

土石混合体力学特性的颗粒离散元 双轴试验模拟研究

田湖南, 焦玉勇, 王 浩, 马江锋

(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: 土石混合体作为土体和碎石的混合体, 其宏观力学特性与碎石特性密切相关。采用试验研究和数值模拟相结合的方法, 对土石混合体的力学特性进行研究。基于 FISH 语言开发颗粒流的多边形碎石生成模块, 通过室内试验校核颗粒流模型的细观参数, 建立土石混合体双轴试验模型。提出以形状因子 m 作为衡量碎石磨圆度的指标, 对碎石形状进行了量化。研究了碎石含量、强度、形状对土石混合体力学特性影响, 探讨碎石对土体强度提高的细观原因, 揭示土石混合料的强度指标随各主要影响因素的变化趋势。结果表明: 碎石含量和强度越高, 混合体的强度也越高, 当含石量小于 40% 时, 土石混合体的力学特性受土体主导; 内摩擦角随着碎石含量增加而增大, 而黏聚力却在减小; 随着形状因子的增大, 强度降低, 黏聚力和内摩擦角均减小; 土石混合体中应力分布不均, 在碎石含量较高时, 碎石形成骨架效应, 承担了主要荷载。

关键词: 土力学; 土石混合体; 颗粒流; 碎石形状; 力学特性

中图分类号: TU 44

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2015)增 1-3564-10

RESEARCH ON BIAXIAL TEST OF MECHANICAL CHARACTERISTICS ON SOIL-ROCK AGGREGATE(SRA) BASED ON PARTICLE FLOW CODE SIMULATION

TIAN Hunan, JIAO Yuyong, WANG Hao, MA Jiangfeng

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

Abstract: The soil-rock aggregate(SRA) is composed of soil and rock block and the mechanical characteristics of SRA are closely related to features of rock block. A combination method of experiment research and numerical simulation has been used to study the mechanical properties of SRA. The polygonal rock block generation module was developed using the FISH language. Through laboratory experiments, the relation between macro- and meso-properties was studied. The shape factor m is proposed to quantify the pseplicity of rock block. The PFC model of SRA was established to analyze the effects of rock block features(such as rock block content, rock block strength and rock block shape) on mechanical characteristics of SRA. The micro reason for enhancing strength performance of the SRA which contains a certain amount of rock block was studied. The change tendency of SRA strength parameters affected by factors was revealed. The simulation results indicate that the shear strength of SRA

收稿日期: 2014-04-14; **修回日期:** 2014-05-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB710602); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-05); 国家自然科学基金重点项目(51139004)

作者简介: 田湖南(1984-), 男, 2009 年于中国科学院武汉岩土力学研究所岩土工程专业获硕士学位, 现为博士研究生, 主要从事破碎岩体破坏机制及灾害防治方面的研究工作。E-mail: hntian@whrsm.ac.cn. 通讯作者: 焦玉勇(1968-), 男, 现任研究员、博士生导师。E-mail: yyjiao@whrsm.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0449

increases with the increase of rock block content and rock block strength. When the rock block content is less than 40%, the mechanical characteristics of SRA are dominated by soil. The internal friction angle increases and the cohesion decreases linearly with the increase of rock block content. With the increase of the shape factor m the shear strength of SRA decreases, and the internal friction angle and cohesion decreases. The stress distribution is uneven in SRA. The rock blocks, which generate skeleton, bear the majority of the load.

Key words: soil mechanics; soil-rock aggregate(SRA); particle flow code(PFC); rock block shape; mechanical characteristics

1 引言

土石混合体是一种土体与碎石的混合物^[1]。天然形成的土石混合体多为残坡积物、崩坡积物和冲洪积物等,在三峡库区^[2-3],川西及青藏高原,东南沿海福建、香港等地区广泛分布^[4-6]。在工程建设过程中的土石坝、矿山开采产生的尾矿坝、排土场、碎石土地基、路基也存在大量的土石混合体^[7-9]。这些土石混合体是岩土工程领域经常碰到而又必须妥善处理的地质载体。

土石混合体既不同于一般的均质土体,又不同于一般的破碎岩体,是一种介于均质土体和碎裂岩体之间的特殊工程地质材料。土石混合体的力学特性不仅取决于土、石本身的力学性质,也与土、石的相对比例,碎石形态等密切相关^[10-14],因此,土石混合体的组成与结构性状及由此而产生的力学特性的差异必然导致其复杂的力学机制。

众多学者从不同方面对土石混合体力学特性进行试验研究。武明等^[12, 15-21]开展了土石混合体的剪切试验,分析了碎石含量和形状等因素对强度的影响,研究了抗剪强度指标变化规律。但室内试验由于碎石的粒径效应和试样的扰动以及其他各种原因,其试样和现实相差太大;现场试验则因为试验周期长,费用高,不能大量开展,很难统计出有规律的结果。

近年来许多学者基于颗粒离散元开展了土石混合体的研究。颗粒流离散元在模拟土石混合体力学性状中具有明显的优势。孔祥臣等^[22]采用颗粒离散元,模拟了不同碎石含量的土石混合料的振动击实过程。贾学明等^[23]基于三维颗粒离散元,进行了不同含石量、不同岩性的土石混合料直剪试验模拟研究。董启朋等^[24-25]通过建立二维颗粒离散模型,对土石混合体的直剪试验进行模拟,结果表明:随着含石量增加,剪切应力及其峰值增大,剪切应力峰值对应的剪切位移减小。邵磊等^[26]基于颗粒流开

展了堆石料三轴剪切试验研究,分析了碎石破碎阶段细观参量的变化规律。刘海涛和程晓辉^[27]开展了土石混合体的颗粒流三轴压缩数值试验,研究了碎石尺寸对抗剪强度的影响。成国文等^[28]建立了不同含石量的颗粒流三维模型,发现随着含石率的增加,块石骨架效应越发明显,表现出显著的非均质、非连续性特征。

上述的离散元模拟中主要考虑了含石量对土石混合体力学特性的影响。模型中碎石颗粒形状以圆(球)形或者近似圆(球)形为主,而实际中碎石形状是不规则。因此有必要开展不规则碎石的土石混合体模型研究,开展多因素的系列研究。

