

DOI: 10.7511/jslx20161101003

脆性土石混合体单轴压缩特性的影响因素研究

冯春^{*1,2}, 李志刚^{1,2,3}, 李世海^{1,2}

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190;
3. 北京市路政局道路建设工程项目管理中心, 北京 100031)

摘要: 土石混合体在我国分布广泛且力学性质差异极大, 研究其单轴压缩特性的影响因素至关重要。借助量纲分析, 阐明了土石混合体单轴压缩特性与各影响因素间的无量纲关系。提出了一种块石随机生成技术, 可产生指定级配的随机块石系统。借助连续-非连续数值模拟方法 CDEM (Continuum Discontinuum Element Method), 探讨了具有一定结构性的脆性土石混合体材料的宏观力学特性及其影响规律, 并重点分析了该类土石混合体的含石量、土石交界面强度与其宏观本构曲线、单轴抗压强度以及破坏模式的对应关系。研究结果表明, 随着含石量的增加, 脆性土石混合体的宏观单轴抗压强度迅速减小, 含石量超过 15% 之后, 单轴抗压强度基本不变。相同含石量及块石分布的情况下, 随着交界面比强度的增大, 宏观单轴抗压强度逐渐增大; 当交界面比强度大于 20 时, 单轴抗压强度基本不变; 当交界面比强度小于 1 时, 主要出现贯穿整个试样的裂缝; 当交界面比强度大于 1 时, 主要在试样中上部出现局部的压剪破碎。

关键词: 土石混合体; 单轴抗压强度; 含石量; 交界面强度; 破坏模式

中图分类号: O346.1⁺¹

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2018)03-0356-08

1 引言

土石混合体^[1-2]是介于土体与块石之间的复杂地质材料。有的土石混合体表现出散体特征, 土体间或土石间没有胶结强度; 有的土石混合体因土体的强塑性表现出了一定的延性特征; 而一些结构性较强的土石混合体, 则表现出了一定的脆性特征。土石混合体细观结构及物质组成的复杂性, 是导致其宏观力学性质存在巨大差异的最根本原因。

数值模拟是研究土石混合体细观结构与宏观力学性质对应关系的有效手段。大量学者利用有限元法 (FEM)、有限差分法 (FDM) 及离散元法 (DEM) 等对土石混合体的物理力学特性、渗透特性、变形行为及破坏机制进行了较系统的研究, 取得了丰硕的研究成果。如杨冰等^[3]利用 PFC 程序, 研究了不同含石量下土石混合体的侧限压缩模量以及压缩后的孔隙率; 油新华^[4]采用 FLAC^{3D} 分析了块石在土石混合体中的力学效应, 发现块石形状和分布对土石混合体的变形破坏起着控制作用; 赫建明等^[5]采用颗粒离散单元法 PFC 对比了不同

含石量土石混合体的力学特性, 发现随着含石量的提高, 试样的抗剪强度有明显提高; 李世海等^[6]利用自主开发的离散元程序对特定的土石混合体试样进行了单轴压缩模拟, 得到了土石混合体内部应力场的分布与含石量及块石分布的关系; 徐文杰等^[7]分别采用数字图像处理及随机生成技术生成了土石混合体真实结构模型, 并进行了一系列的数值试验研究; Bagherzadeh-Khalkhali 等^[8]采用离散元程序研究了粗粒土的力学特性, 发现颗粒尺寸对粗粒土的抗剪强度有重要影响; Lee 等^[9]采用多面体单元, 对粒状土的三轴压缩试验进行了仿真计算; Kristensson 等^[10]采用有限元方法对含有块石的砂土进行了细观力学数值计算, 发现块石形状对其宏观力学特性影响不大; Mollon 等^[11]基于傅里叶描述因子和 Voronoi 棋盘划分法生成了任意形状的二维颗粒材料模型, 并利用离散元法对其进行了细观力学的数值试验研究。

总体而言, 国内外的专家学者对土石混合体的单轴及三轴实验进行了大量的数值分析, 并建立了含石量和块石形状等因素与其抗压强度的对应关系。然而, 关于土石交界面胶结强度对土石混合体宏观强度的影响规律研究却较少, 徐文杰等^[12]将土体视为理想弹塑性体, 利用有限元程序初步探讨了土石界面胶结及未胶结两种情况下, 土石混合体

收稿日期: 2016-11-01; 修改稿收到日期: 2017-04-22.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (11302230, 11302229) 资助项目.

作者简介: 冯春* (1982-), 男, 硕士, 高级工程师
(E-mail: fengchun@imech. ac. cn).

