

基于离散元模型的土石混合体直剪试验分析*

赵金凤¹ 严颖² 季顺迎^{1**}

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

摘要 土石混合体是由高强度块石和低强度土体组成的一类特殊工程地质材料, 其力学性质可通过直剪试验进行确定. 论文针对土石混合体的细观材料特性, 分别采用球形颗粒单元和非规则组合颗粒单元模拟土体和块石材料, 对其在不同含石量和颗粒粘结强度下的直剪试验过程进行离散元分析. 计算结果表明, 土石混合体的抗剪强度随着含石量和粘结强度的增加而增加; 通过不同法向应力下直剪试验的离散元分析, 确定了不同含石量下土石混合体材料的内摩擦角和粘聚力. 论文研究结果有助于进一步揭示土石混合体的抗剪强度特性.

关键词 土石混合体, 直剪试验, 离散元模型, 含石量, 内摩擦角, 粘聚力

0 引言

土石混合体是一种介于均质土体与岩体之间的特殊岩土材料, 在细观结构上具有高度的不均匀性^[1,2]. 它不同于一般的土体或岩石, 在很大程度上取决于土石混合体的岩石含量、粘结强度以及块石结构特征^[3,4]. 近年来, 土石混合体这种特殊的工程地质材料受到越来越多的关注, 并主要通过现场或室内试验, 以及离散元数值方法探索其力学特性.

土石混合体这种特殊工程地质材料在全国乃至世界各地均有广泛分布, 例如长江三峡地区、青藏高原和攀西地区等. 随着工程建设规模的不断扩大, 土石混合体的力学特性越来越受到工程界的广泛重视^[5,6].

在土石混合体的强度特性研究中, 直剪试验是普遍采用的方法, 并广泛地应用于岩土类材料的力学性质研究^[7-9]. 通过对土石混合体的大型直剪试验可得出其在不同参数下的变形破坏机制及粘聚力^[3,10]. 通过分析直剪试验中剪切带或剪切面的演化过程, 可得到土石混合体材料在剪切破坏中的变形规律^[10,11]. 此外, 通过直剪试验还可对土石混合体在不同含水状态和颗粒破坏条件下的强度规律进行确定^[12,13]. 由此可见, 直剪试验在土石混合体剪切强度性质研究中具有重要的作用.

含石量是影响土石混合体抗剪强度的一个重要

因素. 通过原位试验和大型直剪试验发现含石量是决定土石混合体强度与破坏形式的重要因素^[13-15]. 通过土石混合体压缩性研究, 发现其最优含石量为 60%-80%^[16]. 此外, 含石量对由剪应力-应变曲线所表征的软化和硬化特征也有明显的影响^[13]. 相对于块石含量和排列方式, 块石尺寸对土石混合体的抗剪性能具有更明显的影响^[17]. 通过在直剪试验中施加不同的法向作用力, 可根据摩尔库伦准则确定其抗剪强度参数^[18-21]. 此外, 块石的弹性模量也是影响土石混合体力学性质的重要因素^[10]. 因此, 含石量对土石混合体力学性质的影响是揭示其宏观变形规律和强度特征的关键问题.

由于土石混合体细观结构的特殊性, 土体与块石均为非连续介质. 目前离散单元法已成为解决这类问题的重要方法^[10]. 它将土石混合体看作若干个离散颗粒单元的集合体, 对块石和土体颗粒赋予相应的几何尺寸和材料性质, 可相对准确地模拟其在变形过程中的细观结构特征, 并由此确定其宏观力学性能. 在土石混合体的离散元模拟中, 一般将土体离散为二维圆盘单元或三维球体单元^[10,16,22]. 而对于几何形态复杂的块石单元, 也可以将其简化为圆盘或球体单元^[10]. 然而, 为更精确地模拟土石混合体中块石的几何形态, 可采用二维椭圆、多边形单元^[23]或三维块体单元^[24]. 此外, 采用颗粒组合或粘接的方式可生成非规则颗粒单元, 以更精确地模拟块石的几何形态^[1]. 该组合颗粒模型已成功地应用

* 国家重点基础研究发展规划项目(2010CB731502)和国家自然科学基金项目(41176012, U1234209)资助.
2013-05-15 收到第 1 稿, 2013-10-20 收到修改稿.

** 通讯作者. Tel: 0411-84707212, E-mail: jisy@dlut.edu.cn.

于碎石的离散元模拟^[25-27].

为此,本文将采用组合颗粒单元模拟土石混合体中的块石材料,对土石混合体的直剪试验过程进行离散元数值分析,确定不同含石量和土体颗粒间粘结强度对宏观剪切强度的影响,并确定其内摩擦角和粘聚力.

1 土石混合体的离散单元模型

1.1 土石混合体的离散单元构造

土石混合体材料由小粒径的土体和大粒径块石按不同比例组成.这里采用球形单元模拟土体颗粒,而对于非规则形态的块石,则采用镶嵌模式的组合颗粒单元.本文构造的非规则块石单元如图 1 所示.在构造块石组合颗粒模型时,依据设定的块石尺寸,以及球形颗粒的个数和重叠量确定相应的球形颗粒尺寸.在不同的球形颗粒尺寸下,块石颗粒受颗粒间重叠量的影响其整体光滑程度是不同的,并由此影响到土石混合体的宏观力学性能.考虑土石混合体中土体和块石粒径的非均匀分布规律,这里对这两类颗粒单元的粒径随机生成.

对于非规则块石颗粒的质量、质心和转动惯量采用有限分割法进行确定,并通过四元数方法进行块石颗粒的动力学分量在整体坐标和局部坐标下的转换^[27].