本文基于颗粒流离散元,开发了模拟不规则形状且可破碎的碎石生成模块,提出了基于颗粒离散元的土石混合体模拟方法,通过大量数值试验研究了碎石的含量、强度和形状对土石混合体强度特性的影响,分析了土石混合体的强度指标变化规律,探讨了剪切过程的细观特性。

2 土石混合体模型的建立

颗粒离散元法把整个岩土体分解为有限数量的离散单元,每个颗粒或块体为一个单元,根据每一时刻各颗粒间的相互作用和牛顿运动定律的交替反复运用,预测离散结构的力学行为。基于颗粒离散元方法,利用数值试验来研究土石混合体,可以充分考虑土石混合体的高度非均质、非连续、非线性等特点,可以从不同角度探讨其变形机制、强度特征,发现其细观特性。本文采用颗粒流 PFC^{2D} 模拟不同碎石含量、强度和形状的土石混合体的双轴试验,以下是数值试验模型建立的基本过程。

2.1 试验方案

本次试验颗粒流双轴试验的试样尺寸参照大型三轴试验,试样直径 300 mm,高 600 mm(见图 1)。在试验过程中,围压和轴压通过墙体施加,轴向的上下加载板墙体可认为是刚性,其刚度为 10 倍以上

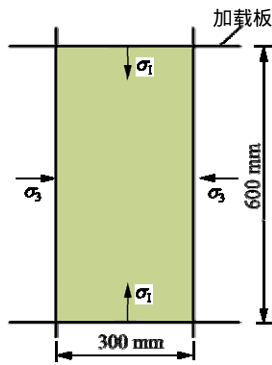


图 1 双轴试验示意图

Fig.1 Schematic diagram of biaxial test

土石混合体材料刚度。围压通过两边侧墙伺服加载，其刚度为土石混合体材料刚度的 1/10，为近似柔性约束。

试验共 14 组，每组 3 个试样，共 42 个试样。每组围压分别保持 0.7, 1.1 和 1.5 MPa，进行双轴试验，具体的试验方案见表 1。

表 1 试验方案
Table 1 Testing program

试样编号	试样数量	含石量/%	碎石单轴抗压强度/MPa	碎石形状
R00-1~3	3	0	-	-
R05-1~3	3	5	10	四边形
不同含石量试验 R10-1~3	3	10	10	四边形
R30-1~3	3	30	10	四边形
R40-1~3	3	40	10	四边形
R50-1~3	3	50	10	四边形
不同碎石强度试验 U10-1~3	3	40	10	三角形
U40-1~3	3	40	40	三角形
U60-1~3	3	40	60	三角形
U100-1~3	3	40	100	三角形
C-1~3	3	40	10	圆形
不同碎石形状试验 P-1~3	3	40	10	五边形
Q-1~3	3	40	10	四边形
T-1~3	3	40	10	三角形

2.2 碎石生成

土石混合体中碎石形状各异，以往的离散元模型中多采用圆形来模拟碎石，无法反映碎石真实形状，直接影响土石混合体数值试验的结果。为了真实反映土石混合体的力学特性，将碎石根据磨圆度分为圆状、次圆状、次棱角状和棱角状四类。在颗粒流模拟中将这 4 种类型的碎石概化为圆形、五边形、四边形和三角形，作为碎石的 4 种典型形状(见表 2)。

表 2 碎石形状概化

Table 2 Generalization of the rock block shape

磨圆度	概化的碎石形状	颗粒流模拟碎石形状示意
圆状	圆形	
次圆状	五边形	
次棱角状	四边形	
棱角状	三角形	

基于上述 4 种典型形状提出碎石的生成算法，开发了 FISH 语言的碎石生成模块。图 2(a)为碎石生成算法流程图。该方法首先得到多边形碎石角点信息，然后在试验区域内生成实体细颗粒，将位于多边形碎石内部的细颗粒赋值作为黏结的碎石，形成土石混合体中的碎石。下面以四边形碎石为例，介绍碎石生成过程。

首先在试验区域内随机生成一系列圆形，其圆心坐标为 (x_i, y_i) ，半径为 r_i 。根据圆心坐标和半径判断生成的圆是否嵌入，即若

$$\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} < r_i + r_j \quad (1)$$

则 2 个圆有嵌入需要重新生成。

由圆心和半径信息，根据下式可计算得到碎石 4 个角点坐标：

$$\left. \begin{aligned} x_n &= x_i + r_i \cos \theta_n \\ y_n &= y_i + r_i \sin \theta_n \end{aligned} \right\} (n=1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

式中： θ_n 为 4 个随机角度。

4 个角点坐标确定了四边形碎石的形状。在试验区域内生成颗粒流实体细颗粒，依次判断细颗粒是否在形成的四边形内。此处采用面积法来判断点面关系，例如对于四边形碎石 ABCD 和某一细颗粒，若颗粒圆心 P 点与四边各边连接形成的三角形面积满足：

$$S_{\Delta PAB} + S_{\Delta PBC} + S_{\Delta PCD} + S_{\Delta PDA} = S_{ABCD} \quad (3)$$

则认为颗粒在碎石 ABCD 内部，给位于四边形范围内的细颗粒赋予黏结的岩石参数，形成碎石。其他形状的碎石生成过程与四边形相近，此处不再赘述。

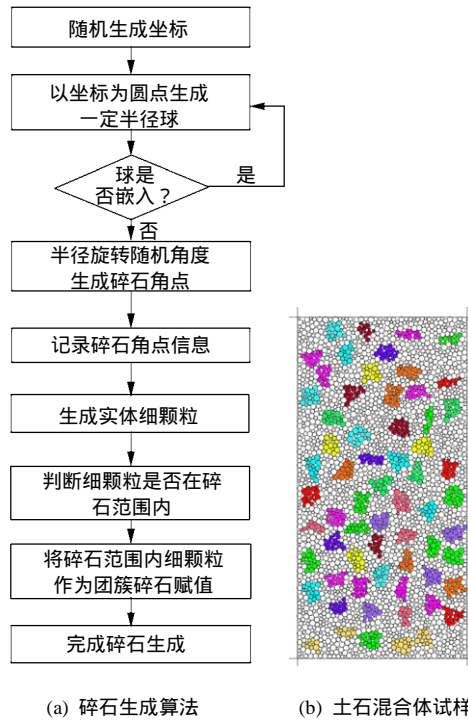


图 2 碎石生成算法流程及生成的土石混合体试样

Fig.2 Algorithm flow of rock block generation and generated SRA model

2.3 颗粒细观参数的确定

颗粒流模拟中，颗粒模型的力学性质由颗粒的接触模型、接触参数等细观参数等来体现。目前还没有完全建立颗粒细观力学参数与宏观力学参数的关系，宏观参数还不能直接转化为颗粒细观参数，需要通过一系列数值试验得到与宏观力学参数相吻合的颗粒细观力学参数。本文采用接触刚度模型和滑动模型模拟土颗粒，采用接触刚度模型、平行黏结模型和滑动模型模拟可破碎的碎石，并通过基本的力学试验确定了土体和碎石的参数。