的破裂特征及峰值强度,发现胶结后土石混合体的峰值强度有明显提高。王宇等^[13]采用 RFA 探讨了含石量和土石界面强度等对脆性土石混合体峰值强度的影响,结果表明,土体的峰值强度远高于土石混合体的峰值强度;随着含石量的增加,土石体的峰值强度逐渐减小;相同含石量下,随着土石交界面强度的增加,土石混合体的峰值强度并非逐渐增加,而是呈现出来回波动的现象。高玮等^[14]通过三轴实验研究了胶结强度对土石混合体宏观特性的影响,结果表明,随着胶结强度的增加,土石混合体的峰值强度逐渐增大;胶结程度越高,土石混合体越容易出现应变软化和剪胀现象。

本文采用连续-非连续单元方法 CDEM 及块石随机生成技术,重点探讨具有一定结构性的脆性土石混合体中,土与块石的交界面强度及块石含量对土石混合体宏观力学性能的影响。鉴于 CDEM 模拟土石混合体的计算精度及可靠性已经在文献^[15]中进行了论述,本文不再赘述。

2 量纲分析

土石混合体是由土体、块石、孔隙以及交界面等组成的复杂地质体,其细观结构和组分将直接影响材料的宏观强度。鉴于土石混合体宏观特性内在关系的复杂性,需要借助量纲分析,厘清因果关系,明确主控参数。

量纲分析时,将土石混合体简化为由土体、块石及土石界面三部分组成。研究该问题所需的表征量列入表 1~表 5。

表 1 土体参数

Tab.1 Parameters of soil

变量	弹性模量	泊松比	内摩擦角	粘聚力	单轴抗压强度
符号	E_s	ν_s	φ_s	c_s	σ_s
量纲	$ML^{-1}T^{-2}$	1	1	$ML^{-1}T^{-2}$	$ML^{-1}T^{-2}$

表 2 块石参数

Tab.2 Parameters of rock

变量	弹性模量	泊松比	内摩擦角	粘聚力	单轴抗压强度
符号	E_r	ν_r	φ_r	c_r	σ_r
量纲	$ML^{-1}T^{-2}$	1	1	$ML^{-1}T^{-2}$	$ML^{-1}T^{-2}$

表 3 土石界面参数

Tab.3 Parameters of interface between rock and soil

变量	粘聚力	内摩擦角	抗拉强度
符号	c_i	φ_i	T_i
量纲	$ML^{-1}T^{-2}$	1	$ML^{-1}T^{-2}$

表 4 几何参数

Tab.4 Geometrical parameters

变量	试样高度	试样半径	块石半径	含石量
符号	h	R	r	γ
量纲	L	L	L	1

表 5 待求物理量

Tab.5 Physical quantities for analysis

变量	土石混合体的单轴抗压强度
符号	σ_c
量纲	$ML^{-1}T^{-2}$

取土体的单轴抗压强度 σ_s 和土石混合体的试样高度 h 为基本物理量,可构成无量纲因变量为 σ_c/σ_s 。通过变换,可得主要的无量纲自变量有 $E_r/E_s, \nu_r, \nu_s, \varphi_r, \varphi_s, \varphi_i, c_i/c_s, T_i/c_i, \gamma, r/h$ 和 R/h 。

块石及土体是土石混合体的两个重要组成部分,其自身的弹性参数及强度参数对土石体宏观强度的影响规律较为明确,也已开展了大量的研究。因此,本文将重点探讨含石量和土石交界面的无量纲粘聚力(比强度)对土石混合体单轴抗压强度的影响。无量纲公式可简化为

$$\sigma_c/\sigma_s = f(\gamma, c_i/c_s) \quad (1)$$

该无量纲公式中的因变量为土石混合体的单轴抗压强度与纯土体单轴抗压强度的比值,采用该无量纲量可清晰反映出土石混合体的综合强度相较于纯土体的变化规律。

3 数值算法、模型、本构及参数

3.1 CDEM 概述

连续-非连续单元方法^[16-18]CDEM(Continuum Discontinuum Element Method)是一种有限元与离散元耦合的显式数值分析方法,主要用于岩土等材料渐进破坏过程的模拟。该方法的特点是,在模拟材料弹塑性变形的同时,可以模拟显式裂缝在材料中的萌生、扩展及贯通过程。

CDEM 的数值模型由块体及界面两部分构成。块体由一个或多个有限元单元组成,用于表征材料的弹性、塑性以及损伤等连续特征;两个块体间的公共边界即为界面,用于表征材料的断裂、滑移和碰撞等非连续特征。CDEM 中的界面包含真实界面及虚拟界面两个概念,真实界面用于表征材料的交界面、断层和节理等真实的不连续面,其强度参数与真实界面的参数一致;虚拟界面主要有两个作用,一是连接两个块体,用于传递力学信息,二是为显式裂纹的扩展提供潜在的通道(即裂纹可沿

着任意一个虚拟界面进行扩展)。

CDEM 中数值模型的示意图如图 1 所示, 该示意模型共包含 8 个块体, 其中有 1 个块体由 3 个三角形单元组成, 1 个块体由 2 个三角形单元组成, 其余的 6 个块体均由 1 个三角形单元组成; 此外, 图 1 (c) 的浅灰色线为真实界面, 黑色线为虚拟界面。

