

文章编号: 1000-4750(2017)06-0146-11

块石含量和空间分布对土石混合体 抗剪强度影响的离散元分析

严 颖¹, 赵金凤², 季顺迎²

(1. 大连交通大学土木与安全工程学院, 大连 116028; 2. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116023)

摘 要: 土石混合体的抗剪强度在很大程度上取决于其块石的含量、空间分布、形态等参数。该文采用球体单元模拟土颗粒, 通过组合颗粒单元构造非规则形态的块石, 对不同含石量和块石空间分布下土石混合体的直剪过程进行了离散元数值模拟。计算结果表明, 在低含石量下, 土石混合体的抗剪强度随含石量的增加而增加; 在中含石量下, 受块石空间分布的影响, 其抗剪强度呈现很强的波动性; 在高含石量下, 其抗剪强度显著增强, 波动性相对较小。抗剪强度在中高含石量下波动现象的微观机理是块石空间分布影响下的力链结构特性。当块石的空间分布使其形成较强力链结构时, 抗剪强度较高; 反之, 块石间的力链结构不稳定, 抗剪强度相对较低。以上研究有助于从微观尺度揭示土石混合体变形和剪切强度特性的内在机理。

关键词: 土石混合体; 直剪试验; 离散元方法; 含石量; 块石分布

中图分类号: TU43 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.01.0002

DISCRETE ELEMENT ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ROCK CONTENT AND ROCK SPATIAL DISTRIBUTION ON SHEAR STRENGTH OF ROCK-SOIL MIXTURES

YAN Ying¹, ZHAO Jin-feng², JI Shun-ying²

(1. School of Civil and Safety Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;

2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: The shear strength of rock-soil mixture materials is affected by the content, spatial distribution and shape of rocks. In this study, soil particles are simulated by spheres, and irregularly-shaped rock particles are constructed by overlapped spherical particles. Direct shear tests are simulated with the discrete element method under various rock contents and spatial distributions of rocks. The shear strength of rock-soil mixture material increases with the rock contents under low rock contents, presents obvious fluctuation under medium rock contents, and increases significantly with less fluctuation under high rock contents. The fluctuation of shear strength under medium and high rock contents is attributed to the force chain distributions affected by the spatial distribution of rock particles. The rock-soil mixture has high shear strength if stable force chains are generated. On the contrary, it has low shear strength if weak force chains are produced in the mixture. This work can be helpful in revealing inherent mechanism on micro-scale of the deformation and shear strength characteristics of soil-rock mixtures.

Key words: rock-soil mixture; direct shear tests; discrete element method; rock content; spatial distribution of rock

收稿日期: 2016-01-02; 修改日期: 2016-12-12

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2010CB731502); 国家自然科学基金项目(U1234209, 11572067, 11672072)

通讯作者: 季顺迎(1972—), 男, 河北人, 教授, 博士, 博导, 从事颗粒材料计算力学及其应用研究(E-mail: jisyy@dlut.edu.cn).

作者简介: 严 颖(1973—), 女, 辽宁人, 副教授, 博士, 从事离散元方法及应用研究(E-mail: yyan@djtu.edu.cn);

赵金凤(1989—), 女, 辽宁人, 硕士生, 从事岩土力学的离散元计算研究(E-mail: zhaojinfeng@mail.dlut.edu.cn).

土石混合体是由砾石、块石与砂土、粘土等介质组成的混合物,在道路与铁道、路基、边坡治理等岩土工程中广泛存在。土石混合体中的“块石”和“土体”在物理力学性质上具有明显差异,导致了土石混合体的宏观不均匀性和非线性特征。土石混合体的存在给人类工程活动的安全性等带来极大影响,越来越受到工程界的广泛重视^[1-2]。为研究土石混合体的力学性质,研究者开展了大量的压缩试验和直剪试验分析。土石混合体的孔隙率是确定其压密特性和抗剪强度的重要指标。受含石量影响,土石混合体的孔隙率随含石量的增加先减小后增大,并在含石量为70%时,达到最小值。即,含石量70%为最佳配比量^[3-5]。当孔隙率较低时,土石混合体的密实度较高,且具有较高的弹性模量以及较好的力学性质^[6-7]。

抗剪强度是土石混合体的重要工程特性指标之一,通常采用内摩擦角和内聚力进行确定。影响土石混合体抗剪强度的主要因素包括含石量、块石的空间分布、块石的破碎率以及含水量等^[8-15]。

含石量直接影响土石混合体的密实度,密实度又与抗剪强度有很大关联。土石混合体的抗剪强度随密实度的增加而增加,并在最密实状态时达到最大值^[4,16]。试验表明含石量存在一个阈值,一般为70%~75%。当含石量小于该阈值时,含石量的增加会使抗剪强度增加,而当含石量大于该阈值时,土石混合体的稳定性降低,抗剪强度降低^[17-19]。但也有相关研究表明,抗剪强度、内摩擦角均随含石量的增加而增加,并不存在下降趋势^[20-23]。此外,随着含石量的增加,块石的破碎率增大^[21-22,24-25]。含石量控制着土石混合体的内部变形,对块石破碎以及抗剪强度等影响很大。一般地,将土石混合体划分为三大类,即悬浮结构、密实结构和骨架结构,进而研究不同含石量下土石混合体的工程特性^[6]。

块石尺寸及空间分布也是影响土石混合体抗剪强度的重要参数。理论和试验表明粗粒土尺寸越大,其内摩擦角和剪胀现象增加,但是表观黏聚力减小。粗粒土受剪切破坏面并非平面,在剪切面附近,由于粗粒土颗粒间的相互接触碰撞及转动产生咬合力,使得粗粒土的抗剪强度大幅提高^[8,17]。

在进行试验研究的同时,人们也开展了一系列的数值分析。考虑块石的影响,运用有限元方法开展了土石混合体边坡的稳定性研究^[26-27]。然而,基于连续介质力学的有限元方法不能分析块石的形

态、粒径、破碎等细观尺度因素的影响。针对土石混合体材料的非连续分布特征,离散单元法能够精确地模拟块石、土体颗粒的粒径、形状、级配、孔隙率等细观特征,计算结果更加接近工程实际,并有利于从细观尺度上研究该类复杂介质的宏观力学行为及变形破坏机理^[20,28-29]。

在土石混合体的离散单元数值模拟中,一般采用球体单元模拟土体^[7,30-31]。对于非规则块石,合理的几何结构有助于提高计算精度。根据研究问题的不同,构造的形态各不相同,主要包括二维椭圆、多边形单元、三维圆盘单元、球体单元以及三维块体单元^[20,30,32]。基于球体单元的组合颗粒或者粘结颗粒模式也可很好地模拟块石形态,并且已成功应用于块石的离散元模拟中^[33-35]。近年来,采用离散元方法对土石混合体的剪切强度进行了一系列研究,并分析了块石强度和块石含量等因素的影响^[29-30,36-37]。

本文采用球体单元模拟土体,通过球体的镶嵌组合模式构造非规则形态的块石颗粒,采用离散元法对土石混合体的直剪试验过程进行数值分析,确定了含石量和块石空间分布对土石混合体抗剪强度的影响。