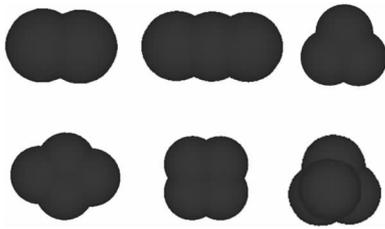


图 1 土石混合体中块石的非规则离散单元模型

Fig. 1 Irregular shape of rock in soil-rock mixture in DEM

1.2 土石混合体材料的离散元模型

(1) 土石混合体接触模型

土石混合体中的非规则块石由大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间的作用力.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.

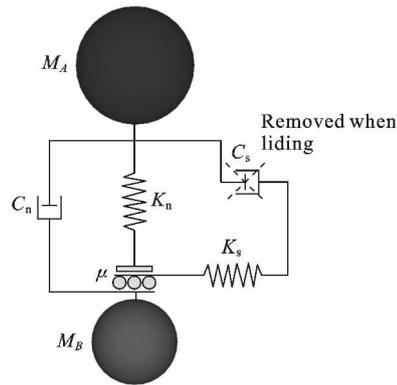


图 2 单元间的接触力模型

Fig. 2 Contact force model between two elements

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^[28]:

$$F_n = K_n x_n^{3/2} + \frac{3}{2} A K_n x_n^{1/2} \dot{x}_n \tag{1}$$

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^[27].

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:

$$F_s^* = K_s x_n^{1/2} x_s \tag{2}$$

$$F_s = \min(F_s^*, \text{sign}(F_s^*) \mu_p F_n) \tag{3}$$

式中 x_s 为颗粒的切向位移; μ_p 为颗粒摩擦系数.法向刚度 K_n 和切向刚度 K_s 分别为:

$$K_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \tag{4}$$

$$K_s = 8G^* \sqrt{R^*} \tag{5}$$

式中 $E^* = E/[2(1-\nu^2)]$, $R^* = R_A R_B / (R_A + R_B)$, $G^* = G/[2(1-\nu)]$, $G = E/[2(1+\nu)]$.这里 E 和 ν 为颗粒材料的弹性模量和泊松比, G 为剪切模量, R_A 和 R_B 分别为两个颗粒的半径.

(2) 土石混合体材料中土体颗粒的粘结模型

对于土石混合体中土体颗粒间粘聚力,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模拟土石混合体内部的粘结效应.本文采取平行

粘结模型^[25],如图3所示,其中 x_A 和 x_B 分别为颗粒A和颗粒B的位置矢量, n 为接触方向矢量.

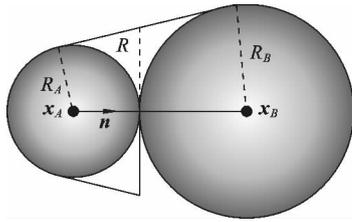


图3 单元间的平行粘结模型

Fig. 3 Parallel bond model between two elements

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 .依据梁的拉伸、扭转和弯曲模型,粘接颗粒间的最大法向和剪向应力分别为:

$$\sigma_{\max} = \frac{|F_n|}{A} + \frac{|M_s|}{I}R \quad (6)$$

$$\tau_{\max} = \frac{|F_s|}{A} + \frac{|M_n|}{J}R \quad (7)$$

式中 R 为两个粘接颗粒的有效粘接半径,可根据颗粒间粘接方式的差异取 $R=2R_A R_B / (R_A + R_B)$ 、 $\min(R_A, R_B)$ 或 $\sqrt{R_A R_B}$,本文离散元计算中取后者.这里粘接面积 $A=\pi R^2$ 、惯性矩 $I=\pi R^4/4$ 和极惯性矩 $J=\pi R^4/2$.当粘接颗粒间的法向或切向应力达到其相应粘接强度时,粘接颗粒之间发生破碎.由于土石混合体材料在剪切破碎后不宜在短时间内重新粘接,这里不考虑粘接颗粒破碎后的再次粘接情况.

(3) 计算时间步长

在土石混合体的离散元计算中,时间步长依据非线性接触模型确定.首先定义颗粒接触中的临界时间为^[28]:

$$t_{\text{crit}} = \frac{\pi R_{\min}}{0.163\nu + 0.8766} \sqrt{\frac{\rho}{G}} \quad (8)$$

式中 R_{\min} 是最小颗粒半径, ρ 为材料密度, ν 为泊松比, G 为颗粒剪切模量.在土石混合体材料中,土体颗粒的粒径和密度较小,尽管其剪切模量较低,但其临界时间要明显小于块石颗粒的临界时间.

DEM计算中的时间步长要小于临界时间,有^[28]:

$$dt = \alpha t_{\text{crit}} \quad (9)$$

式中 α 为经验系数,这里取 $\alpha=0.2$.

2 土石混合体直剪的离散元模型

2.1 土石混合体试样的生成

考虑土石混合体中土体和块石的尺寸离散性,本文按正态概率分布分别生成土体和块石颗粒的质量,再由此确定相应的粒径.根据土石混合体中的块石尺寸,本文取剪切盒尺寸 $L=35\text{ cm}$ 、 $B=35\text{ cm}$ 和 $H=13\text{ cm}$.颗粒在两剪切盒构成的立方区域内随机生成.为获得土石混合体密实且随机的初始排列状态,将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.当试样颗粒在剪切盒内受重力作用下落稳定后,再施加一定的法向荷载进行压实.在含石量 γ 分别为0%、20%、40%、60%、80%和100%时,土石混合体试样的初始排列如图4所示.