CDEM 采用基于增量方式的显式欧拉前差法进行动力问题的求解, 在每一时步包含有限元的求解及离散元的求解两个步骤, 整个计算过程通过不平衡率表征系统受力的平衡程度。

3.2 块石随机生成技术

目前土石混合体细观结构模型的生成方法主要有 2 种。(1) 采用蒙特卡罗法利用计算机随机生成土石混合体的细观结构模型; (2) 利用数字图像处理技术建立土石混合体的细观结构模型。本文采用前一种方法, 在 CDEM 软件架构的基础上, 编制了 C++ 程序, 实现了土石混合体的块石随机生成算法。

块石随机生成算法的基本步骤为, 首先建立均质材料模型, 并划分好网格, 然后在模型内部随机撒入设定半径的圆域; 若模型中某单元的任意节点落入圆内, 则设定此单元的材料属性为块石, 否则为土体。基于上述方法形成的模型可保证块石的边界不会过于圆滑, 与实际情况更为接近。该算法创建土石混合体数值模型的示意图如图 2 所示。

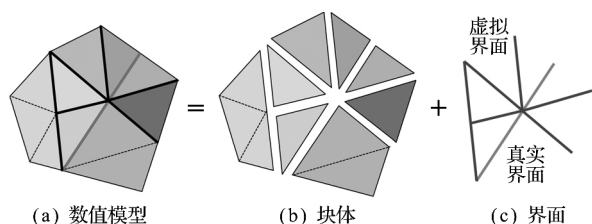


图 1 CDEM 中的数值模型构成
Fig. 1 Composition of numerical model in CDEM

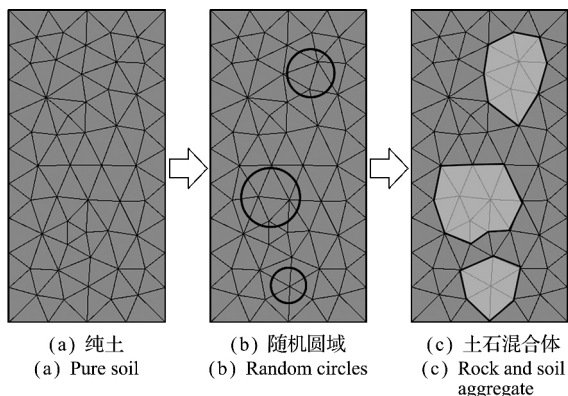


图 2 土石混合体的创建过程
Fig. 2 Generating process of RSA model

本文定义所有块石面积(或体积)之和与模型总面积(或体积)之比为块石含量, 即体积含石量(可根据密度计算质量含石量)。在块石随机生成程序中, 定义了一个含石量控制变量, 通过调整该变量即可获得不同的体积含石量; 此外, 还定义了随机圆域间最小距离的控制变量, 通过调整该变量可以获得不同块石分散程度的土石混合体。

3.3 数值模型

二维土石混合体的数值模型如图 3 所示(模型宽 10 cm, 高 20 cm), 图中深灰色部分为块石(尺寸约为 1 cm~2 cm), 浅灰色部分为土体。计算过程中, 首先在底端施加位移全约束, 让土石混合体在自重作用下弹性计算稳定; 然后, 在试样顶端施加竖直向下的准静态速度荷载, 进行单轴压缩直至试样破坏。进一步分析含石量以及土石交界面强度对土石混合体单轴压缩力学特性的影响。

3.4 材料本构及参数

数值计算时, 单元采用线弹性模型, 单元间的虚拟界面采用 Mohr-Coulomb 脆性断裂模型及最大拉应力脆性断裂模型, 即土石混合体的弹性变形由单元体现, 而破裂特征由单元间的虚拟界面体现。其中, 土体单元间的虚拟界面采用土体的强度参数, 块石单元间的虚拟界面采用块石的参数, 在土体单元与块石单元的真实交界面上采用土石交界面的参数。

有限元单元弹性应力及节点力的计算公式为

$$\begin{cases} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_i = \mathbf{B}_i \Delta \mathbf{u}_e \\ \Delta \boldsymbol{\sigma}_i = \mathbf{D} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_i \\ \boldsymbol{\sigma}_i^n = \boldsymbol{\sigma}_i^o + \Delta \boldsymbol{\sigma}_i \\ \mathbf{F}_e = \sum_{i=1}^N \mathbf{B}_i^T \boldsymbol{\sigma}_i^n \omega_i J_i \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{B}_i, \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_i, \Delta \boldsymbol{\sigma}_i, \omega_i$ 和 J_i 分别为高斯点 i 的应变矩阵、增量应变向量、增量应力向量、积分系数及雅克比行列式; $\boldsymbol{\sigma}_i^n$ 和 $\boldsymbol{\sigma}_i^o$ 为高斯点 i 当前时刻及上一时刻的应力向量; $\mathbf{D}, \Delta \mathbf{u}_e$ 和 \mathbf{F}_e 分别表示单元的