(1) 土体参数的确定

本文研究的土石混合体以黄土坡滑坡土石混合体为背景，土体的宏观力学参数由黄土坡滑坡土体大型三轴试验得到，具体宏观物理力学参数见表 3。

表 3 土体的宏观力学参数

Table 3 Macro-parameters of mechanical property for soil

密度/(kg · m ⁻³)	内摩擦角 φ/(°)	黏聚力 c/kPa
2 190	15.7	36

建立的土样模型中，如果按照实际土颗粒尺寸建立生成颗粒，则造成颗粒太多无法计算。根据武明等^[12]的研究，本次模拟采用 10 mm 作为土石分界

线，共生成颗粒 3 422 个，最小半径 $R_{\min} = 2.5 \text{ mm}$ ，颗粒最大半径与最小半径之比 $R_{\max} / R_{\min} = 2.0$ ，孔隙率设定为 0.2。

土体颗粒流模拟中需要确定的细观参数包括：法向接触刚度 k_n ，法向切向刚度比 k_n / k_s ，颗粒摩擦因数 μ 。研究发现^[29-31]颗粒法向刚度 k_n 影响土体变形模量，而泊松比则与刚度比相关。在分析土体微观参数时，首先保持 k_n / k_s 和 μ 不变，改变法向刚度 k_n 的大小，通过双轴试验得到土体的变形模量，建立法向刚度与变形模量的关系。根据室内试验确定的土体压缩模量，确定颗粒的法向刚度。然后调整刚度比值和 μ 进行双轴试验，使得数值模拟的应力-应变曲线与室内试验中的三轴试验的应力-应变曲线一致，从而确定土颗粒的细观参数。根据上述流程，进行若干组双轴试验，确定的土颗粒的细观参数见表 4。图 3 为颗粒流模拟应力-应变曲线与室内试验应力-应变曲线的对比。

表 4 土颗粒的细观参数

Table 4 Meso-parameters of PFC particles for soil

颗粒密度/ (kg · m ⁻³)	颗粒最小半 径 R_{\min} /mm	最大最小 半径之比 R_{\max} / R_{\min}	法向接触 刚度 k_n / MPa	接触刚度 比 k_n / k_s	摩擦因 数 μ
2 190	2.5	2	50	2.5	0.1

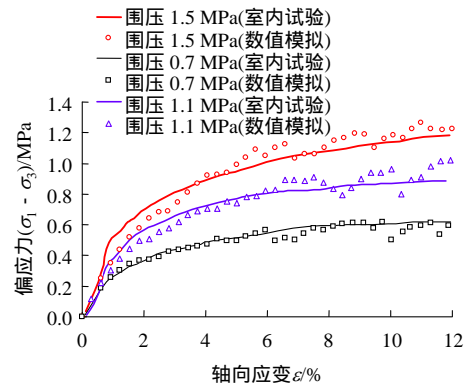


图 3 颗粒流数值模拟与室内试验的应力-应变曲线对比
Fig.3 Stress-strain curves comparison between laboratory test and PFC simulation

(2) 碎石参数的确定

土石混合体中碎石的力学性质好于土体，相对土体表现为刚性性质，因此，通过单轴压缩试验来确定碎石岩样微观参数，可以满足碎石的弹性性质。在碎石岩样的单轴试验中，采用接触刚度模型、平行黏结模型和滑动模型 3 种模型，需要确定的参数

有：法向接触刚度 k_n ，接触刚度比 k_n/k_s ，颗粒摩擦因数 μ 、平行黏结法向接触刚度 \bar{k}_n 、平行黏结刚度比 \bar{k}_n/\bar{k}_s 、平行黏结法向强度 $\bar{\sigma}_n$ 、平行黏结强度比 $\bar{\sigma}_n/\bar{\sigma}_s$ 。根据 D. O. Potyondy 和 P. A. Cundall^[32] 提出的岩石试样颗粒流细观参数确定方法，首先设定 k_n/k_s ， \bar{k}_n/\bar{k}_s 及 $\bar{\sigma}_n/\bar{\sigma}_s$ 均为 1， $k_n=\bar{k}_n$ ，改变不同法向接触刚度，得到不同碎石岩样的单轴抗压强度。通过一系列数值试验，发现接触刚度与抗压强度有很好线性关系(见图 4)，得到了不同抗压强度的碎石岩样细观参数(见表 5)。

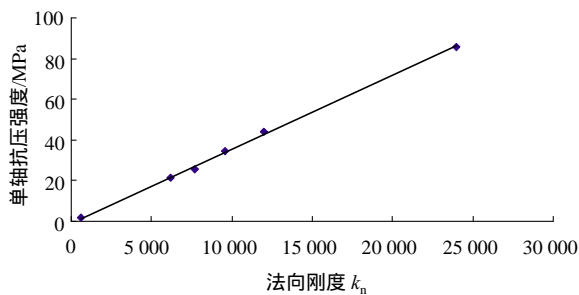


图 4 法向接触刚度 k_n 与碎石岩样单轴抗压强度关系曲线
Fig.4 Relationship between normal stiffnesses k_n and uniaxial compressive strength of rock

表 5 碎石岩样的颗粒细观参数
Table 5 Meso-parameters of PFC particles for rock

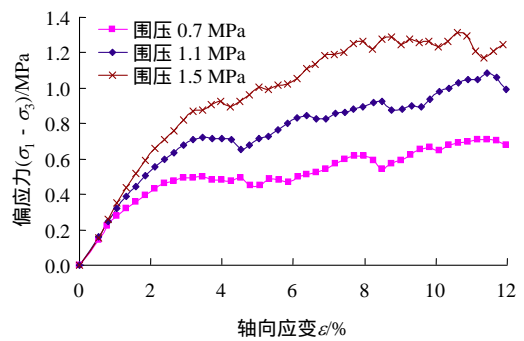
颗粒密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	单轴抗压强度/ MPa	法向接触刚度 k_n /MPa	平行黏结法向接触刚度 \bar{k}_n /MPa	平行黏结法向强度 $\bar{\sigma}_n$ /MPa	摩擦因数 μ
	10	300	300	7.5	
2 600	40	1 130	1 130	28.3	0.5
	60	1 690	1 690	42.2	
	100	2 800	2 800	70.0	