2.2 土石混合体直剪试验的计算参数

土石混合体初始试样生成后,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变形,并由此确定试样的强度和变形特征.最大剪切位移设定为直剪盒长度的15%.在土石混合体直剪的模拟过程中,上下剪切盒之间剪切带承受的总的竖向力为上剪切盒重量 W_B 、内部颗粒质量 W_P 和施加给顶盖的竖向力 P .剪切面上的剪力由剪切盒在水平方向上的静力平衡方程确定.由此,剪切带上的法向力和切向力分别为:

$$F_N = P + W_P + W_N \quad (10)$$

$$F_S = \sum_{i=1}^N (N_{wi} + S_{wi}) \quad (11)$$

式中 N_{wi} 为颗粒与上剪切盒左右侧壁之间的法向作用力, S_{wi} 为颗粒对上剪切盒前后侧壁和顶盖的切向摩擦力.上剪切盒由四个侧壁和一个顶盖构成,因此总墙数 $N=5$.

设剪切盒的长度为 L ,宽为 W ,剪切速率为 V ,则 t 时刻的剪切带的面积为 $W(L-Vt)$,此时,剪切带上的正应力和切应力分别为:

$$\sigma_{zz} = \frac{F_N}{W(L-Vt)}, \quad \tau_{zx} = \frac{F_S}{W(L-Vt)} \quad (12)$$

在对土石混合体直剪试验的离散元模拟中,采用的主要计算参数列于表1中,土石混合体的参数主要参考现场试验以及相应的数值模拟进行确定^[30-32].依据现场直剪试验中的剪切速率^[15,32],并为提高计算效率,本文取剪切速率 $1.6 \times 10^{-2}\text{ m/min}$.

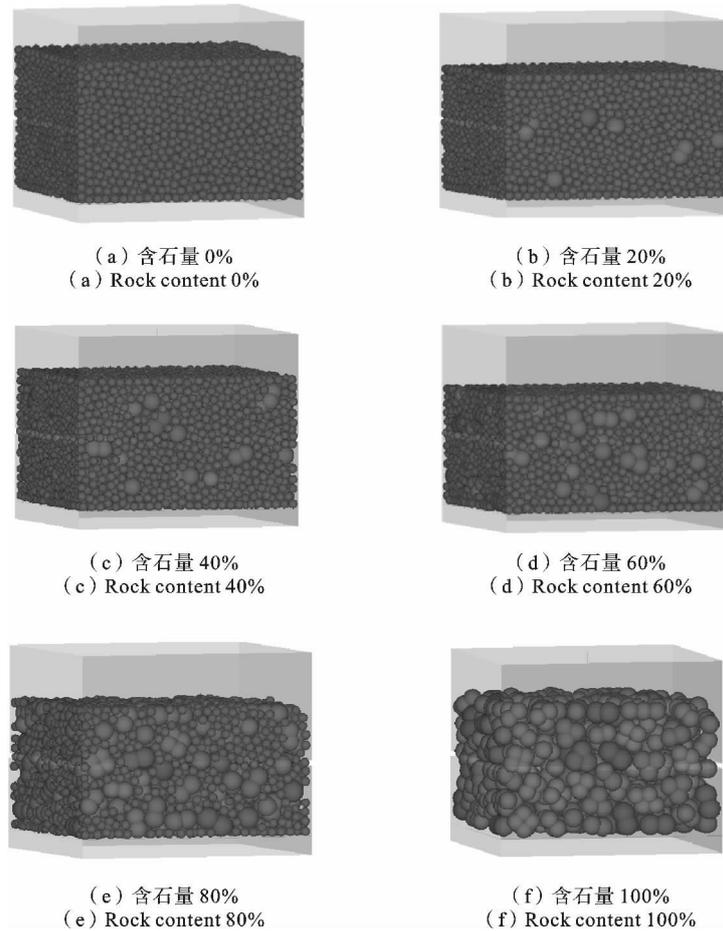


图 4 不同含石量下土石混合体的离散元模型

Fig. 4 Discrete element models of rock-soil mixture sample under different rock contents

考虑自然条件下土体粘结强度和含石量的随机性分布,这里将其在一定范围内选用不同的数值,以分析其对土石混体剪切强度和变形规律的影响。

表 1 土石混合体直剪离散单元模拟中的主要计算参数
Table 1 Main computational parameters in DEM simulation of direct shear for soil-rock mixture

参数	单位	数值
土体密度	kg/m ³	1800.0
块石密度	kg/m ³	2650.0
土体弹性模量	GPa	0.58
块石弹性模量	GPa	58.0
颗粒间摩擦系数	—	0.7
颗粒与侧壁摩擦系数	—	0.2
剪切速率	m/min	1.6 × 10 ⁻²
粘结强度	MPa	0.0~1.0
含石量	%	0.0~100
土体粒径	mm	13.3~14.3
块石粒径	mm	26.4~37.4

2.3 土石混合体直剪过程的离散元模拟

为观察土石混合体在直剪过程中剪切带附近的变形情况,这里采用不同的颜色以标识颗粒的运动.以含石率 $\gamma = 60\%$ 和土体粘结强度 $C_p = 0.1 \text{ MPa}$ 为例,计算得到的土石混合体剪切过程如图 5 所示,从中可以看到试样在剪切过程中的剪切变形.颗粒在剪切带附近相对运动强烈,而在远离剪切带远处相对运动较小.因此,土石混合体试样的变形主要集中在剪切带附近。

在直剪过程中,试样顶盖的竖向位移及剪切应力随剪切位移的变化如图 6 所示,呈现应变软化及剪胀现象.随着剪切位移的增加,竖向位移增长显著,并在剪切位移为 40 mm 时达到最大.然后,随着剪切位移的增加,竖向位移基本保持不变.在剪切初期,颗粒排列紧密,基于下剪切盒横向位移的施加,导致颗粒发生错动并呈现剪胀现象.在剪切后期,由于剪切带内的颗粒运动充分并使试样进入临界状