1 土石混合体直剪试验的离散单元模型

1.1 非规则块石单元的构造

针对块石的非规则形态,本文首先构造真实块石尺寸的凸多面体结构,然后在包含该凸多面体的立方域内填充颗粒,颗粒排列为密排六方结构。接着让颗粒在重力作用下下落,使凸多面体内部颗粒达到稳定。最后,使颗粒膨胀以填充凸多面体棱角的空隙部分,形成镶嵌组合方式的块石形态。

采用这种方式可构造多种不同形态的块石单元。这里选取6种不同形态的块石单元如图1所示。块石单元由若干个球形颗粒按不同重叠量和几何方位镶嵌而成,其体积、质心和转动惯量可采用有限分割法进行确定。

本文采用 Hertz-Mindlin 非线性接触模型计算颗粒单元间的作用力。在法线方向上,颗粒之间的作用力包括 Hertz 弹性力和非线性粘滞力。在颗粒接触的切线方向,采用 Mindlin 理论和 Mohr-Coulomb 摩擦定律进行计算。对于非线性接触模型,时间步长由颗粒密度、泊松比和剪切模量确定^[38]。

对各块石颗粒分别建立整体坐标和局部坐标，在局部坐标下计算各球体单元的作用力，以及块石单元的受力和角速度，在整体坐标下计算块石颗粒的速度和位移；采用四元数方法对两个坐标系间的参量进行转换计算^[38]。对于非规则块石颗粒，其在局部坐标下的惯性矩、极惯性矩通过将其细分为若干个六面体单元进行计算。当六面体边长小于该组合颗粒中最大球体直径的 1/20 时，则具有很高的计算精度^[34]。

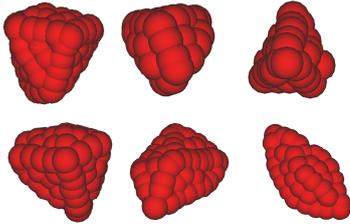


图 1 土石混合物中非规则块石的离散单元模型
Fig.1 DEM model of irregularly shaped rocks

1.2 块石、土体颗粒间的接触模型

土石混合物中的非规则块石由粗粒径球形颗粒以不同的镶嵌组合方式构成，土体由小粒径球形单元模拟，因此在土石混合体的离散元模拟中主要计算不同粒径间球形颗粒的作用力。本文采用非线性接触模型计算各颗粒间的接触作用，如图 2 所示。其中， M_A 和 M_B 为颗粒 A 和 B 的质量， K_n 和 K_s 分别是法向和切向刚度系数， C_n 和 C_s 是法向和切向阻尼系数， μ 是摩擦系数。

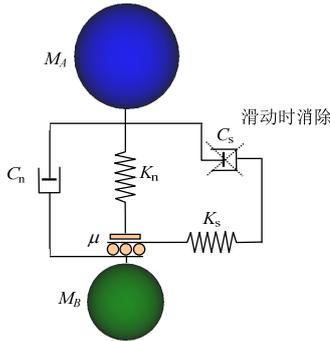


图 2 颗粒单元间的接触力模型

Fig.2 Contact force model between two particles

单元间法向力包括 Hertz 弹性力和非线性粘滞力。弹性力模拟颗粒间相互接触时的排斥力，而非线性粘滞力模拟颗粒接触过程中因相对速度导致的能量耗散，即^[38]：

$$F_n = K_n x_n^{3/2} + \frac{3}{2} AK_n x_n^{1/2} \dot{x}_n \quad (1)$$

式中： x_n 和 \dot{x}_n 分别为颗粒的法向重叠量和相应速率； A 为颗粒的材料特性，并依赖于变形模量、粘

性系数和泊松比等力学参数，可通过一定速度下颗粒碰撞的回弹系数确定^[34]。

在颗粒接触的切线方向，基于 Mindlin 理论和 Mohr-Coulomb 摩擦定律，并忽略切向粘滞力影响，切向接触力写作：

$$F_s = \min(F_s^*, \text{sign}(F_s^*)\mu_p F_n) \quad (2)$$

这里

$$F_s^* = K_s x_n^{1/2} x_s \quad (3)$$

式中： K_s 为切向刚度系数； x_s 为颗粒的切向变形量； μ_p 为颗粒表面摩擦系数。本文采用的法向刚度 F_n 和切向刚度 K_s 分别取为：

$$K_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \quad (4)$$

$$K_s = 8G^* \sqrt{R^*} \quad (5)$$

式中： $E^* = \frac{E}{2(1-\nu^2)}$ ； $G^* = \frac{G}{2(1-\nu)}$ ，其中 $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ ， E 、 G 和 ν 分别是颗粒材料的弹性模量、剪切模量和泊松比； $R^* = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B}$ ， R_A 和 R_B

分别为两个互相接触颗粒的半径。若颗粒与刚性边界接触，则认为刚性边界为半径无穷大的球体。

1.3 具有粘结效应的土体单元构造

采用球体单元构造土体。由于土体间存在粘结作用，本文用平行粘结模型，其在接触颗粒间不仅可以传递作用力，同时还可以传递力矩^[33]。通过设置土体颗粒之间以及土体与块石颗粒之间的粘结强度来模拟土石混合物内部的粘结效应。两个粘接颗粒间的作用力和力矩可分解为法向和切向分量，即 F_n 和 F_s ， M_n 和 M_s 。粘接颗粒间的最大拉应力和剪应力依据梁的拉伸、扭转和弯曲理论有：

$$\sigma_{\max} = \frac{|F_b^n|}{A} + \frac{|M_b^s|}{I} R \quad (6)$$

$$\tau_{\max} = \frac{|F_b^s|}{A} + \frac{|M_b^n|}{J} R \quad (7)$$

式中： σ_{\max} 和 τ_{\max} 分别表示最大法向应力和切向应力； R 为颗粒粘结等效半径，这里取 $R = 2R_A R_B / (R_A + R_B)$ 。粘接面积、惯性矩和极惯性矩分别为 $A = \pi R^2$ 、 $I = \pi R^4 / 4$ 和 $J = \pi R^4 / 2$ 。当粘接颗粒间的法向或切向最大应力超过对应的法向或切向强度时，颗粒间的粘接作用失效。

1.4 直剪试验的离散元模型

本文选取剪切盒尺寸为 $L = 35 \text{ cm}$ 、 $B = 35 \text{ cm}$

和 $H = 30 \text{ cm}$ ，其中上剪切盒高度为 16.7 cm ，下剪切盒为 13.3 cm 。考虑到土石混合物中土体和块石有效粒径的随机性，本文构造的块石颗粒尺寸在 $37 \text{ mm} \sim 54 \text{ mm}$ ，而土体颗粒粒径的确定通过质量正态概率分布生成土体颗粒的质量，并由此确定的粒径一般为 $12 \text{ mm} \sim 14 \text{ mm}$ 。