3 模拟结果与分析

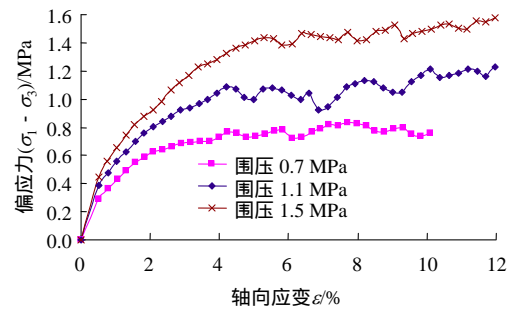
双轴试验过程中先让试样分别在 0.7, 1.1 和 1.5 MPa 围压作用下固结稳定，然后试样轴向的加载板以恒速施加偏应力，时步根据试算设定为 1×10^{-5} s/步。下面分别介绍不同含石量、不同碎石强度及不同碎石形状土石混合体的模拟结果。

3.1 不同含石量模拟结果

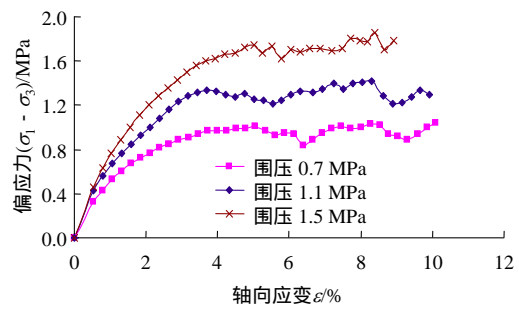
图 5 为不同含石量的土石混合体试样的典型应力-应变曲线。本文的含石量是面积含石量，即碎石面积与试样面积之比。从图可以看出，5%含石量的土石混合体应力-应变曲线与图 3 中土体的曲线相近，随着含石量增加，试样的强度不断提高，50%含石量试验破坏时的偏应力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 约为 5%



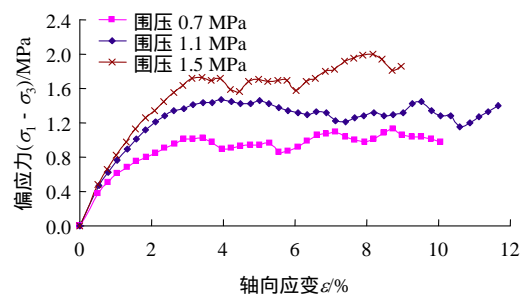
(a) 试样 R05-1~3



(b) 试样 R30-1~3



(c) 试样 R40-1~3



(d) 试样 R50-1~3

图 5 不同含石量试样的典型应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of SRA with different rock block contents

含石量试样的 1.5 倍。随着含石量的增加试样应力-应变曲线逐渐由应变强化型转为应变软化型。5%含石量时曲线为应变强化型，含石量增加到 30%时，应变达到 6%以后，偏应力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 基本不再增加。碎石含量大于 40%时，曲线已经具有应变软化特性。同一含石量试样破坏时的主应力比 (σ_1/σ_3) 随着围

岩而有所减小；不同含石量试样主应力比(σ_1/σ_3)，随着含石量的增加不断增大。在含石量较小(不超过 30%)时，试样内部的碎石被土颗粒包裹，即使应变很大时，碎石颗粒也并未直接接触，试样表现为土体性质，其应力-应变曲线与土体相似；而当含石量较大(超过 40%)时，随着应变增加，碎石颗粒开始接触、咬合，直到碎石颗粒开始调整甚至破碎，轴向应力也随之增加而后降低，土石混合体的力学特性开始由碎石主导。

表 6 为不同含石量土石混合体强度指标 c ， φ 值变化趋势。随着含石量增加土石混合体的黏聚力明显降低，且呈现很好线性关系，50%含石量黏聚力不到 5%含石量黏聚力的一半。内摩擦角随着含石量增加而增大，线性关系明显。含石量的增加提高了土石混合体内部材料的摩擦阻力和咬合力，从而使得内摩擦角增加，同时土颗粒的减少也减弱了混合体的黏性，降低了黏聚力。需要注意的是，当含石量超过 40%时，黏聚力的变化已经很小(见图 6)。不同含石量土石混合体模拟结果与吴爱祥等^[33-37]物理试验的结果一致，表明颗粒离散元进行土石混合体模拟是合适、可行的。

表 6 不同含石量土石混合体强度指标

Table 6 Strength parameters of SRA with different rock block contents

试样编号	含石量/%	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)
R05-1~3	5	38.4	16.1
R10-1~3	10	38.4	16.7
R30-1~3	30	25.2	18.8
R40-1~3	40	18.6	21.2
R50-1~3	50	17.9	22.5

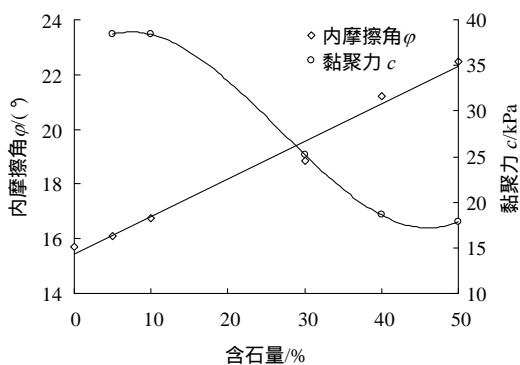
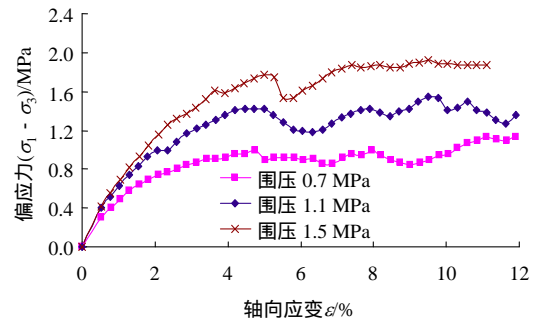