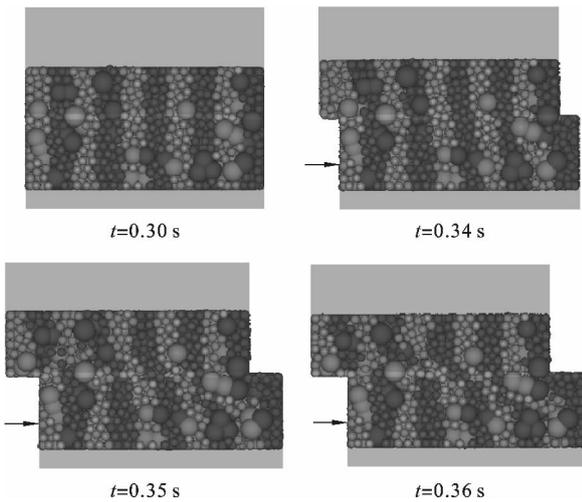


图5 不同时间土石混合物试样的剪切变形
Fig. 5 Shear deformation of soil-rock mixture sample at different time

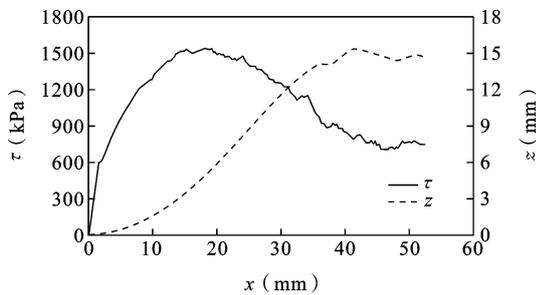


图6 剪切应力、竖向位移与剪切位移的关系曲线
Fig. 6 Relationships between shear displacement and shear stress, vertical displacement

态, 试样顶部的竖向位移趋于稳定. 对于土石混合物材料, 非规则形态的块石颗粒剪切过程中的滑动和滚动效应使剪胀现象更加明显.

从剪切应力的变化趋势可以发现, 剪切过程可大体分为三个阶段: (a). 线弹性阶段. 在剪切初始阶段, 剪应力与剪切位移近似成线性, 且剪应力增长迅速. 这说明颗粒密实排列, 主要发生弹性变形, 而颗粒相对运动不明显. (b). 弹塑性变形阶段. 随着剪切位移的增加, 剪应力也继续增加, 但增长缓慢. 该阶段块石颗粒之间、块石与土体之间以及土体与土体颗粒间的接触充分, 抗剪强度达到最大值. (c). 临界阶段. 随着剪切位移的继续增加, 剪应力出现下降并趋于平缓. 此时, 土石混合物试样内剪切带发展完全, 并进入临界状态.

3 土石混合物剪切强度的影响因素分析

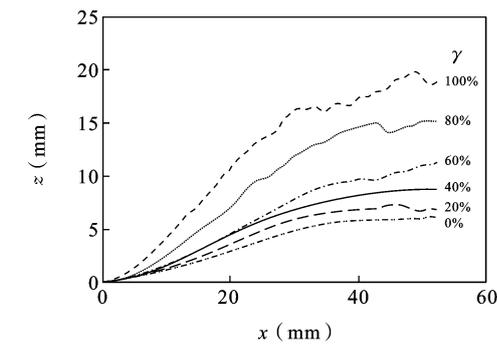
3.1 含石量的影响

含石量 γ 是影响土石混合物力学性质的重要因素. 为分析含石量对土石混合物抗剪强度的影响, 在法向应力为 1.2 MPa 和土体颗粒粘结强度 $C_p = 0.0$ MPa 时, 分别对含石量 $\gamma = 0\%$ 、20%、40%、60%、80%、100% 时进行直剪试验的离散元模拟. 图 7(a) 和 (b) 给出了不同含石量下竖向位移 z 、剪切应力 τ 随剪切位移 x 的变化曲线.

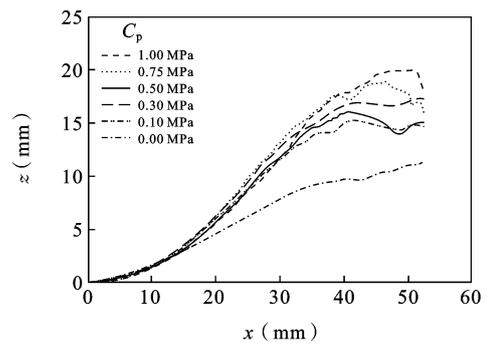
从图 7(a) 可以发现, 土石混合物在不同含石量下均呈现剪胀特性, 且随含石量的增加剪胀特性越明显. 这也反映出随含石量的增加, 块石对剪切变形的影响也越趋于主导地位. 此外, 由于受块石相对运动和旋转的影响, 竖向位移随含石量的增加而呈现出更强的波动特性. 土石混合体的抗剪强度随含石量的增加而明显升高, 且剪切曲线也随含石量的增加而呈很强的波动性, 如图 7(b) 所示. 这主要是由于块石间相互咬合-错动在高含石量下更加明显. 当含石量 $\gamma < 40\%$ 时, 剪切强度差别不大. 这主要是因为块石间的空隙被土体填充, 块石在土石混合物中不再起骨架作用, 即土石混合物呈“土性”. 此外, 随着含石量的增加, 土石混合物到达抗剪强度峰值的位移越小. 竖向位移和剪切强度与含石量的对应关系如图 7(c) 所示. 可以发现, 竖向位移和剪切强度均随含石量的增加呈非线性增长. 当含石量在 0%~40% 时, 剪切强度增加幅度较小, 此时土体发挥着重要的抗剪强度特性; 当含石量在 40%~100% 时, 剪切强度增长迅速, 此时剪切带处块石间的接触面积变大, 块石在剪切中起主导作用.