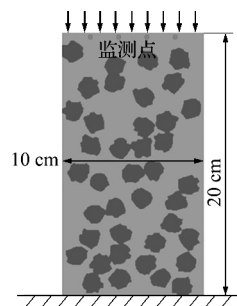


图 3 土石混合体数值模型
Fig. 3 Numerical model of RSA

弹性矩阵、节点增量位移向量及节点力向量; N 表示高斯点个数。

单元交界面上弹性接触力的计算公式为

$$\begin{cases} F_n(t + \Delta t) = F_n(t) - K_n \times \Delta d_n \\ F_s(t + \Delta t) = F_s(t) - K_s \times \Delta d_s \end{cases} \quad (3)$$

式中 F_n 和 F_s 为法向和切向接触力, K_n 和 K_s 为法向和切向接触刚度, Δd_n 和 Δd_s 为法向和切向相对位移增量。

单元交界面上基于 Mohr-Coulomb 准则及最大拉应力准则的接触力修正公式为

$$\begin{cases} (1) \text{ If } -F_n \geq T \cdot A & F_n = F_s = 0 \\ & \text{next step } c = 0, T = 0 \\ (2) \text{ If } F_s \geq F_n \times \tan(\phi) + c \cdot A & \\ & F_s = F_n \times \tan(\phi) + c \cdot A \\ & \text{next step } c = 0, T = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 T 为当前时步的抗拉强度, c 为当前时步的粘聚力, ϕ 为内摩擦角, A 表示接触面积。

对文献[5,12,19]采用的土石混合体参数进行总结分析,得出本文数值计算所采用的材料参数列入表6(土石界面的抗拉强度与粘聚力取值一致)。当分析含石量的影响时,土石混合体均采用表6的材料参数;当分析土石交界面强度的影响时,仅把土石混合体的交界面参数改为设定值,其他材料参数保持不变。

根据无量纲公式(1),本文土石交界面强度的改变主要通过改变交界面的粘聚力实现。进行土石交界面强度影响规律的分析时,交界面的粘聚力共取6组值,分别为0 kPa,5 kPa,10 kPa,50 kPa,1 MPa 以及 2 MPa。

4 数值结果分析

4.1 含石量对宏观本构曲线的影响

设计了含石量分别为 16.7% 和 33.7% 的土石混合体以及纯土(含石量为 0%) 3 种数值模型。为了保证将含石量作为唯一变量来研究,土石混合体取相同的土石交界面强度(粘聚力及抗拉强度为 10 kPa,内摩擦角为 15°)。统计土石混合体顶端的轴向平均应力以及整体的轴向平均应变,得出土石

表6 数值计算材料参数

Tab.6 Parameters for numerical simulation

材料	弹性模量/GPa	泊松比	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)
土	0.04	0.35	0.05	25
块石	10	0.25	2	40
土石界面	-	-	0.01	15

混合体的轴向应力应变曲线如图4所示(图中 γ 为含石量)。可以看出,

(1) 纯土体的峰值强度远大于土石混合体的峰值强度,含石量对土石混合体的峰值强度影响不大。由于土石混合体中土体及块石的材料性质差异极大,导致土石混合体内部应力场及强度场的分布极不均匀,土石交界面以及土体内部率先产生破裂,从而导致峰值强度降低。单轴压缩过程中,块石的骨架结构承担了主要载荷,是应力传递的主体;在轴向压力的作用下,未胶结的骨架结构容易发生失稳并带动其附近的土体变形或破坏,这是导致土石混合体试样整体单轴抗压强度降低的主要原因。上述结论与廖秋林等^[20]土石混合体单轴试验的结果基本一致。

(2) 峰值过后土体表现出脆性破坏,而土石混合体却存在较长的软化段。由于土石混合体中块石与土体的弹性模量及强度差异极大,导致土石混合体内部应力场及强度场极度不均匀,并最终导致土石混合体的破坏演化呈现渐进特性。而纯土体内部的弹性模量及强度处处一致,不同位置达到临界强度的时间基本一致,因此表现出很强的脆性特征。