图 6 不同含石量土石混合体强度指标变化曲线

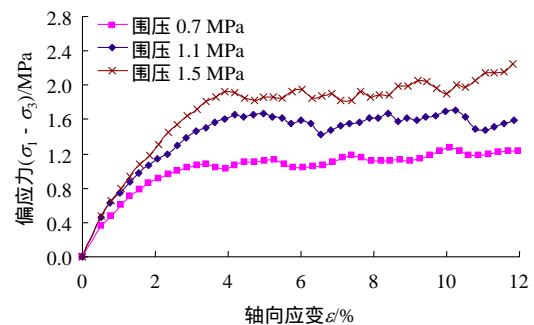
Fig.6 Strength parameters curves of SRA with different rock block contents

3.2 不同碎石强度模拟结果

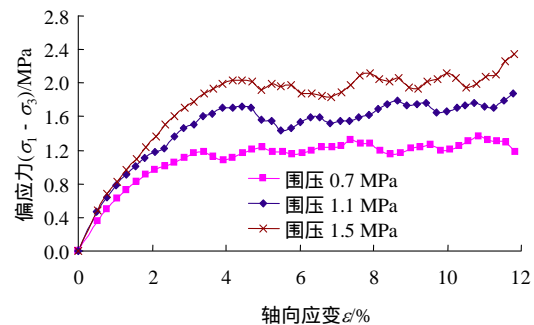
本组试验的碎石含量为 40%，土石混合体的力学特性由碎石主导，图 7 为不同碎石强度试样双轴试验的应力-应变曲线。从图可以看出随着碎石强度增加，土石混合体强度不断提高，围压较低时，碎石强度对混合体强度提高的贡献尤为明显。图 7(d)中 0.7 MPa 围压下试样强度比图 7(a)相同围岩土石混



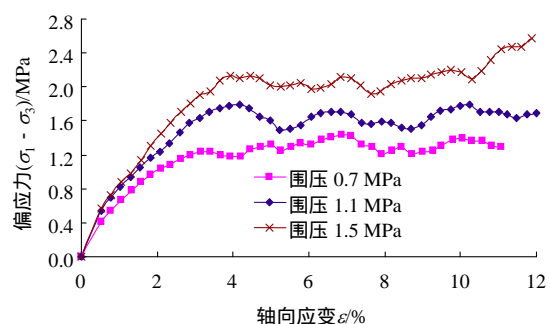
(a) 试样 U10-1~3



(b) 试样 U40-1~3



(c) 试样 U60-1~3



(d) 试样 U100-1~3

图 7 不同碎石强度试样的典型应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of SRA with different rock strengths

合体强度提高了 46%，而围压为 1.5 MPa 时，只提高了 15%。从曲线形态来看，相同围压的曲线相近，碎石强度对双轴试验中应力-应变曲线形态影响不明显。

为了研究碎石强度对土石混合物强度指标的影响，在此以碎石变形模量 E_R 与土体变形模量 E_{SO} 之比 $E_{R/S}$ 作为横坐标，以黏聚力和内摩擦角为纵坐标得到不同碎石强度土石混合物强度指标变化曲线。如图 8 所示，土石混合物黏聚力随着碎石强度的提高呈线性快速增长，而内摩擦角则略有减小。岩石试样也有类似性质，单轴强度越高，试样的黏聚力越大^[38]。

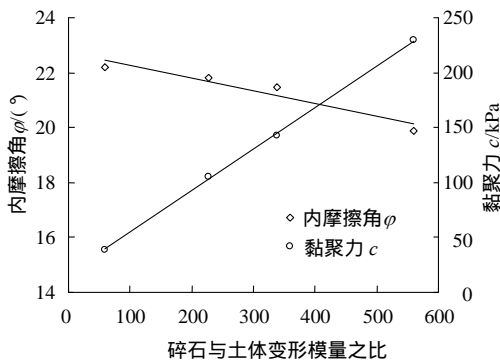


图 8 不同碎石强度土石混合物强度指标变化曲线

Fig.8 Strength parameters curves of SRA with different rock strengths

表 7 不同碎石强度土石混合物强度指标

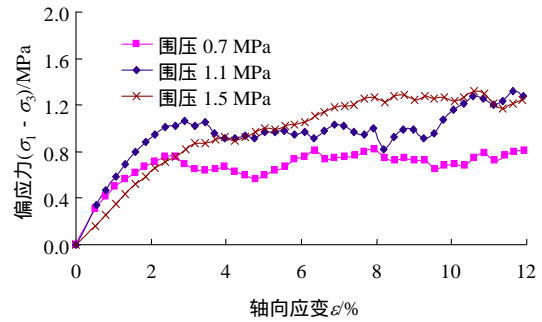
Table 7 Strength parameters of SRA with different rock strengths

试样编号	碎石单轴抗压强度/MPa	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ (°)
U10-1-3	10	39.1	22.2
U40-1-3	40	105.4	21.8
U60-1-3	60	142.3	21.5
U100-1-3	100	229.6	19.9

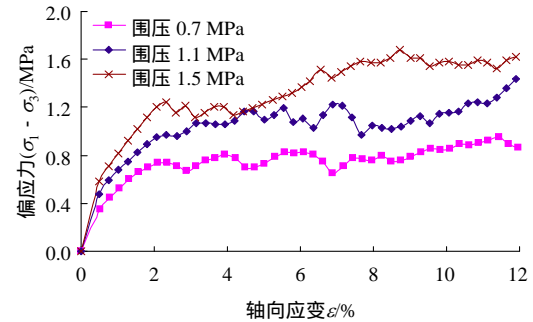
3.3 不同碎石形状模拟结果

从图 9 可以看出，土石混合物强度与碎石形状密切相关。随着磨圆度的减小，试样强度不断增强。图 9 中不同围压下三角形碎石土石混合物强度约为圆形的 1.4 倍。为了更好的量化碎石形状，提出形状因子 m 作为磨圆度指标，形状因子 m 定义为碎石面积 A_c 与其外接圆面积 A_R 之比，即