3.2 土体颗粒粘结强度的影响

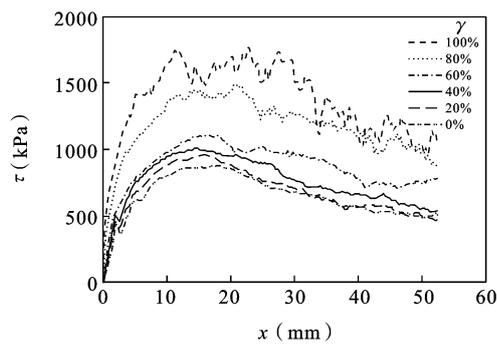
为分析土体颗粒粘结强度对土石混合物剪切强度的影响, 在含石量 $\gamma = 60\%$ 时, 对粘结强度 $C_p = 0.0$ MPa、0.1 MPa、0.3 MPa、0.5 MPa、0.75 MPa 和 1.0 MPa 的直剪过程进行离散元分析, 计算结果如图 8 所示. 不同粘结强度下的土石混合物均表现很强的剪胀特性, 粘结强度越大, 剪胀现象越明显; 粘结强度越大, 抗剪强度也越高. 此外, 粘结强度也明显提高了土石混合物达到抗剪强度的剪切位移. 在临界状态阶段, 不同粘结强度下的抗剪强度随位移的增加最终趋于一致. 这是因为剪切带内土体间的粘结强度因颗粒间的破碎而消失, 致使试样在不



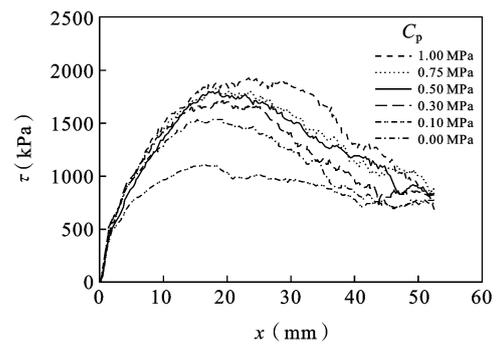
(a) 竖向位移
(a) Vertical displacement



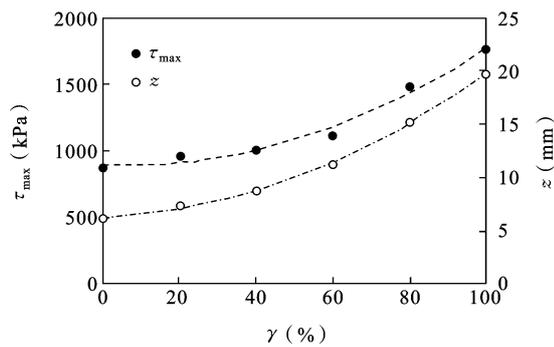
(a) 竖向位移
(a) Vertical displacement



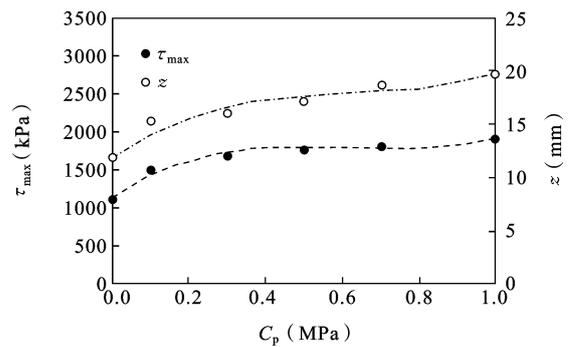
(b) 剪切应力
(b) Shear stress



(b) 剪切应力
(b) Shear stress



(c) 剪切强度和最大竖向位移
(c) Shear strength and maximum vertical displacement



(c) 剪切强度和最大竖向位移
(c) Shear strength and maximum vertical displacement

图 7 含石量对竖向位移和剪切强度的影响

Fig. 7 Influences of rock content on vertical displacement and shear strength

图 8 土体粘结强度对竖向位移和剪切强度的影响

Fig. 8 Influences of soil cohesive strength on vertical displacement and shear strength

同土体颗粒强度下的残余强度基本相同。

不同土体颗粒粘结强度下的土石混合体最大竖向位移和剪切强度如图 8(c) 所示. 土体颗粒的粘结强度越大, 土石混合体的剪胀特性越明显, 剪切强度也越大. 在较低的土体粘结强度下, 宏观剪切强度随土体粘结强度的增加而增长明显; 但随着粘结强度

的继续增加, 剪切强度趋于平稳.

3.3 含石量和粘结强度的共同影响

为进一步分析含石量和粘结强度对土石混合抗剪强度的共同影响, 对含石量 $\gamma=0\%$ 、 20% 、 40% 、 60% 、 80% 、 100% 和土体粘结强度 $C_p=0.0$ MPa、 0.1 MPa、 0.5 MPa 和 1.0 MPa 下的直剪过程进行

离散元分析,由此得到的剪切强度分布如图 9 所示.