在离散元数值模拟中，将土石混合物颗粒随机放置于剪切盒内。颗粒初始大小设为实际值的 0.4 倍，然后缓慢生长到所需粒径，以获得土石混合物密实且随机的初始排列状态。在颗粒生长过程中，颗粒之间因相互碰撞而达到新的平衡位置。初始试样生成后，在上剪切盒顶部施加法向荷载，并在水平方向移动下剪切盒以实现剪切形变。最大剪切位移设定为直剪盒长度的 15% ，施加于顶盖的法向应力为 1.2 MPa 。这里施法的法向应力要略高于一般实际工程中的值，以使颗粒间的接触作用更加显著，更好地体现含石量的影响。此外，本文计算不考虑土体和块石颗粒的破碎现象，因此在较高法向应力下土石混合体的剪切强度主要与颗粒间的摩擦和互锁特性相关。这里采用的主要计算参数列于表 1 中。图 3 所示为含石量 γ 分别为 0% 、 20% 、 40% 、 60% 、 80% 和 100% 时，土石混合物试样的初始排列，其中颗粒颜色表征不同块体。

表 1 土石混合物直剪离散单元模拟中的主要计算参数

Table 1 Main computational parameters in DEM simulations of direct shear of soil-rock mixtures

参数	数值	参数	数值
土体密度/(kg/m^3)	1800.0	剪切速率/(m/min)	1.6×10^{-2}
块石密度/(kg/m^3)	2650.0	法向粘结强度/ MPa	0.5
土体弹性模量/ GPa	0.58	切向粘结强度/ MPa	0.25
块石弹性模量/ GPa	58.0	含石量/(%)	$0.0 \sim 100$
颗粒间摩擦系数	0.7	上剪切盒质量/ kg	1.232
颗粒与侧壁摩擦系数	0.2	—	—

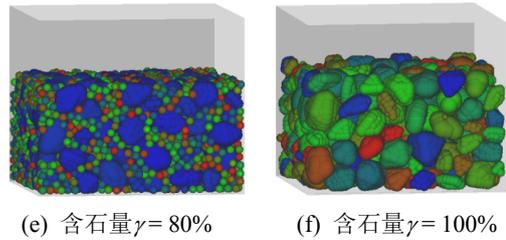
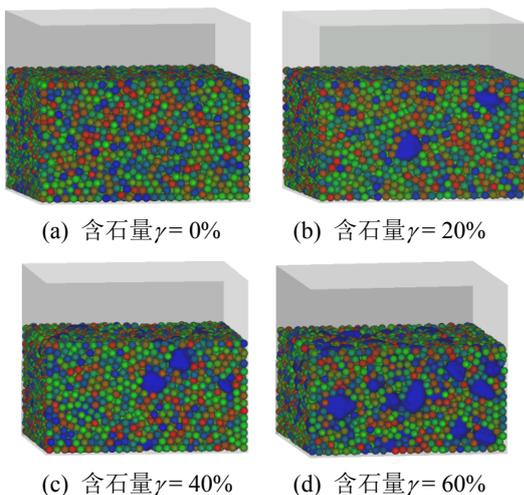


图 3 不同含石量下的土石混合物直剪试样
Fig.3 Direct shear samples of rock-soil mixtures under different rock contents

2 含石量对土石混合物剪切强度的影响

2.1 含石量影响的宏观分析

土石混合体的内部块石控制着其相应的变形破坏发展，从而影响其宏观力学性能。这里，取含石量为 70% 时土石混合体的直剪过程，如图 4 所示。图中所示的 4 个时刻分别为初始时刻、剪应力最大时刻、中间时刻以及完成时刻。在直剪过程中，块石颗粒间相互挤压，在剪切带附近的块石运动明显，发生滚动甚至是翻转。

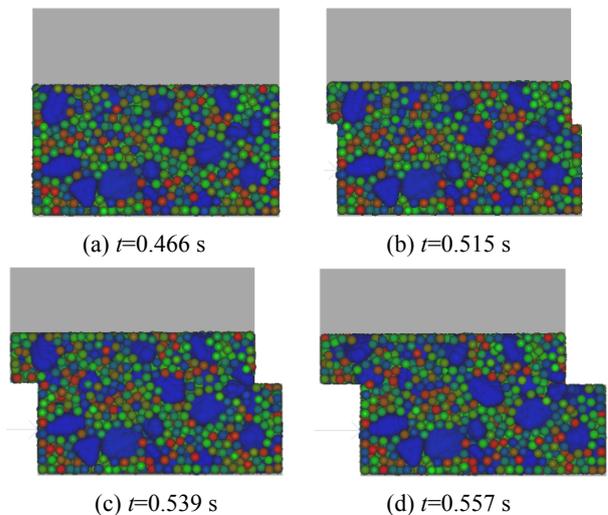


图 4 含石量为 70% 时土石混合体的直剪过程
Fig.4 Direct shear process of soil-rock mixture with 70% rock content

剪应力是剪切带处的剪力与横截面面积的比值，剪力可由剪切盒在水平方向上的静力平衡方程确定。图 5 所示为剪应力和上剪切盒竖向位移随剪切位移的变化曲线。可以看到，在剪切初期，剪应力随着剪切位移的增加而线性增加，上剪切盒的竖向位移也线性增加，土石混合物出现剪胀现象。随着剪切位移的增加，剪应力值达到最大，颗粒间的相互咬合作用达到最大。随着剪切位移的继续增加，内部块石间的相互咬合力作用使颗粒不断地发

生移动、旋转，以调整其在土石混合体内部的排列状态，剪应力值减小。当剪切位移大于 40 mm 时，上剪切盒的竖向位移达到最大，剪应力值保持一定值，土石混合体进入临界状态。

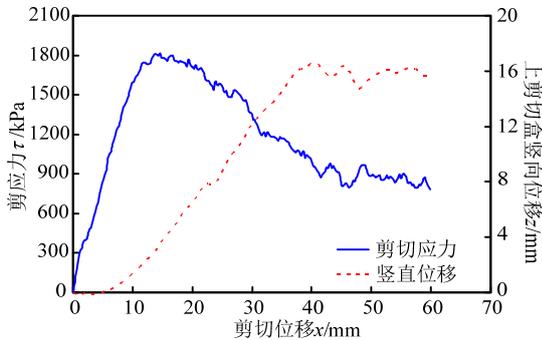
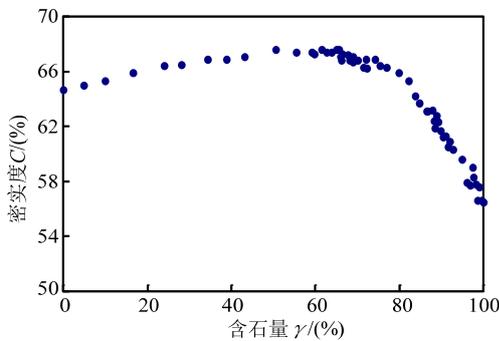