(3) 土石混合体的残余强度明显大于土体的残余强度。由于残余强度主要由摩擦来提供,土石混合体失稳破坏后,块石之间的咬合作用是导致其宏观摩擦系数增大的主要原因。

需要说明的是,本文基于 Mohr-Coulomb 准则模拟岩土材料的压剪破坏,对于均质岩土体而言,其单轴抗压强度(围压 $\sigma_3 = 0$) 可通过岩土粘聚力及内摩擦角计算获得,为

$$\sigma_1 = 2c \tan(45^\circ + \phi/2) \quad (5)$$

由图4获得的纯土体的单轴抗压强度约为 0.1 MPa, 小于式(5)所计算的理论值 0.16 MPa。分析其原因,由于数值模型底部完全约束,造成了

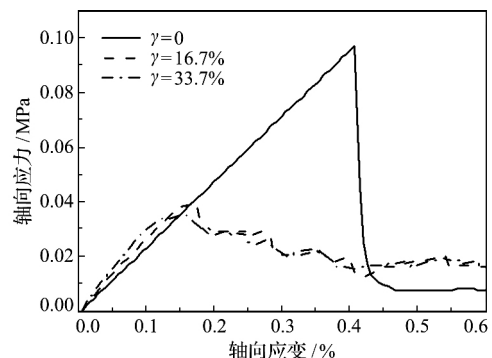


图4 不同含石量下土石混合体的本构曲线

Fig.4 Constitutive curves of RSA with different rock contents

底部边角处的应力集中,且单元与单元的交界面均采用了脆断模型;因此一旦某处出现局部破裂,应力将迅速发生调整及转移,从而诱发周边的土体继续开裂,形成多米诺骨牌式的渐进破坏效应,并最终导致纯土体的单轴抗压强度小于式(5)的理论值。

4.2 含石量对单轴抗压强度及破坏模式的影响

土石混合体的无量纲单轴抗压强度随含石量的变化如图 5 所示。可以看出,土石交界面粘聚力为 0 kPa($c_i/c_s=0$)与 5 kPa($c_i/c_s=0.1$)时的变化规律基本一致,随着含石量的增加,土石混合体强度逐渐降低;含石量由 0% 到 8.54%,单轴抗压强度迅速减小;当含石量大于 8.54% 后,单轴抗压强度的下降趋势变缓。当土石交界面粘聚力为 50 kPa($c_i/c_s=1$)时,相同含石量下的单轴抗压强度有所提高,但随含石量变化的整体规律并未改变。当土石交界面粘聚力很大时($c_i/c_s=40$),土石混合体随含石量的变化规律变得不明显,但此时土石混合体的单轴抗压强度还是略低于纯土的单轴抗压强度,这是因为交界面处土体与块石的变形不匹配产生了应力集中,从而导致土石混合体更容易发生破坏。

含石量为 8.54%,16.7%,24.9% 和 30.4% 的土石混合体单轴压缩破坏形态如图 6 所示。可以看出,低含石量的土石混合体破坏时只产生一条贯

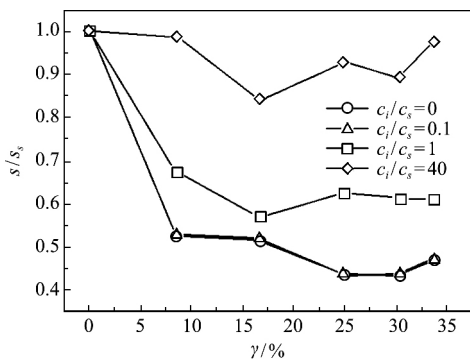


图 5 土石混合体的单轴抗压强度随含石量的变化曲线
Fig. 5 Relationship between uniaxial compressive strength and rock contents

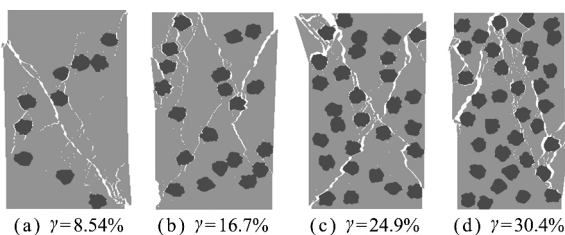


图 6 不同含石量土石混合体的破坏模式
Fig. 6 Failure modes of RSA with different rock contents

穿上下主裂缝;随着含石量的增加,土石混合体最终的破裂面变得多而复杂。

4.3 土石交界面强度对本构曲线、单轴抗压强度及破坏模式的影响

土石混合体中的土石交界面往往是其薄弱环节,土石交界面的强度会对土石混合体的力学特性产生巨大的影响。在保证相同含石量以及块石分布的前提下,本节主要探讨无量纲量 c_i/c_s 对土石混合体单轴抗压强度的影响,其中 c_i 为土石交界面粘聚力, c_s 为土体的粘聚力。 c_i 取值为 0 kPa, 5 kPa, 10 kPa, 50 kPa, 1 MPa 以及 2 MPa; c_s 取值为 50 kPa。由此,无量纲 c_i/c_s 的取值为 0, 0.1, 0.2, 1, 20 和 40。

图 7 为相同计算模型下(含石量 $\gamma=24.9\%$),三种土石交界面强度土石混合体的单轴压缩本构曲线。可以看出,相同土石混合体细观结构下,随着界面强度的提高,土石混合体的单轴抗压强度逐渐增大,但峰后的脆性特征基本不变。