在不同含石量下,剪切强度均会随粘结强度的增加而增加.然而,在不同粘结强度下,含石量对剪切强度的影响是不同的.在低粘结强度下,剪切强度会随含石量的增加而增加;但在高粘结强度下,当含石量较低时剪切强度会随含石量的增加而增加,而当含石量较高时剪切强度却会随含石量的增加而降低.这主要是由于在低含石量下,土石混合物中土体充分填充块石间的空隙,而土体的粘结作用会提高其剪切强度;在高含石量下,块石含量逐渐增加,块石间逐渐形成骨架,而粘结强度对其剪切强度所增加的数值变得越来越小.对于纯块石材料($\gamma = 100\%$),由于块石间无粘结作用,因此其不受粘结强度的影响.

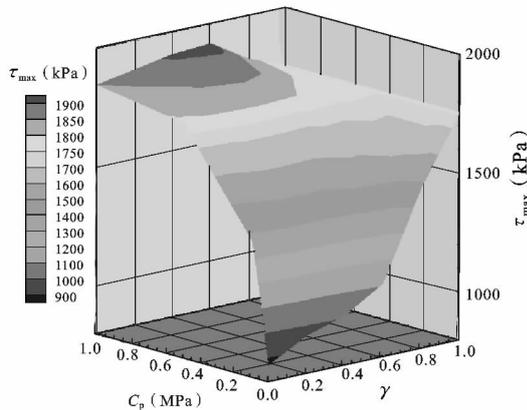


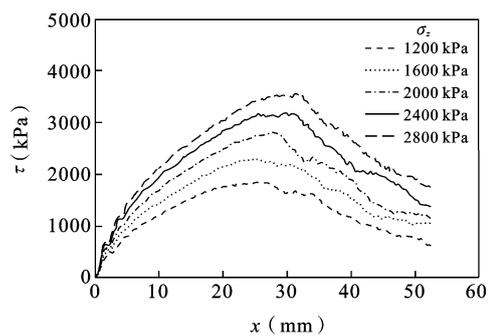
图 9 不同粘结强度和含石量下剪切强度的分布
Fig. 9 Distribution of shear strength under different cohesive strengths and rock contents

4 土石混合物宏观剪切强度参数分析

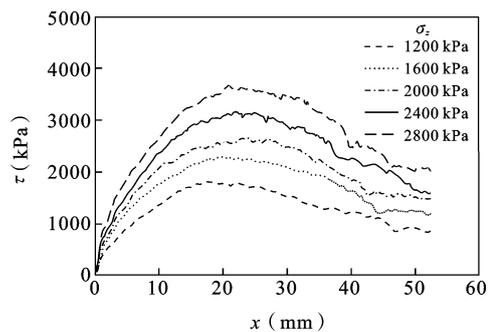
法向力对土石混合体的剪切强度有直接的影响.法向作用力越大,颗粒间结合地越紧密,相互咬合也就越明显,进而导致土石混合体的剪切强度增加.通过不同法向力下的直剪试验可对土石混合体的剪切强度参数进行确定.

下面采用两个典型含石量($\gamma = 20\%$ 和 60%)的土石混合物试样研究其在法向力下的变化情况,其中土体颗粒的粘结强度设为 $C_p = 0.5 \text{ MPa}$.当含石量 $\gamma = 20\%$ 时,在不同法向力下得到的剪切应力如图 10(a)所示.由于试样中土颗粒含量较高,颗粒之

间的空隙较小,土石混合物表现的就是“土性”,块石在内部作用较微弱.在不同法向力作用下,颗粒间有不同程度的挤压效应,从而表现出不同的抗剪特性.土石混合体的抗剪强度峰值随法向力的增加而增加.当含石量 $\gamma = 60\%$ 时计算得到的剪切应力如图 10(b)所示.此时,块石起到骨架作用,块石之间相互咬合.但在不同法向力作用下,块石间的咬合程度是不同的.在低法向力下,颗粒间没有明显的挤压效应,减弱了颗粒间的咬合效应.随着法向力的增加,块石颗粒间接触充分,咬合紧密,试样的剪切强度也显著增大.



(a) 含石量 20%
(a) Rock content 20%



(b) 含石量 60%
(b) Rock content 60%

图 10 不同法向应力作用下的剪切应力-位移曲线
Fig. 10 Shear stress-displacement curves under different normal stresses

通过土石混合物剪切强度与剪切面处法向应力的对应关系,依据摩尔-库伦准则可确定相应的粘聚力 c 和内摩擦角 φ .在不同法向应力和含石量下得到的剪切强度如图 11 所示.这里斜率为内摩擦角的正切值,即 $\tan\varphi$,常数项即为粘聚力 c .由此确定不同含石量下的粘聚力 c 和内摩擦角 f 如图 12 所示.可以看到,随着含石量的增加,粘聚力不断下降.

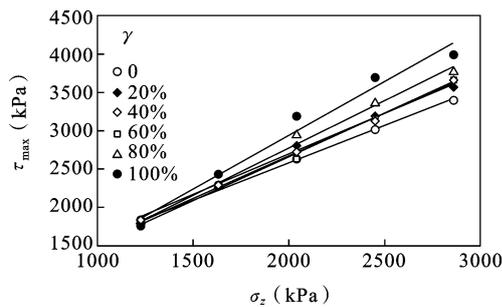
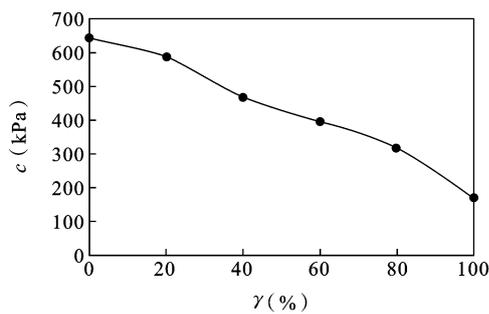