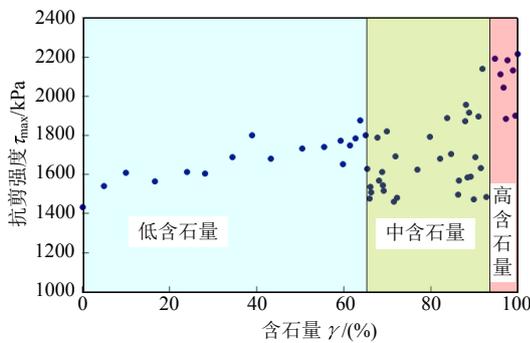
图 5 剪应力、上剪切盒竖向位移随剪切位移变化曲线
Fig.5 Shear stress-shear displacement curve and top shear box vertical displacement-shear displacement curve

图 6(a)为土石混合体密实度随含石量的变化曲线。可以发现，当含石量小于 65%，随着含石量的增加，土石混合体越来越密实，由块石在土体中的悬浮结构逐渐转向密实结构。当含石量大于 65% 时，密实度急剧下降，土石混合体呈现骨架结构。

抗剪强度的确定是剪应力的最大值，本文取不同含石量的最大剪应力即抗剪强度。图 6(b)为土石



(a) 不同含石量下土石混合体密实度的变化曲线



(b) 不同含石量下土石混合体抗剪强度的变化曲线

图 6 不同含石量下，土石混合体的密实度和抗剪强度特性
Fig.6 Characteristics of compactness and shear strength of soil-rock mixtures under different rock contents

混合体抗剪强度随含石量的变化关系曲线。根据抗剪强度的变化，将土石混合体分为三种情况。 $\gamma < 65\%$ 时，低含石量土石混合体，即悬浮结构； $65\% < \gamma < 95\%$ 时，中含石量土石混合体，即密实结构； $\gamma > 95\%$ 时，高含石量土石混合体，即骨架结构。可以发现，当土石混合体为低含石量时，土石混合体的抗剪强度随含石量的增加而增加。当土石混合体为中含石量时，抗剪强度出现较大幅度波动现象，且含石量越大，波动范围越大。当土石混合体为高含石量时，抗剪强度显著增强，波动幅度较小。

2.2 含石量影响的细观分析

力链是散体材料内部颗粒间作用力的主要传递方式。力链是由两接触颗粒中心的连线构成，而力链的数量即为颗粒间的接触数。平均力链强度表示法向接触力的平均大小。从力链主方向和大小分布来看，剪切盒内颗粒间的作用力表现为强烈的各向异性。从细观尺度上分析力链的空间结构和强度概率分布，有助于揭示含石量对土石混合体抗剪强度的影响。本文取含石量分别为 0%、20%、40%、60%、80% 和 100% 时，抗剪强度最大时刻的力链分布如图 7 所示。当含石量分别为 0%、40% 和 100% 时，颗粒间的作用力数量分别为 30046、18537 和 553 个，其中最大作用力分别为 3.15 kN、12.85 kN 和 27.43 kN。在低含石量下，力链主要由土体颗粒构

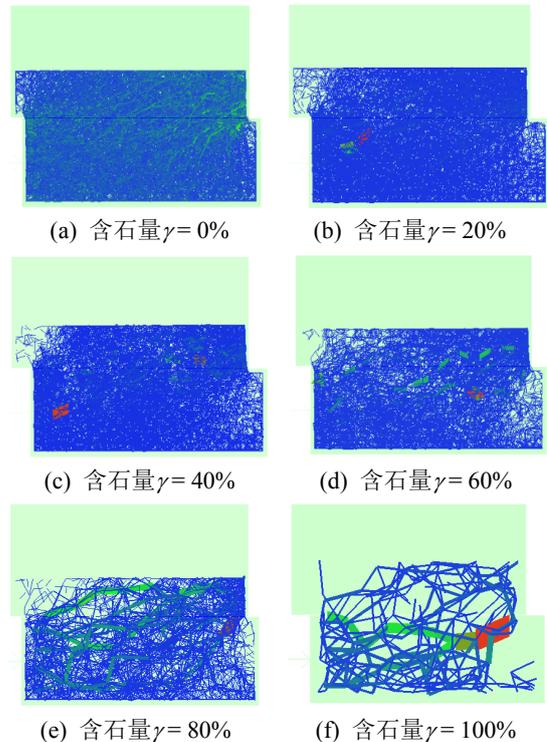


图 7 不同含石量下土石混合体直剪中的力链分布
Fig.7 Force chains under different rock contents

成, 其强度较小, 分布密集; 在中高含石量下, 力链主要由块石颗粒构成, 其强度较大且分布稀疏。随含石量的增加, 力链越粗、强度越大。

颗粒间的平均力链强度 F_m 和力链数量 N_f 统计于图 8 中。可以看到, 随着含石量的增加, 力链个数因颗粒数量的减小而线性减少。当土石混合体处于低含石量时, 平均力链强度基本保持不变; 处于中含石量时, 平均力链强度开始缓慢增加; 当含石量大于 80% 时, 平均力链强度随含石量的增加迅速增加。

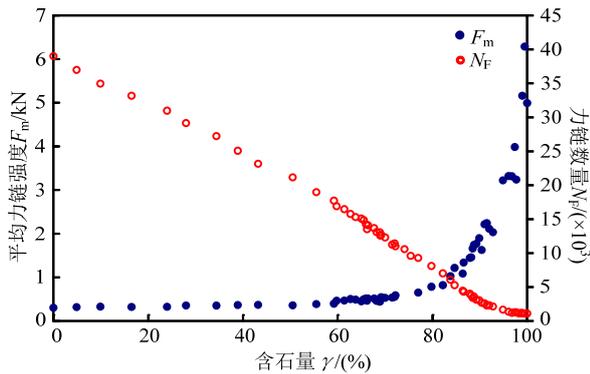


图 8 不同含石量下力链数及平均接触力分布

Fig.8 Force chain number and mean contact force of soil-rock mixtures with different rock contents

在中高含石量下, 土石混合体的抗剪强度出现较大幅度波动现象, 而平均作用力却迅速增加。对于土石混合体这种特殊材料, 在中高含石量下, 含石量的增加不一定会加大土石混合体的抗剪强度, 而会加大土石混合体颗粒间的平均作用力。

3 块石空间分布对土石混合体剪切强度的影响

3.1 中含石量下块石空间分布的影响

在中含石量下, 块石颗粒间接触不充分, 块石在空间随机分布, 土石混合体的抗剪强度出现波动现象。为了具体分析块石的空间分布对土石混合体抗剪强度的影响, 本文分别取两组含石量相同, 但抗剪强度相差较大的算例进行对比。如图 8 所示, 当含石量为 70% 时, 两组土石混合体的抗剪强度分别为 1816.9 kPa 和 1459.0 kPa; 含石量为 88% 时, 其抗剪强度分别为 1952.2 kPa 和 1582.1 kPa。

图 9(a) 中, 块石分布呈线状, 并贯穿上下剪切盒, 土石混合体的抗剪强度较大。而图 9(b) 中, 块石的空间分布较分散, 土石混合体的抗剪强度较小。在含石量为 88% 时, 块石基本处于充分接触状

