALSHIBLI K A. 3D analysis of kinematic behavior of granular materials in triaxial testing using DEM with flexible membrane boundary[J]. Acta Geotechnica, 2014, 9(2): 287 - 298.
- [13] 金 磊, 郑亚武. 基于三维柔性薄膜边界的土石混合体大型三轴试验颗粒离散元模拟[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 2296 - 2304. (JIN Lei, ZHENG Ya-wu. Numerical simulation of large-scale triaxial test on soil-rock mixture using DEM with three-dimensional flexible membrane boundary[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(12): 2296 - 2304. (in Chinese))
- [14] XU W J, HU L M, GAO W. Random generation of the meso-structure of a soil-rock mixture and its application in the study of the mechanical behavior in a landslide dam[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2016, 86: 166 - 178.
- [15] 张 强. 大型冰水滑坡堆积体工程力学特性及应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2016. (ZHANG Qiang. Study on engineering mechanical properties of large-scale outwash landslide deposits and its application[D]. Nanjing: Hohai University, 2016. (in Chinese))
- [16] 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))
- [17] MEDLEY E W. The engineering characterization of mélanges and similar block-in-matrix rocks(bimrocks)[D]. Berkeley: University of California, 1994.
- [18] Itasca Consulting Group Inc. PFC 5.0 help manual[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc, 2014.
- [19] XU W J, XU Q, HU R L. Study on the shear strength of soil - rock mixture by large scale direct shear test[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, 48(8): 1235 - 1247.
- [20] HALL S A, BORNERT M, DESRUES J, et al. Discrete and continuum analysis of localized deformation in sand using X-ray CT and volumetric digital image correlation[J]. Géotechnique, 2010, 60(5): 11 - 20.