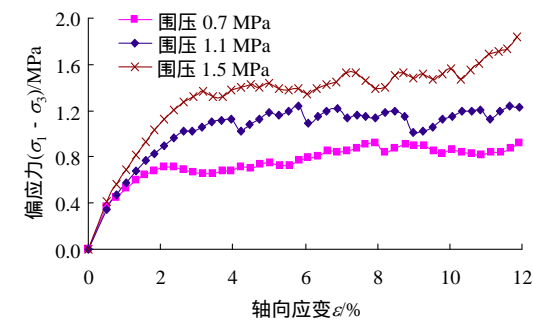
$$m = \frac{A_c}{A_R} \quad (4)$$



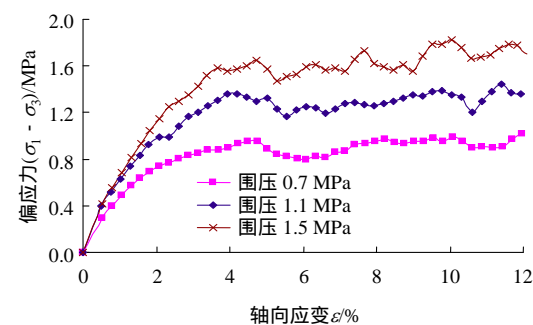
(a) 试样 C-1-3



(b) 试样 P-1-3



(c) 试样 Q-1-3



(d) 试样 T-1-3

图 9 不同碎石形状试样的典型应力-应变曲线

Fig.9 Stress-strain curves of SRA with different rock block shapes

m 在 0~1 范围内变化，形状因子越小则碎石棱角越明显，形状因子越大碎石磨圆度越好，形状因子为 1 时，碎石为圆形。图 10 为不同碎石形状的土石混合物强度指标变化曲线。可以看出，随着形状

表 8 不同碎石形状土石混合体强度指标

Table 8 Strength parameters of SRA with different rock shapes

试样编号	形状因子 m	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
C-1~3	1.000	66.8	15.4
P-1~3	0.900	71.1	18.2
Q-1~3	0.765	86.2	18.8
T-1~3	0.487	92.8	19.5

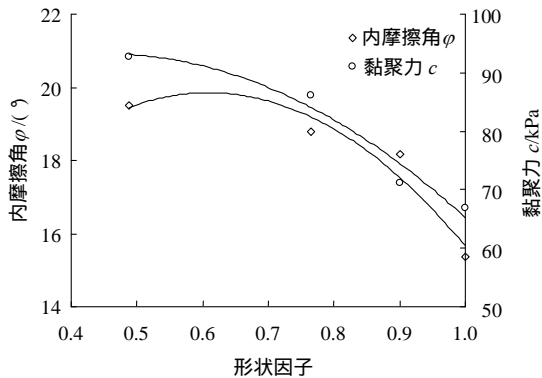


图 10 不同碎石形状土石混合体强度指标变化曲线

Fig.10 Strength parameters curves of SRA with different rock shapes

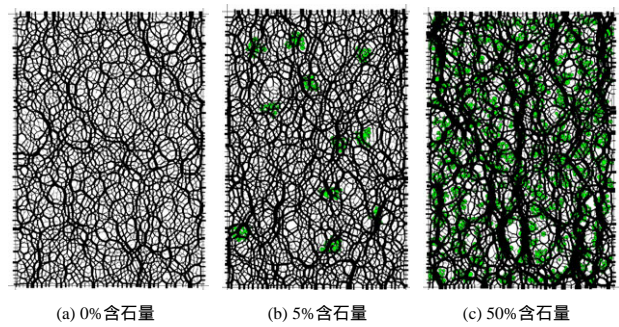
因子增大，碎石越圆滑，试样颗粒间的咬合作用减弱，土石混合的黏聚力和内摩擦角都在减小。磨圆度越好土石混合体的强度指标越低。

3.4 结果分析

土石混合体力学特性由土体和碎石共同决定。碎石含量较小时，混合体力学特性由土体主导，随着碎石含量增大，碎石特性成为影响混合体力学特性的主要因素。

从细观来看，碎石含量较小时，其被土体包裹，剪切过程中碎石并未接触，只是分担部分荷载，随着含量的增大，剪切过程中碎石开始接触，形成骨架效应，承担大部分荷载。图 11 为不同碎石含量力链分布，力链的粗细表示了颗粒接触力的大小，图中绿色块体为碎石。可以看出，碎石的含量改变了力链大小的分布，不含碎石土体的力链分布较为均匀；5%碎石含量试样中，碎石所处位置接触力较大，碎石承担的荷载较周围土体大，试样峰值强度也随之提高；50%碎石含量时，主力链汇聚在碎石上，碎石承担了主要荷载。

土石混合体在剪切过程中，随着轴应变的增加，试样体积收缩，碎石接触、咬合。随着接触力进一步增大，碎石克服互锁甚至破碎，开始滑动、转动，碎石的强度和形状直接影响此阶段的力学特性。碎石强度越大，棱角越明显，克服互锁所需荷

图 11 不同碎石含量力链分布($\varepsilon = 10\%$)Fig.11 Force chains of SRA with different rock block contents($\varepsilon = 10\%$)

载越大，土石混合体的强度越高。董云^[10]、刘忠强等^[39]的试验研究也有类似结论。

不同碎石强度土石混合体数值试验中，黏聚力随着碎石强度的提高呈线性快速增长，这可能与颗粒流模拟中碎石和土的接触特性相关。在模拟中随着碎石颗粒参数随着强度提高，碎石和土的接触参数也在增大，从而提高混合体的整体力学特性，造成黏聚力的增长。实际情况下，碎石强度的增大，一般不会引起碎石与土接触强度的持续增大。关于碎石强度对土石混合体黏聚力的影响，本文仅采用数值方法进行了初步探索，仍需要开展相关的试验进一步验证和研究。

真实碎石形状各异，文中将碎石形状概化为四种，尽管相对简单但涵盖了碎石的基本形状。理论上文中所述的碎石生成算法可以生成任意多边形碎石，模拟更为复杂的碎石颗粒。要完全了解土石混合体的结构信息还需要借助物理试验手段，如 CT 扫描技术等，重构其结构模型。本文只对平面问题进行了分析，土石混合体的三维问题还需要进一步研究。

4 结 论

本文介绍了建立土石混合体颗粒离散元模型的基本方法和步骤，基于 FISH 语言开发了多边形碎石生成模块，对土石混合体中土体和碎石的细观参数进行了标定，开展了土石混合体的双轴数值模拟试验得到了如下结论：