态, 直接观察块石相对困难, 转而观察土体的空间分布, 发现图 9(c) 中, 土体在块石骨架的空隙中存在, 并形成一条直线, 这说明块石的空间分布使其接触形式也呈倾斜的直线状, 并贯穿上下剪切盒, 块石的这种排列可以构成稳定的骨架结构, 加大其抗剪强度。而在图 9(d) 中, 土体的分布比较松散, 说明块石构成的骨架结构较分散, 不稳定。该种骨架结构很容易发生断裂、重组, 降低其抗剪强度。

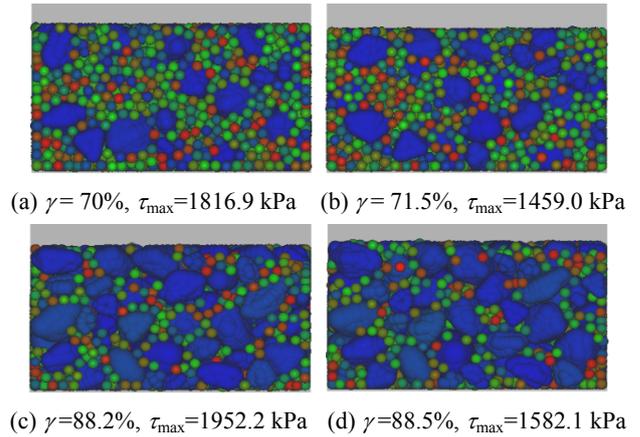
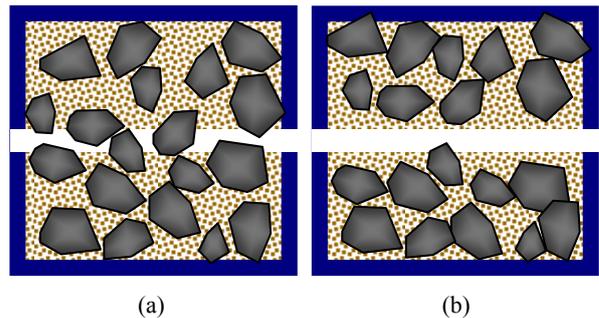


图 9 中含石量下相同含石量土石混合体的块石空间分布
Fig.9 Rock spatial distributions of two sets of soil-rock mixtures with same medium rock content

在中含石量下, 块石的空间分布对抗剪强度的影响很大。当块石二维分布的示意图如图 10(a)、图 10(b) 所示, 由此可更直接地显示颗粒的分布特性和相互作用规律。块石在上下剪切盒中分布均匀, 或者在剪切带附近不能集中分布。块石间的相互运动只受到土体颗粒的影响, 运动相对较自由, 块石间不能形成完整的力链结构, 其抗剪强度较小。

反之, 当块石的空间分布如图 10(c)、图 10(d) 所示, 块石排列于剪切带附近, 或者块石分布能够构成链条结构, 在直剪过程中, 块石间会发生相互挤压和咬合, 阻碍块石间的相互运动, 则会加大土石混合体的抗剪强度。

在中含石量下, 为进一步分析相同含石量时土石混合体抗剪强度差异性的内在机理, 分析两组土



(a) (b)

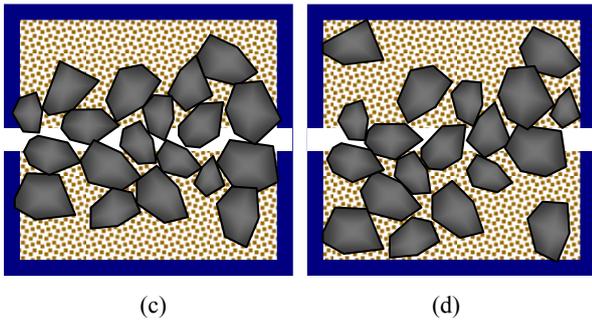
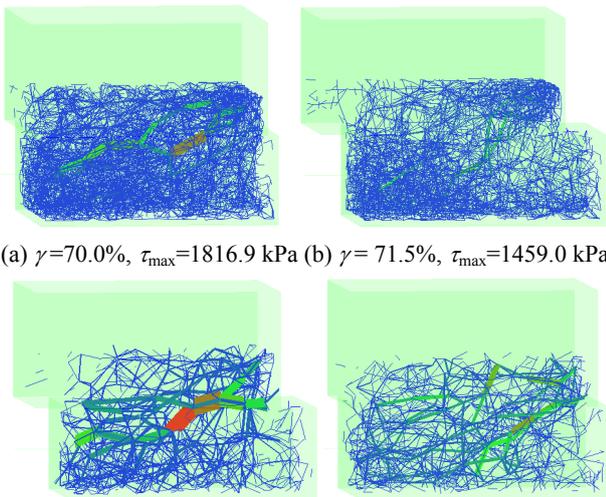


图 10 中含石量下相同含石量土石混合物中块石的不同分布空间示意图

Fig.10 Schematics of rock spatial distributions of soil-rock mixtures with same medium rock content

石混合物在直剪过程中产生最大剪应力时刻的力链分布，以及力链强度的概率分布情况。当含石量为 70.0%左右时，图 11(a)中，力链分布密集，并且在剪切带附近分布强力链，该强力链贯穿上下剪切盒，而图 11(b)中，力链分布稀疏，剪切带附近所形成的强力链相对较弱。含石量在 88%左右时，图 11(c)与图 11(d)相对比力链图差别很大，其作用力个数分别为 1572 个和 1935 个，作用力最大值分别为 52.1 kN 和 44.0 kN。在图 11(c)中，块石的空间分布使土石混合物形成密集且很强的力链分布于剪切带附近，而图 11(d)中力链结构不稳固，力链强度不高，导致抗剪强度较弱。因此，土石混合体的抗剪强度受块石空间分布的影响很大。如果块石的空间分布能构成强有力并且稳定的骨架结构，则可加大其抗剪切强度，反之，块石分布稀疏，骨架结构不稳定，其抗剪强度较弱。



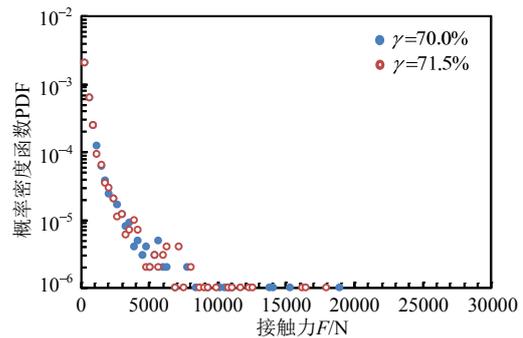
(a) $\gamma=70.0\%$, $\tau_{\max}=1816.9$ kPa (b) $\gamma=71.5\%$, $\tau_{\max}=1459.0$ kPa

(c) $\gamma=88.2\%$, $\tau_{\max}=1952.2$ kPa (d) $\gamma=88.5\%$, $\tau_{\max}=1582.1$ kPa