土石混合体的无量纲单轴抗压强度随土石交界面强度的变化规律如图 8 所示。可以看出,随着土石交界面比强度 c_i/c_s 的逐渐增大,单轴抗压强度逐渐增大,但增大趋势逐渐变缓;当比强度达到 20 时,单轴抗压强度基本不变;不同含石量下的变

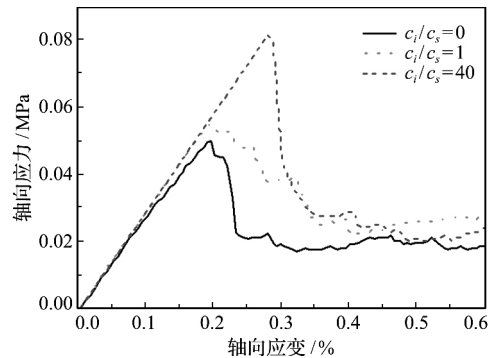


图 7 不同土石交界面强度下的土石混合体本构曲线
Fig. 7 Constitutive curves of RSA under different interface strengths

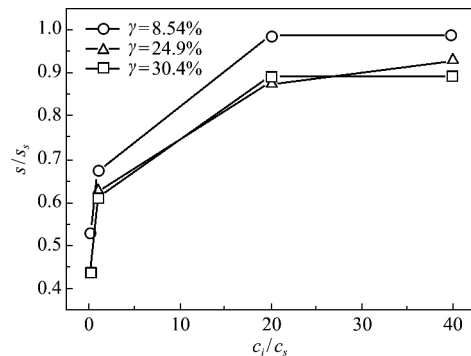


图 8 不同土石交界面强度下的土石混合体单轴抗压强度
Fig. 8 Uniaxial compressive strengths of RSA under different interface strengths

化规律基本一致。

相同的土石混合体细观结构下,不同的土石交界面强度对应的土石混合体最终破坏模式如图9所示。可以看出,当 $c_i/c_s < 1$ 时,土石混合体失稳时的破裂面往往能够贯穿整个试样;当 $c_i/c_s \geq 1$,土石混合体失稳时,破裂面大都分布在试样的上端,产生了局部的破坏。

4.4 土石混合体的失稳破裂机理及过程

土石混合体($\gamma=8.5\%$, $c_i=50$ kPa)在单轴受压破坏过程中的平均剪应力云图如图10所示。可以看出,土石混合体首先在块石周围产生应力集中,裂纹最先在此产生,当载荷达到土体的抗剪强度,土石混合体形成一条贯穿整个试样的宏观裂缝。

单轴压缩过程中,土石混合体($\gamma=16.7\%$, $c_i=50$ kPa)的破裂演化如图11所示,对应的宏观本构曲线如图12所示。图12曲线上的A-F 6个点与图11的6个破裂状态一一对应。

从图11和图12可以看出,土石混合体单轴压缩过程中,首先在土石界面处产生裂纹(图11(a, b)),这是由于土体与块石高度的弹性不匹配导致在土石界面处产生了应力集中;当这些细小裂纹位于剪应力较大的位置时会迅速发展为大裂纹,随后土石混合体发生整体性的失稳(图11(c));随着单轴压缩过程的继续,土石混合体由一条主裂纹发展为多条主裂纹(图11(d~f)),这时土石混合体还会有一定的残余强度,主要由土石混合体之间的咬合作用提供,而咬合作用可以等效为土石混合体的综合摩擦角。

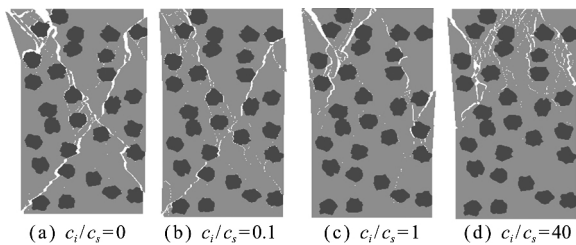


图9 不同土石交界面强度下土石混合体的破坏模式
Fig.9 Failure models of RSA under different interface strengths