(1) 根据室内试验结果，利用双轴试验研究了颗粒细观参数与材料宏观参数的关系，确定了土体和碎石颗粒流细观参数。该参数得到的应力-应变曲线与实际土体曲线具有很好一致性，证明土体模型中颗粒参数的正确性。

(2) 碎石含量越高土石混合体强度越高。土石混合体的内摩擦角随着含石量增加而增大。当含石量不超过 30% 时, 土石混合体力学特性主要由土体控制, 当含石量超过 40% 时土石混合体应力-应变曲线开始表现出岩样特征。

(3) 土石混合体力学特性取决于碎石含量, 也与碎石强度和形状密切相关。在 40% 含石量土石混合体中, 土石混合体抗剪强度随碎石强度提高而提高。碎石磨圆度越好, 土石混合体的强度越低, 黏聚力和内摩擦角越小。

(4) 土石混合体中应力分布不均, 碎石承担的荷载较周围土体大, 在碎石含量较高时, 碎石形成骨架效应, 承担了主要荷载。

基于颗粒离散元数值模拟开展数值试验, 可以对土石混合体的力学特性做出预测, 突破土石混合体物理试验的限制, 是物理试验的有效补充。本文得到的结论, 由于数据有限, 仍需要开展相应的物理试验进一步深入研究。

参考文献(References):

- [1] 徐文杰, 胡瑞林. 土石混合体概念、分类及意义[J]. 水文地质工程地质, 2009, (4): 50-56.(XU Wenjie, HU Ruilin. Conception, classification and significations of soil-rock mixture[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, (4): 50-56.(in Chinese))
- [2] 徐文杰. 大型土石混合体滑坡空间效应与稳定性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增2): 328-333.(XU Wenjie. Study of spatial effect and stability of large scale soil-rock mixture landslide[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Supp.2): 328-333.(in Chinese))
- [3] 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 Qiulin, 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))
- [4] 杨 洁. 华南沿海花岗岩风化壳岩土工程特征变化研究[硕士学位论文][D]. 西安: 西安科技大学, 2004.(YANG Jie. Variation of geotechnical properties of weathered granite in Southeast China[M. S. Thesis][D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2004.(in Chinese))
- [5] 涂新斌, 王思敬, 岳中琦. 风化岩石的破碎分形及其工程地质意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 587-595.(TU Xinbin, WANG Sijing, YUE Zhongqi. Fractal fragmentation of weathered rock and its application in engineering geology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4): 587-595.(in Chinese))
- [6] 尚彦军, 史永跃, 金维俊, 等. 花岗岩风化壳分带与岩体基本质量分级关系探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1 858-1 864.(SHANG Yanjun, SHI Yongyue, JIN Weijun, et al. Discussion on relationship between weathering crust zonation and basic quality classification of rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1 858-1 864.(in Chinese))
- [7] 高政国, 杜雨龙, 黄晓波, 等. 碎石填筑场地强夯加固机制及施工工艺[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 377-384.(GAO Zhengguo, DU Yulong, HUANG Xiaobo, et al. Reinforcement mechanism and construction technology of broken stone fills by dynamic consolidation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 377-384.(in Chinese))
- [8] 刘建锋, 徐 进, 高春玉, 等. 土石混合料干密度和粒度的强度效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 3 304-3 310.(LIU Jianfeng, XU Jin, GAO Chunyu, et al. Study on strength effects of dry density and granularity on earth and rock mixtures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.1): 3 304-3 310.(in Chinese))
- [9] 全晓娟, 李 宁, 李国玉. 青藏铁路碎石路基最佳粒径的数值试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1 947-1 953.(QUAN Xiaojuan, LI Ning, LI Guoyu. Numerical study on optimum grain-diameter for the crushed rock embankment of Qinghai-Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(11): 1 947-1 953.(in Chinese))
- [10] 董 云. 土石混合料力学特性的试验研究[硕士学位论文][D]. 重庆: 重庆交通大学, 2005.(DONG Yun. Test research on the mechanics characteristics of rock-soil aggregate mixture[M. S. Thesis][D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2005.(in Chinese))
- [11] 舒志乐. 土石混合体微结构分析及物理力学特性研究[硕士学位论文][D]. 成都: 西华大学, 2007.(SHU Zhile. Study on microstructure and mechanical characteristics of the earth-rock aggregate[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Xihua University, 2007.(in Chinese))
- [12] 武 明. 土石混合非均质填料力学特性试验研究[J]. 公路, 1997, (1): 40-42.(WU Ming. Test research on the mechanics characteristics of heterogeneous rock-soil aggregate packing[J]. Highway, 1997, (1): 40-42.(in Chinese))
- [13] 曹光棚, 徐 明, 宋二祥. 土石混合料的力学特性[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2010, 38(11): 32-39.(CAO Guangxu, XU Ming, SONG Erxiang. Mechanical properties of broken rock-soil mixture[J]. Journal of South China University of Technology: Nature Science, 2010, 38(11): 32-39.(in Chinese))
- [14] 王 新, 丁秀丽. 含石量对土石混合体力学特性影响的数值试验[J]. 水运工程, 2010, (10): 93-99.(WANG Xing, DING Xiuli. Numerical tests on impact of stone content to mechanical parameters of soil-rock mixture[J]. Port and Waterway Engineering, 2010, (10): 93-99.(in Chinese))
- [15] 王江营, 曹文贵, 张 超, 等. 基于正交设计的复杂环境下土石混合体大型直剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1 849-1 856.(WANG Jiangying, CAO Wengui, ZHANG Chao, et al. Large-scale direct shear tests on soil-rock aggregate mixture under complicated environment based on orthogonal design[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1 849-1 856.(in Chinese))
- [16] 张维全, 魏 星, 周 适, 等. 级配碎石室内大型剪切试验性能研究[J]. 中外公路, 2009, 29(2): 218-220.(ZHANG Wei-quan, WEI Xing, ZHOU Shi, et al. Laboratory test research on the mechanics characteristics of graded broken stone[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2009, 29(2): 218-220.(in Chinese))
- [17] 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): 2 377-2 384.(LI Xiao, LIAO Qiulin, HE Jianming, 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): 2 377-2 384.(in Chinese))