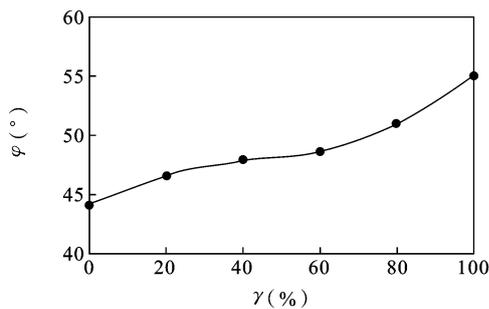
图 11 不同含石量下法向应力与剪切强度的关系

Fig. 11 Relationship between normal stress and shear strength under different rock contents



(a) 含石量与粘聚力的关系

(a) Relationship between rock content and cohesion



(b) 含石量与内摩擦角的关系

(b) Relationship between rock content and internal friction angle

图 12 不同含石量下的剪切强度参数

Fig. 12 Shear strength parameters under different rock contents

这主要是因为土石混合体粘聚力在很大程度上取决于土体颗粒之间以及土体与块石颗粒之间的粘合作用。

在含石量增加过程中,土体颗粒含量相对减小,从而使颗粒间的粘聚力不断降低.在纯块石条件下,即 $\gamma=100\%$ 时,粘聚力主要由块石间的咬合作用产生.此外,内摩擦角随着含石量的增加而不断增大.

当含石量小于 60% 时,土颗粒充分填充块石间的空隙,但是土颗粒的抗剪强度较弱,削弱了整体的抗剪强度,使得内摩擦角较小且增长缓慢;当含石量大于 60% 时,块石之间相互咬合密切,内摩擦角随着含石量的增加而迅速增大.由此可见,在含石量较低的情况下,土石混合体表现出的抗剪特性接近于土体,而在高含石量下则接近于岩石.以上计算规律与土石混合体材料力学特性的原位试验结果相一致^[12-14].

5 结语

土石混合体是土体与块石按不同比例构成的复杂地质体材料,其成分复杂、颗粒尺度离散性大,变形破坏等力学行为不同于一般的土体或岩石,具有高度的非均匀性、非连续性和非线性力学性质.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分析,用球体单元模拟土体颗粒,用非规则组合颗粒单元模拟块石颗粒,并考虑了土体颗粒的粘合作用.通过对不同含石量、土体颗粒粘结强度下的直剪模拟,探讨了土石混合体材料剪切强度及变形机制,确定了其宏观尺度下的内摩擦角和粘聚力.

土石混合体的剪切强度随土体粘结强度的增加而增大.当土体颗粒的粘结强度较低时,土石混合体的剪切强度随着含石量的增加而显著增加;当粘结强度较高时,含石量的影响不再明显.在低含石量下,土石混合体的剪切强度较低,更多表现出“土性”;而当含石量较高时块石间相互咬合,其更多表现为“岩性”.土石混合体的粘聚力随含石量的增加而降低,内摩擦角随含石量的增加而增大.

通过对土石混合体直剪试验的离散元分析,有助于揭示其变形和强度特性的内在机理,分析含石量、土体粘结强度等不同参数的影响.在本文工作基础上将进一步考虑块石几何形态和尺寸、初始排列等条件,并对剪切过程中颗粒运动规律和力链结构等细观参量进行探讨,在土石混合体材料细观尺度分析的基础上更全面地研究其宏观力学特征.

参考文献

[1] 丁秀丽,李耀旭,王新.基于数字图像的土石混合体力学性质的颗粒流模拟[J].岩石力学与工程学报,2010,29(3):477-484. (Ding X L, Li Y X, Wang X. Particle flow modeling mechanical properties of soil

- and rock mixtures based on digital image[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3):477-484. (in Chinese))
- [2] 廖秋林, 李晓, 郝钊, 王思敬, 吴民硕, 赫建明. 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 Q L, Li X, Hao Z, Wang S J, Wu M S, He J M. 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))
- [3] 徐文杰, 胡瑞林, 岳中琦, 张瑞, 王国良. 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):996-1007. (Xu W J, Hu R L, Yue Z Q, Zhang R, Wang G L. 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):996-1007. (in Chinese))
- [4] 李世海, 李晓, 刘晓宇. 工程地质力学及其应用中的若干问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6):1125-1140. (Li S H, Li X, Liu X Y. Some issues in engineering geomechanics and its applications[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 25(6):1125-1140. (in Chinese))
- [5] 殷跃平, 张加桂, 陈宝荪, 等. 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 Y P, Zhang J G, Chen B S, et al. Formation mechanism of large-scale loose sediment at the relocation sites of Wushan County in the Three Gorges [J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(3):265-271. (in Chinese))
- [6] 油新华, 汤劲松. 土石混合体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 X H, Tang J S. 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))
- [7] 蒋明镜, 王富周, 朱合华. 单粒组密砂剪切带的直剪试验离散元数值分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(1):253-298. (Jiang M J, Wang F Z, Zhu H H. Shear band formation in ideal dense sand in direct shear test by discrete element analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1):253-298. (in Chinese))
- [8] Liu S H. Simulating a direct shear box test by DEM [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43:155-168.
- [9] 魏厚振, 汪稔, 胡明鉴, 赵海英, 徐学勇, 蒋家沟砾石土不同粗粒含量直剪强度特征[J]. 岩土力学, 2008, 29(1):48-51. (Wei H Z, Wang R, Hu M J, Zhao H Y, Xu X Y. Strength behaviour of gravelly soil with different coarse-grained contents in Jiangjiagou Ravine [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1):48-51. (in Chinese))
- [10] 贾学明, 柴贺军, 郑颖人. 土石混合料大型直剪试验的颗粒离散元细观力学模拟研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9):2695-2703. (Jia X M, Chai H J, Zheng Y R. Mesomechanics research of large direct shear test on soil and rock aggregate mixture with particle flow code simulation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9):2695-2703. (in Chinese))
- [11] 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 Y, Chai H J. 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))
- [12] 李维树, 丁秀丽, 邬爱清, 熊诗湖. 蓄水对三峡库区土石混合体直剪强度参数的弱化程度研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(7):1338-1342. (Li W S, Ding X L, Wu A Q, Xiong S H. Shear strength degeneration of soil and rock mixture in Three Gorges Reservoir bank slopes under influence of impounding [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7):1338-1342. (in Chinese))
- [13] 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 G J, Yang C H, Zhang C, Mao H J. 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))
- [14] 李晓, 廖秋林, 郝建明, 陈剑. 土石混合体力学特性的原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12):2377-2384. (Li X, Liao Q L, He J M, Chen J. Study on in-situ test of mechanical characteristics on soil-rock aggregate [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12):2377-2384. (in Chinese))
- [15] 徐文杰, 胡瑞林, 谭儒蛟, 曾如意, 于火青. 虎跳峡龙蟠右岸土石混合体野外试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6):1270-1277. (Xu W J, Hu R L, Tan R J, Zeng R Y, Yu H Q. Study on field test of rock-soil aggregate on right bank of longpan in tiger-lea-