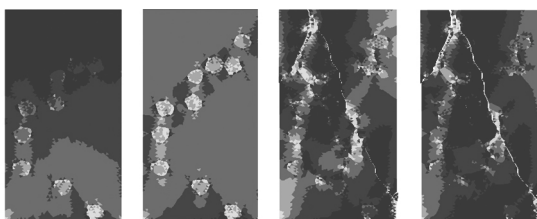


图10 加载过程中的平均剪应力云图
Fig.10 Average shear stress contour under loading

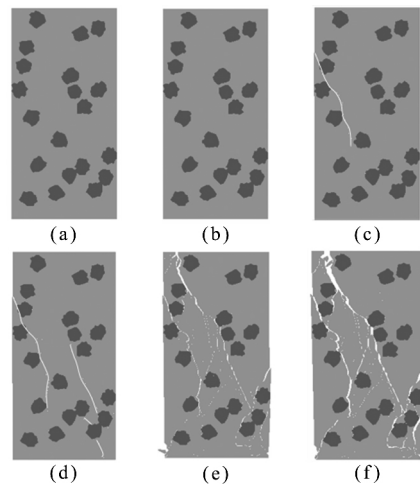


图11 土石混合体的破坏过程
Fig.11 Failure process of RSA

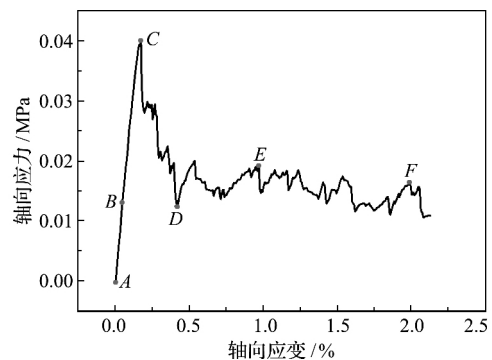


图12 土石混合体的宏观本构曲线及特征点
Fig.12 Constitutive curve and characteristic points of RSA

5 结论

本文基于量纲分析及 CDEM 数值方法,深入分析了具有一定结构性的脆性土石混合体的细观结构对宏观力学特性的影响,并重点探讨了含石量及土石交界面强度对该类脆性土石混合体单轴抗压强度的影响规律。计算结果表明,

(1) 当土石交界面的比强度不大于 1 时,若含石量小于 15%,土石混合体的单轴抗压强度随含石量的增加呈快速下降趋势;若含石量大于 15%,土石混合体的单轴抗压强度基本不变。当土石交界面的比强度较高时(大于 20),若含石量从 0%变化至 35%,单轴抗压强度基本不变。

(2) 相同含石量下,随着土石交界面比强度的逐渐增大,土石混合体的单轴抗压强度迅速增大;当比强度达到 20 后,单轴抗压强度基本不变;当比强度小于 1 时,主要出现贯穿整个试样的裂缝(贯穿性破坏);当比强度大于等于 1 时,主要在试样中上部出现局部的压剪破碎。

(3) 单轴压缩作用下,土石混合体的失稳破坏

机理为,土石两种介质弹性模量的差异导致在土石交界面附近出现应力集中,加之土石交界面强度一般较低,从而诱发土石交界面率先破裂,交界面破裂后应力进行重分布,使得块石间的土体发生剪切断裂,并最终形成贯通性的宏观裂缝。

参考文献(References):

- [1] 廖秋林,李 晓,郝 钊,等.土石混合体的研究现状及研究展望[J].工程地质学报,2006,14(6):800-807. (LIAO Qiu-lin, LI Xiao, HAO Zhao, et al. Current status and future trends of studies on rock and soil aggregates (RSA) [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(6):800-807. (in Chinese))
- [2] 王 宇,李 晓,赫建明,等.土石混合体细观特性研究现状及展望[J].工程地质学报,2014,22(1):112-123. (WANG Yu, LI Xiao, HE Jian-ming, et al. Research status and prospect of rock and soil aggregate [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(1):112-123. (in Chinese))
- [3] 杨 冰,杨 军,常 在,等.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 Bing, YANG Jun, CHANG Zai, et al. 3-D granular simulation for compressibility of soil-aggregate mixture [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(5):1645-1650. (in Chinese))
- [4] 油新华.土石混合体的随机结构模型及其应用研究[D].北京交通大学,2001. (YOU Xin-hua. Stochastic Structural Model of the Earth-Rock Aggregate and Its Application [D]. Beijing Jiaotong University, 2001. (in Chinese))
- [5] 赫建明,李 晓,吴剑波,等.土石混合体材料的模型构建及其数值试验[J].矿冶工程,2009,29(3):1-4,7. (HE Jian-ming, LI Xiao, WU Jian-bo, et al. Modeling method of the rock-soil aggregate and its numerical test [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2009, 29(3):1-4,7. (in Chinese))
- [6] 李世海,汪远年.三维离散元土石混合体随机计算模型及单向加载试验数值模拟[J].岩土工程学报,2004,26(2):172-177. (LI Shi-hai, WANG Yuan-nian. Stochastic model and numerical simulation of uniaxial loading test for rock and soil blending by 3D-DEM[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(2):172-177. (in Chinese))
- [7] 徐文杰,胡瑞林,王艳萍.基于数字图像的非均质岩土材料细观结构 PFC^{2D}模型[J].煤炭学报,2007,32(4):358-362. (XU Wen-jie, HU Rui-lin, WANG Yan-ping. PFC^{2D} model for mesostructure of inhomogeneous geomaterial based on digital image processing [J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(4):358-362. (in Chinese))
- [8] Bagherzadeh-Khalkhali A, Mirghasemi A A. Numerical and experimental direct shear tests for coarse-grained soils[J]. *Particuology*, 2009, 7(1):83-91.
- [9] Lee S J, Hashash Y M A, Nezami E G. Simulation of triaxial compression tests with polyhedral discrete elements[J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, 43:92-100.
- [10] Kristensson O, Ahadi A. Numerical study of localization in soil systems[J]. *Computers and Geotechnics*, 2005, 32(8):600-612.
- [11] Mollon G, Zhao J. Fourier-Voronoi-based generation of realistic samples for discrete modelling of granular materials[J]. *Granular Matter*, 2012, 14(5):621-638.
- [12] 徐文杰,胡瑞林,岳中崎.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 Wen-jie, HU Rui-lin, YUE Zhong-qi. 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))
- [13] 王 宇,李 晓,李守定,等.单轴压缩条件下土石混合体开裂特征研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(s1),3541-3552. (WANG Yu, LI Xiao, LI Shou-ding, et al. Cracking deformation characteristics for rock and soil aggregate under uniaxial compressive test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(s1),3541-3552. (in Chinese))
- [14] 高 玮,胡瑞林.基质胶结对土石混合体强度变形特性影响[J].吉林大学学报(地球科学版),2015,45(4):1164-1172. (GAO Wei, HU Rui-lin. Experimental research on strength characteristics of soil-rock mixture with different matrix bonding [J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2015, 45(4):1164-1172. (in Chinese))
- [15] 范永波,李世海,侯岳峰,等.不同边界条件下土石混合体破坏机制研究[J].水文地质工程地质,2013,40(3):48-51. (FAN Yong-bo, LI Shi-hai, HOU Yue-feng, et al. A study of the failure mechanism of rock and soil associate under different boundary conditions [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2013, 40(3):48-51.
- [16] Li S H, Wang J G, Liu B S, et al. Analysis of critical excavation depth for a jointed rock slope using a face-to-face discrete element method[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2007, 40(4):331-348.