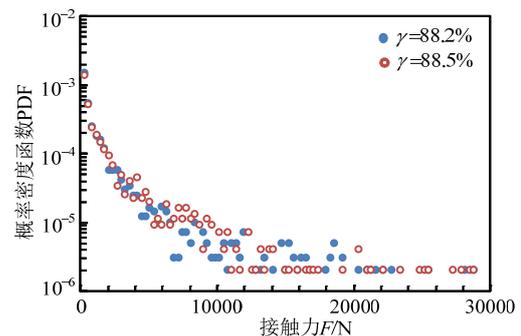
图 11 两组相同含石量土石混合物在最大剪应力时的力链结构分布

Fig.11 Force chain structures at maximum shear stress of two sets of soil-rock mixtures with same rock content

颗粒间接触力的概率分布也可很好地说明土石混合物在中含石量时抗剪强度出现波动的原因。在中含石量下，两组相近含石量土石混合物在最大剪应力时的颗粒接触力概率分布如图 12 所示。可以看出，在相近含石量下，颗粒间接触力的概率分布有一定的差异。导致接触力差异的主要原因是块石的空间分布不同。当块石空间分布较集中，或者在剪切带附近能够形成强有力的骨架，阻碍块石的相对运动。此时，块石间会形成较强的力链结构，增加了土石混合体的抗剪切强度。



(a) $\gamma=70.0\%$ 和 $\gamma=71.5\%$ 时接触力概率分布



(b) $\gamma=88.2\%$ 和 $\gamma=88.5\%$ 时接触力概率分布

图 12 中含石量下的颗粒间接触力概率分布

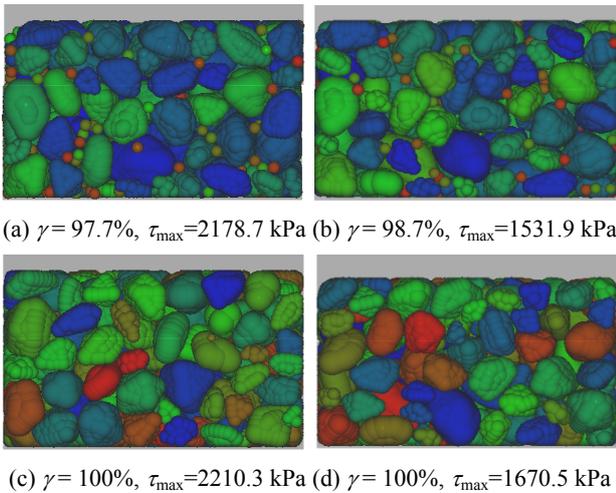
Fig.12 Probability distribution of inter-particle contact force under medium rock content

3.2 高含石量下块石空间分布的影响

在高含石量下，土石混合物中块石间相互充分接触，如图 13 所示。块石颗粒构成骨架结构，土体颗粒悬浮于块石颗粒间。当含石量为 97.7%、98.7%时，两组土石混合体的抗剪强度分别为 2178.7 kPa、1531.9 kPa；含石量为 100%时，其抗剪强度分别为 2210.374 kPa、1670.509 kPa。

高含石量下，由块石空间分布所导致的不同块石接触形式是影响土石混合物抗剪强度波动的关键因素。从图 13(a)、图 13(c)中可以看到，块石间的接触方式多以面接触为主；而图 13(b)、图 13(d)中，块石的空间分布使其接触方式多以尖角接触为

主。图 14 所示为高含石量下，相同含石量土石混合体的不同块石分布空间示意图。块石的非规则形态使得很多棱边尖角存在。块石空间位置的随机性，造成块石间接触形式不同，主要有面接触和尖角接触两种。当块石的空间分布以面相互接触，由于接触面积的增大，构成的骨架结构越稳定。在直剪过程中，块石间的咬合作用力加大，使得土石混合体的抗剪强度较大。当块石的空间分布以尖角接触为主，这样的块石分布所形成的骨架结构很容易断裂，在直剪过程中，块石间的咬合作用力降低，土石混合体的抗剪强度值较小。



(a) $\gamma=97.7\%$, $\tau_{\max}=2178.7$ kPa (b) $\gamma=98.7\%$, $\tau_{\max}=1531.9$ kPa
(c) $\gamma=100\%$, $\tau_{\max}=2210.3$ kPa (d) $\gamma=100\%$, $\tau_{\max}=1670.5$ kPa

图 13 高含石量下两组相同含石量土石混合体的块石空间分布

Fig.13 Rock spatial distributions of two sets of soil-rock mixtures with same high rock content

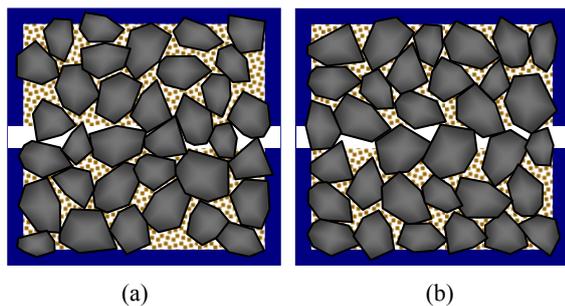
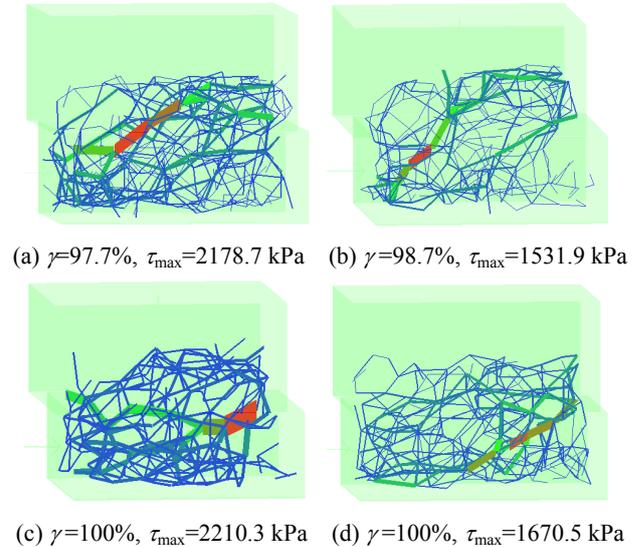


图 14 高含石量下相同含石量土石混合体中块石的不同空间分布

Fig.14 Schematics of rock spatial distributions of soil-rock mixtures with same high rock content

图 15 所示为高含石量下，含石量相同、抗剪强度不同的两组土石混合体在最大剪应力时刻的力链结构。含石量同样为 100%时，其作用力个数分别为 537 个和 587 个，作用力最大值分别为 73.3 kN 和 39.7 kN，而作用力的均值则分别为