- ping gorge area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1270-1277. (in Chinese))
- [16] 杨冰, 杨军, 常在, 甘厚义, 宋二祥. 土石混合体压缩性的三维颗粒力学研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1645-1650. (Yang B, Yang J, Chang Z, Gan H Y, Song E X. 3-D granular simulation for compressibility of soil-aggregate mixture [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1645-1650. (in Chinese))
- [17] 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 Z H, Li S H, Dai Z S. On the influence factors of mechanical properties for soil-rock mixture [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(1): 61-66. (in Chinese))
- [18] Cho N, Martin C D, Segol D C. Development of a shear zone in brittle rock subjected to direct shear[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2008, 45: 1335-1346.
- [19] Ahad B K, Mirghasemi A A. Numerical and experimental direct shear tests for coarse-grained soils [J]. Particology, 2009, 7: 83-91.
- [20] 张桂民, 李银平, 杨春和, 王李娟, 杨长来. 岩石直剪峰后曲线与抗剪强度参数关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 2981-2988. (Zhang G M, Li Y P, Yang C H, Wang L Y, Yang C L. Discussion on relationship between post-peak curves and shear strength parameters of rocks subjected to direct shear tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 2981-2988. (in Chinese))
- [21] Chu L M, Yin J H. Comparison of interface shear strength of soil nails measured by both direct shear box tests [J]. Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, 2005, 131: 1097-1107.
- [22] 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 Q, Liu Z H, Li X, Li J H. 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))
- [23] 徐文杰, 王永刚. 土石混合体细观结构渗流数值试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(4): 542-550. (Xu W J, Wang Y G. Meso-structural permeability of S-RM based on numerical tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(4): 542-550. (in Chinese))
- [24] 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 S H, Wang Y N. 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))
- [25] Potyondya D O, Cundall P A. A bonded-particle model for rock [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41: 1329-1364.
- [26] Lu M, McDowell G R. The importance of modeling ballast particle shape in the discrete element method [J]. Granular Matter, 2007, 9: 69-80.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Ramirez R, Poschel T, Brilliantov N V, et al. Coefficient of restitution of colliding visco-elastic sphere [J]. Physical Review E, 1999, 60(4): 4465-4472.
- [30] 徐文杰, 胡瑞林, 岳中琦. 土-石混合体随机细观结构生成系统的研发及其细观结构力学数值试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1652-1665. (Xu W J, Hu R L, Yue Z Q. Development of random mesostructure generating system of soil-rock mixture and study of Its mesostructural mechanics based on numerical test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1652-1665. (in Chinese))
- [31] 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, 36(4): 50-56. (Xu W J, Hu R L. Conception, classification and significations of soil-rock mixture [J]. Hydrogeology And Engineering Geology, 2009, 36(4): 50-56. (in Chinese))
- [32] 徐肖峰, 魏厚振, 孟庆山, 韦昌富, 艾东海. 直剪剪切速率对粗粒土强度与变形特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 728-733. (Xu X F, Wei H Z, Meng Q S, Wei C F, Ai D H. Effects of shear rate on shear strength and deformation characteristics of coarse-grained soils in large-scale direct shear tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 728-733. (in Chinese))

ANALYSIS OF DIRECT SHEAR TEST OF SOIL-ROCK MIXTURE BASED ON DISCRETE ELEMENT MODEL

Jinfeng Zhao¹ Ying Yan² Shunying Ji¹

⁽¹⁾ *State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian, 116023*

⁽²⁾ *Dalian Jiaotong University, School of civil and Safety Engineering, Dalian, 116028*

Abstract Soil-rock mixture is a special engineering geological material, which is composed of rock with high strength and soil with low strength, whose mechanical characteristics can be directly investigated by direct shear tests. In this paper, we adopted spherical elements to represent soil material, and irregular overlapped clumps to represent the rock rubble with Discrete Element Model (DEM). The shear strength of soil-rock mixture was obtained from direct shear tests based on DEM simulation with different rock contents and inter-element bonding strengths of soil particles. The results showed that the shear strength of soil-rock mixture increases with the increase of either the rock content or the bonding strength. Moreover, the internal friction angle and the cohesive strength of soil-rock mixture were determined by DEM simulation with various rock contents. The above results are beneficial to reveal the shear strength of soil-rock mixture.

Key words soil-rock mixture, direct shear test, discrete element model (DEM), rock content, internal friction angle, cohesive strength