- [17] Wang Y N, Zhao M H, Li S H, et al. Stochastic structural model of rock and soil aggregates by continuum-based discrete element method [J]. *Science in China Series E Engineering & Materials Science*, 2005, **48**(s1): 95-106.
- [18] Feng C, Li S H, Liu X Y, et al. A semi-spring and semi-edge combined contact model in CDEM and its application to analysis of Jiweishan landslide [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2014, **6**(1): 26-35.
- [19] 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 Jin-feng, YAN Ying, JI Shun-ying. 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))
- [20] 廖秋林, 李晓, 李守定. 土石混合体重塑样制备及其压实特征与力学特性分析[J]. *工程地质学报*, 2010, **18**(3): 385-391. (LIAO Qiu-lin, LI Xiao, LI Shou-ding. Sample remodeling, compactness characteristic and mechanical behaviors of rock-soil mixtures [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, **18**(3): 385-391. (in Chinese))

Study on uniaxial compression characteristics of brittle rock and soil aggregate

FENG Chun^{*1,2}, LI Zhi-gang^{1,2,3}, LI Shi-hai^{1,2}

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Roadway Construction Project Management Center of Beijing Municipal Roadway Administration Bureau, Beijing 100031, China)

Abstract: Rock and soil aggregate (RSA) is widely distributed in China and the mechanical properties are extremely different in one place from another, so it is important to study the influencing factors of uniaxial compression. With the help of dimensional analysis, the non-dimensional relationship between the uniaxial compression characteristics of RSA and the influencing factors is clarified. A stochastic generation technique of rock block is proposed, which can produce stochastic block system with specified gradation. With continuum-discontinuum element method (CDEM), the macro mechanical properties and evolution laws of brittle RSA with structural feature is discussed, and the macro constitutive law, uniaxial compressive strength and failure mode of brittle RSA with different rock contents and interface strengths are analyzed. The results show that, with the increment of rock content, the macro uniaxial compressive strength decreases rapidly; however, when rock content exceeds 15%, the uniaxial compressive strength is almost unchanged. With the same rock content and rock distribution, with the increment of interface strength, the macro uniaxial compressive strength increases gradually; when the relative interface strength exceeds 20, the uniaxial strength remains constant. When relative strength of interface is less than 1, the penetrating crack will appear throughout the sample; and when the relative strength is larger than 1, local compressive shear failure will occur near the middle and top of the sample.

Key words: rock and soil aggregate; uniaxial compressive strength; rock content; interface strength; failure mode

引用本文/Cite this paper:

冯春, 李志刚, 李世海. 脆性土石混合体单轴压缩特性的影响因素研究[J]. *计算力学学报*, 2018, **35**(3): 356-363.

FENG Chun, LI Zhi-gang, LI Shi-hai. Study on uniaxial compression characteristics of brittle rock and soil aggregate [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2018, **35**(3): 356-363.