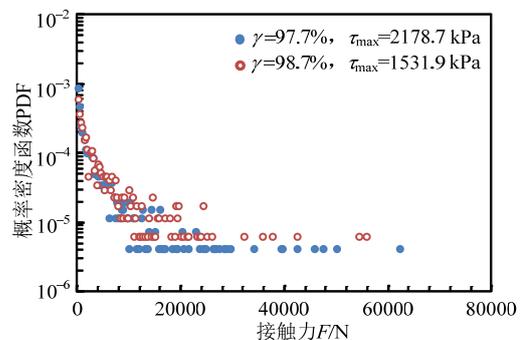
40.1 kN 和 34.7 kN。可以发现，在相同含石量时，剪切强度高的力链结构图中有一条颜色很深的强力链贯穿于上下剪切盒间，而剪切强度小的力链结构图中，强力链的颜色较前者弱些，而力链基本是由多条中等强度力链构成，并贯穿于上下剪切盒。强力链的形成与块石的分布有关，当块石分布使其颗粒间以面接触，其构成的稳定力链的抗剪切效果最好。而块石分布使其颗粒间以尖角或者棱边接触为主时，块石间相互作用不稳定。在直剪过程中，力链会不断发生断裂、重组，从而削弱块石的抗剪性，导致剪切强度很小。



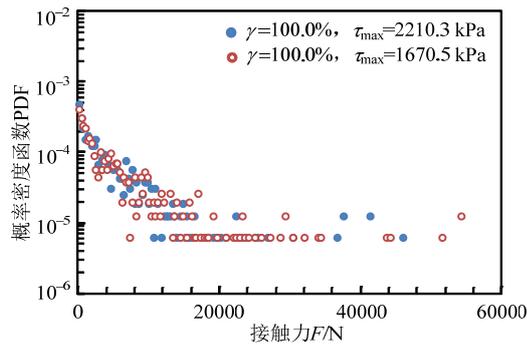
(a) $\gamma=97.7\%$, $\tau_{\max}=2178.7$ kPa (b) $\gamma=98.7\%$, $\tau_{\max}=1531.9$ kPa
(c) $\gamma=100\%$, $\tau_{\max}=2210.3$ kPa (d) $\gamma=100\%$, $\tau_{\max}=1670.5$ kPa

图 15 高含石量下的力链分布
Fig.15 Force chain in high rock content

图 16 所示为高含石量下，含石量相近、抗剪强度不同的两组土石混合体的颗粒间接触力概率分布。相近含石量的土石混合体抗剪强度存在差异性的原因在于其接触力概率分布的差异性。影响土石混合体中接触力的主要因素是块石间所构成的力链结构及其稳定性，而块石的空间分布是影响力链结构的形成与稳定性的关键所在。



(a) $\gamma=97.7\%$ 和 $\gamma=98.7\%$ 时接触力概率分布



(b) $\gamma=100.0\%$ 时两个试样的接触力概率分布

图 16 高含石量下的颗粒间接触力的概率分布

Fig.16 Probability distribution of inter-particle contact force at high rock content

4 结论

本文采用离散单元模型对土石混合体的直剪过程进行了数值模拟,分析了含石量和块石空间分布对土石混合物抗剪强度的影响。当土石混合物在低含石量时,抗剪强度随着含石量的增加而增大,土石混合物由块石的悬浮结构逐渐过渡到密实结构。当含石量为 65%时,土石混合物达到最密实状态。当土石混合物在中含石量时,抗剪强度出现波动现象,含石量越高,波动幅度越大。当土石混合物在高含石量时,抗剪强度显著增大,同时出现波动现象,而波动幅度相对较小。

土石混合物在中高含石量下,抗剪强度出现波动的细观尺度因素是块石空间分布所形成的力链结构特性。在中含石量下,当块石集中分布于剪切带附近,或者块石排列呈链条状,并能够贯穿于上下剪切盒,此时,土石混合物内部形成密集分布且很强的力链分布于剪切带附近,土石混合体的抗剪强度较高。反之,当块石分布稀疏,不能构成稳定骨架结构,所形成的力链结构不稳固,力链强度不高,导致抗剪强度较弱。

当土石混合物处于高含石量时,块石间已相互充分接触,此时块石的空间分布会影响块石间的接触形式。当块石分布使其颗粒间的接触为面接触,能够形成稳定的强力链,且贯穿于上下剪切盒,抗剪强度增大。而当块石分布使其接触形式为尖角接触,在剪切过程中形成多条不稳定力链,力链发生断裂、重组,抗剪切强度降低。

参考文献:

[1] 殷跃平, 张加桂, 陈宝荪, 康宏达. 三峡库区巫山移民新城址松散堆积体成因机制研究[J]. 工程地质学报,

2000, 8(3): 265—271.

Yin Yueping, Zhang Jiagui, Chen Baosun, Kang Hongda. Formation mechanism of large-scale loose sediment at the relocation sites of WuShan County on The Three-Gorges [J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(3): 265—271. (in Chinese)

[2] 油新华, 汤劲松. 土石混合物野外水平推剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1537—1540.

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): 1537—1540. (in Chinese)

[3] Vallejo L E, Mawby R. Porosity influence on the shear strength of granular material-clay mixtures [J]. Engineering Geology, 2000, 58(2): 125—136.

[4] 刘忠强, 薛亚东, 黄宏伟, 吴坚. 崩积体剪切性能试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2349—2358.

Liu Zhongqiang, Xue Yadong, Huang Hongwei, Wu Jian. Experimental research on shear behavior of colluvium [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2349—2358. (in Chinese)

[5] 廖秋林, 李晓, 李守定. 土石混合物重塑样制备及其压密特征与力学特性分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 385—391.

Liao Qiulin, Li Xiao, Li Shouding. Sample remodeling compactness characteristic and mechanical behaviors of rock-soil mixtures [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(3): 385—391. (in Chinese)

[6] 时卫民, 郑颖人. 碎石土压实性能试验研究[J]. 岩土工程技术, 2005, 19(6): 299—306.

Shi Weimin, Zheng Yingren. Experiment research on compactibility of gravel-soil [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2005, 19(6): 299—306. (in Chinese)

[7] 杨冰, 杨军, 常在, 甘厚义, 宋二祥. 土石混合物压缩性的三维颗粒力学研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1645—1650.

Yang Bing, Yang Jun, Chang Zai, Gan Houyi, Song Erxiang. 3-D granular simulation for compressibility of soil-aggregate mixture [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1645—1650. (in Chinese)

[8] 陈希哲. 粗粒土的强度与咬合力的试验研究[J]. 工程力学, 1994, 11(4): 56—62.

Chen Xizhe. Research on the strength of the coarse grained soil and the interlocking force [J]. Engineering Mechanics, 1994, 11(4): 56—62. (in Chinese)

[9] 刘汉龙, 秦红玉, 高玉峰, 周云东. 堆石粗粒料颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 562—566.