- [18] 徐文杰, 胡瑞林, 谭儒蛟, 等. 虎跳峡龙蟠右岸土石混合野外试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1 270–1 277.(XU Wenjie, HU Ruilin, TAN Rujiao, et al. Study on field test of rock-soil aggregate on right bank of longpan in tiger-leaping gorge area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1 270–1 277.(in Chinese))
- [19] 油新华, 汤劲松. 土石混合野外水平推剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1 537–1 540.(YOU Xinhua, TANG Jinsong. Research on horizontal push-shear in-situ test of soil and rock-mixture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1 537–1 540.(in Chinese))
- [20] 李维树, 邬爱清, 丁秀丽. 三峡库区滑带土抗剪强度参数的影响因素研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 56–60.(LI Weishu, WU Aiqing, DING Xiuli. Study on influencing factors of shear strength parameters of slide zone clay in Three Gorges Reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(1): 56–60.(in Chinese))
- [21] 谭儒蛟, 胡瑞林, 刘衡秋, 等. 虎跳峡工程区松散堆积体原位直剪试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(6): 53–55.(TAN Rujiao, HURuilin, LIU Hengqiu, et al. In situ direct shear tests of incompact-deposit bodies in Tiger-leaping gorge area[J]. Coal Geology and Exploration, 2005, 33(6): 53–55.(in Chinese))
- [22] 孔祥臣, 陈谦应, 贾学明. 土石混合料振动击实试验的 PFC^{2D} 模拟研究[J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24(1): 61–67.(KONG Xiangchen, CHEN Qianying, JIA Xueming. PFC^{2D} simulation research on vibrating compaction test of soil-aggregate mixture[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(1): 61–67.(in Chinese))
- [23] 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): 2 695–2 703.(JIA Xueming, CHAI Hejun, ZHENG Yingren. 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): 2 695–2 703.(in Chinese))
- [24] 董启朋, 卢正, 詹永祥, 等. 土石混合体原位试验的颗粒流数值模拟分析[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(9): 1 382–1 389.(DONG Qingpeng, LU Zheng, ZHAN Yongxiang, et al. Particle flow modeling of soil-rock mixtures in-situ tests[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47(9): 1 382–1 389.(in Chinese))
- [25] 周剑, 张路青, 戴福初, 等. 基于黏结颗粒模型某滑坡土石混合体直剪试验数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增 1): 2 650–2 659.(ZHOU Jian, ZHANG Luqing. DAI Fuchu, et al. Numerical simulation of direct shear tests for rock and soil mixture in a landslide based on bonded-particle model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Supp.1): 2 650–2 659.(in Chinese))
- [26] 邵磊, 迟世春, 张勇, 等. 基于颗粒流的堆石料三轴剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 711–720.(SHAO Lei, CHI Shichun, ZHANG Yong, et al. Study of triaxial shear tests for rockfill based on particle flow code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 711–720.(in Chinese))
- [27] 刘海涛, 程晓辉. 粗粒土尺寸效应的离散元分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(增 1): 287–292.(LIU Haitao, CHENG Xiaohui. Discrete element analysis for size effects of coarse-grained soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Supp.1): 287–292.(in Chinese))
- [28] 成国文, 赫建明, 李 晓, 等. 土石混合体双轴压缩颗粒流模拟[J]. 矿冶工程, 2010, 30(4): 1–4.(CHENG Guowen, HE Jianming, LI Xiao, et al. Particle flow simulation for soil-rock mixtures under biaxial pressure[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2010, 30(4): 1–4.(in Chinese))
- [29] 陈建峰, 李辉利, 周 健. 黏性土宏观参数相关性研究[J]. 力学季刊, 2010, 31(2): 304–309.(CHENG Jianfeng, LI Huili, ZHOU Jian. Study on the relevance of macro-micro parameters for clays[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2010, 31(2): 304–309.(in Chinese))
- [30] 曾 远, 周 健. 砂土的细观参数对宏观特性的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(3): 499–503.(ZENG Yuan, ZHOU Jian. Influence of micro parameters of sandy soil on its macro properties[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(3): 499–503.(in Chinese))
- [31] 罗 勇, 龚晓南, 连 峰. 三维离散颗粒单元模拟无黏性土的工程力学性质[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 292–297.(LUO Yong, GONG Xiaonan, LIAN Feng. Simulation of mechanical behaviors of granular materials by three-dimensional discrete element method based on particle flow code[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2): 292–297.(in Chinese))
- [32] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1 329–1 364.
- [33] 吴爱祥, 孙 伟, 王洪江, 等. 塌陷区全尾砂-废石混合处置体抗剪强度特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 917–925.(WU Aixiang, SUN Wei, WANG Hongjiang, et al. Experimental research on shear behavior of subsidence backfill body mixed by unclassified tailings and waste rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 917–925.(in Chinese))
- [34] 李 黎, 颜 琳, 黄 晶. 砾石量对砾质黏土抗剪强度参数影响规律的试验研究[J]. 四川建筑, 2013, 33(2): 74–75.(LI Li, YAN Lin, HUANG Jing. Test research on gravel content influence on shear strength of Gravelly clay[J]. Sichuan Architecture, 2013, 32(5): 917–925.(in Chinese))
- [35] XUA 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 and Mining Sciences, 2011, 48(8): 1 235–1 247.
- [36] 徐文杰, 胡瑞林, 岳中琦, 等. 基于数字图像分析及大型直剪试验的土石混合体块石含量与抗剪强度关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 996–1 007.(XU Wenjie, HU Ruilin, YUE Zhongqi, et al. Research on relationship between rock block proportion and shear strength of soil-rock mixtures based on digital image analysis and large direct shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 996–1 007.(in Chinese))
- [37] 董 云. 土石混合料强度特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1 269–1 274.(DONG Yun. Experimental study on intensity character of rock-soil aggregate mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1 269–1 274.(in Chinese))
- [38] 工程地质手册编委会. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 52–723.(The Compilation Group of Handbook of Engineering Geology. Handbook of engineering geology[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007: 52–723.(in Chinese))
- [39] 刘忠强, 薛亚东, 黄宏伟, 等. 崩积体剪切性能试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2 349–2 358.(LIU Zhongqiang, XUE Yadong, HUANG Hongwei, et al. Experimental research on shear behavior of colluvium[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2 349–2 358.(in Chinese))