Liu Hanlong, Qin Hongyu, Gao Yufeng, Zhou Yundong. Experimental study on particle breakage of rockfill and coarse aggregates [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 562—566. (in Chinese)

[10] 刘松玉, 邱钰, 童丽元, 缪林昌. 煤矸石的强度特性试

- 验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 199—205.
- Liu Songyu, Qiu Yu, Tong Liyuan, Miu Linchang. Experimental study on strength properties of coal wastes [J]. Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 199—205. (in Chinese)
- [11] 凌华, 傅华, 韩华强, 王伟. 颗粒破碎对堆石料静动力特性影响的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(4): 44—47.
- Ling Hua, Fu Hua, Han Huaqiang, Wang Wei. Experimental study on effects of particle breakage on static and dynamic characteristics of rock-fill materials [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(4): 44—47. (in Chinese)
- [12] Jin L, Zeng Y, Xia L, Ye Y. Experimental and numerical investigation of mechanical behaviors of cemented soil-rock mixture [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017, 35(1): 337—354.
- [13] 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)
- [14] Zhou Z, Yang H, Wang X, Liu B. Model development and experimental verification for permeability coefficient of soil-rock mixture [J]. International Journal of Geomechanics, 2016, published on line. 04016106. doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000768.
- [15] 陈晓平, 周秋娟, 蔡晓英. 高液限花岗岩残积土的物理特性和剪切特性[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 901—908.
- Chen Xiaoping, Zhou Qiujuan, Cai Xiaoying. Physical properties and shear strength characteristics of high liquid limit granit residual soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 901—908. (in Chinese)
- [16] 李振, 邢义川. 干密度和细粒含量对砂卵石及碎石抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2255—2260.
- Li Zhen, Xing Yichuan. Effects of dry density and percent fines on shearing strength of sandy cobble and broken stone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2255—2260. (in Chinese)
- [17] 董云, 柴贺军. 土石混合料室内大型直剪试验的改进研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1330—1333.
- Dong Yun, Chai Hejun. Improvement study of lab large-scale direct shear test of rock-soil aggregate mixture [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1330—1333. (in Chinese)
- [18] Wang Y, Li X, Zheng B, Li S D, Duan Y T. A laboratory study of the effect of confining pressure on permeable property in soil-rock mixture [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(4): 284.
- [19] 张玉, 徐卫亚, 李德亮. 大型滑坡演化机制及滑带剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 2606—2616.
- Zhang Yu, Xu Weiya, Li Deliang. Experimental study of evolution mechanism and shear characteristics of slip zone of large-scale landslide [J]. Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering, 2013, 32(1): 2606—2616. (in Chinese)
- [20] 胡亚元, 马攀. 二维堤坝管涌的数值模拟研究[J]. 工程力学, 2015, 32(3): 110—118.
- Hu Yayuan, Ma Pan. The numerical simulation of piping in the two-dimensional embankment [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(3): 110—118. (in Chinese)
- [21] 欧阳振华, 李世海, 戴志胜. 块石对土石混合体力学性能的影响研究[J]. 实验力学, 2010, 25(1): 61—66.
- Ouyang Zhenhua, Li Shihai, Dai Zhisheng. On the influence factors of mechanical properties for soil-rock mixture [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(1): 61—66. (in Chinese)
- [22] 王光进, 杨春和, 张超, 冒海军, 王伟. 粗粒含量对散体岩土颗粒破碎及强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 2649—2654.
- Wang Guangjin, Yang Chunhe, Zhang Chao, Mao Haijun, Wang Wei. Experimental research on particle breakage and strength characteristics of rock and soil materials with different coarse-grain contents [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 2649—2654. (in Chinese)
- [23] 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—97.
- Wang Xin, Ding Xiuli. Numerical tests on impact of stone content to mechanical parameters of soil-rock mixture [J]. Port & Waterway Engineering, 2010, 10: 93—97. (in Chinese)
- [24] Miller R A, Sowers G F. The strength characteristics of soil-aggregate mixtures [J]. Highway Research Board Bulletin, 1957, 183: 16—23.
- [25] 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: 1235—1247.
- [26] 徐文杰, 王立朝, 胡瑞林. 库水位升降作用下大型土石混合体边坡流-固耦合特性及其稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 7(5): 1491—1498.
- Xu Wenjie, Wang Lichao, Hu Ruilin. Fluid-solid coupling characteristics and stability analysis of soil-rock mixture slope in rising and drawdown of reservoir water levels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 7(5): 1491—1498. (in Chinese)
- [27] 邵帅, 季顺迎. 块石空间分布对土石混合体边坡稳定性的影响[J]. 工程力学, 2014, 31(2): 177—183.
- Shao Shuai, Ji Shunying. Effects of rock spatial distributions on stability of rock-soil-mixture slope [J].

- Engineering Mechanics, 2014, 31(2): 177—183. (in Chinese)
- [28] 倪海江, 徐卫亚, 石安池, 徐建荣, 吉华. 基于离散元的柱状节理岩体等效弹性模量尺寸效应研究[J]. 工程力学, 2015, 32(3): 90—96.
Ni Haijiang, Xu Weiya, Shi Anchi, Xu Jianrong, Ji Hua. Scale effect on equivalent continuum elastic modulus of columnar jointed rock masses by distinct element method [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(3): 90—96. (in Chinese)
- [29] 徐文杰, 张海洋, 许强, 于玉贞. 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—234.
Xu Wenjie, Zhang Haiyang, Xu Qiang, Yu Yuzhen. Numerical simulations of direct shear test with soil-rock mixture using discrete element method [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2014, 31(2): 228—234. (in Chinese)
- [30] 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 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): 2695—2703. (in Chinese)
- [31] 高谦, 刘增辉, 李欣, 李俊华. 露天坑回填土石混合体的渗流特性及颗粒元数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2342—2348.
Gao Qian, Liu Zenghui, Li Xin, Li Junhua. Permeability Characteristics of rock and soil aggregate of backfilling open-pit and particle element numerical analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2342—2348. (in Chinese)
- [32] 边学成, 李伟, 李公羽, Erol Tutumluer. 基于颗粒真实几何形状的铁路道砟剪切过程三维离散元分析[J]. 工程力学, 2015, 32(5): 64—75.
Bian Xuecheng, Li Wei, Li Gongyu, Tutumluer-Erol. Three-Dimensional discrete element analysis of railway ballast's shear process based on particles' real geometry [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(5): 64—75. (in Chinese)
- [33] Potyondya D O, Cundall P A. A bonded-particle model for rock [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41(8): 1329—1364.
- [34] Yan Y, Ji S. Discrete element modeling of direct shear tests for a granular material [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2010, 34: 978—990.
- [35] 季顺迎, 赵金凤. 含石量对土石混合体压桩承载力影响的离散元分析[J]. 计算力学学报, 2014, 31(5): 596—602.
Ji Shunying, Zhao Jinfeng. Influences of rock content on bearing capability of soil-rock mixture during pile penetration with discrete element analysis [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2014, 31(5): 596—602. (in Chinese)
- [36] 周剑, 张路青, 戴福初, 闵闾. 基于粘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(增刊 1): 2650—2659.
Zhou Jian, Zhang Luqing, Dai Fuchu, Min Hong. 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(Suppl 1): 2650—2659. (in Chinese)
- [37] 赵金凤, 严颖, 季顺迎. 基于离散元模型的土石混合体直剪试验分析[J]. 固体力学学报, 2014, 35(2): 124—134.
Zhao Jifeng, Yan Ying, Ji Shunying. Analysis of direct shear test of soil-rock mixture based on discrete element model [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2014, 35(2): 124—134. (in Chinese)
- [38] Kremmer M, Favier J F. A method for representing boundaries in discrete element modelling - Part II: Kinematics [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001, 51: 1423—1436.