

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.03.010

# 考虑孔隙率和不均匀系数的土石混合体颗粒流分析

王环玲<sup>1</sup>,沙 聪<sup>1</sup>,徐卫亚<sup>2</sup>,孟庆祥<sup>2</sup>

(1.河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098; 2.河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098)

**摘要:**为研究低含石率情况下,由土体主导的土石混合体的力学特性,采用分层欠压和随机生成多边形相结合的建模方法,建立土石混合体颗粒流模型,提出不均匀系数作为衡量土石混合体非均质性的指标。通过室内试验校核了颗粒模型的细观参数,并开展双轴数值模拟试验,研究在低含石率情况下,含石率、土体孔隙率和不均匀系数3个因素对土石混合体力学特性的影响。结果表明:在低含石率情况下,土石混合体的强度受土体孔隙率影响较大,随着土体孔隙率的减小,土石混合体的强度有较大提高;块石的存在破坏了土体的均匀性和连续性,反而在低含石率情况下,随着含石率增大,土石混合体整体强度有微小减小的现象;土石混合体的不均匀系数对体应变影响较大,不均匀系数越大,体应变的膨胀现象越明显。

**关键词:**土石混合体;含石率;孔隙率;不均匀系数;细观结构;颗粒流

中图分类号:TU43 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2019)03-0251-08

## Particle flow analysis of soil-rock mixture considering porosity and heterogeneity

WANG Huanling<sup>1</sup>, SHA Cong<sup>1</sup>, XU Weiya<sup>2</sup>, MENG Qingxiang<sup>2</sup>

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to study the mechanical properties of soil-rock mixtures dominated by the soil under a low rock content, the modeling method combining multi-layer method under compaction and random polygon generating method is adopted to establish the particle flow model of soil-rock mixture, and the inhomogeneous coefficient  $S$  is proposed as an index of the heterogeneity of soil-rock mixture. The mesoscopic parameters of the particle model were checked by a laboratory test, and the numerical simulation of the biaxial test was also carried out, for checking the effects of three factors on the mechanical properties of the soil-rock mixtures under the condition of low stone content, including the rock content, the porosity and the inhomogeneous coefficient  $S$ . In the case of low stone content, the strength of the soil-rock mixture is greatly influenced by the porosity of the soil. With the decrease of the soil porosity, the strength of the soil-rock mixtures is greatly improved. The existence of block stone destroys the uniformity and continuity of the soil. On the contrary, the overall strength of the soil-rock mixture decreases with the increase of the rock content. The inhomogeneous coefficient  $S$  has great influence on bulk strain. The greater the coefficient of heterogeneity is, the more obvious the expansion of volumetric strain is.

**Key words:** soil-rock mixture; rock content; porosity; heterogeneity; meso structure; particle flow

土石混合体是由块石和土体两种力学性质差异较大的物质组成的一种非均质非连续地质体。这种地质体从我国东南沿海地区到中西部地区均有大量分布,由于其特殊的非岩非土的力学特性,给水电工程和交通

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC1501100);国家自然科学基金(11772118,11572110)

作者简介:王环玲(1976—),女,教授,博士,主要从事岩石力学与岩石工程研究。E-mail:wanghuanling@hhu.edu.cn

引用本文:王环玲,沙聪,徐卫亚,等.考虑孔隙率和不均匀系数的土石混合体颗粒流分析[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(3):251-258.

WANG Huanling, SHA Cong, XU Weiya, et al. Particle flow analysis of soil-rock mixture considering porosity and heterogeneity [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(3): 251-258.

工程建设带来了许多问题,研究其力学特性和变形特性具有重要的工程价值和科学意义<sup>[1]</sup>。

从试验角度对土石混合体开展了系列研究,包括单剪试验、直剪试验、三轴试验等。唐建一等<sup>[2]</sup>对含石率 0~80% 的土石混合体试样开展了大型单剪试验,发现当含石率小于 20% 时,细集料在土石混合体中占主导地位,当含石率在 20%~50% 时试样的黏聚力和内摩擦角都随含石率的增大而增大。夏加国等<sup>[3]</sup>对含有超径颗粒的土石混合体试样进行大型三轴试验,认为含石率为 35% 的试样在高围压下,体应变在剪胀和剪缩之间来回变化,且应力-应变曲线呈现锯齿状特征。胡峰等<sup>[4]</sup>利用直剪试验研究了含石率对土石混合体变形破坏特性的影响,得出当含石率达到 50% 时应变受块石影响最大。室内试验和现场原位试验获得了土石混合体在外部荷载作用下的宏观力学响应,为了从细观层面上揭示土石混合体的变形破坏机制,许多学者采用了数值模拟的方法。金磊等<sup>[5]</sup>利用三维离散元模型对不同含石率的土石混合体试样进行了数值三轴试验,发现随着含石率的增大,土石混合体的骨架效应越来越显著。陈立等<sup>[6]</sup>将数值流形法应用于土石混合体的研究,并对不同含石率的试样进行试算,验证了该方法的可行性。

上述研究主要针对含石率 25% 以上的土石混合体在各个因素(如围压,块石分布等)影响下的力学特性。总体上,在较高含石率时,块石对土石混合体的力学特性起主导作用。而在低含石率情况下,块石不起主导作用,此时土石混合体的力学特性既受块石的影响,也受土体性质的影响。在低含石率情况下,各因素对土石混合体的影响规律和作用机制也完全不同,因此,有必要针对低含石情况下,各因素对土石混合体力学特性的影响开展研究。本文分别建立相同尺寸土体颗粒模型和块石模型,再将两者结合得到土石混合体模型,开展数值试验,研究在低含石率情况下试样含石率、非均匀系数和土体孔隙率 3 个因素对土石混合体力学特性的影响。

1 土石混合体模型

利用分层欠压的方法建立土体模型能控制土体的孔隙率,确保土体的均质性,使土石混合体的非均质性和各向异性完全由块石引起。利用 PFC 内嵌 FISH 语言和测量圆功能进行编程,在试样区域内随机生成块石,并对试样区域内块石分布进行统计,得到块石分布的不均匀系数。最后将初始土体模型和块石模型相结合,得到土石混合体颗粒流模型。

1.1 初始土体模型建立

利用分层欠压法将试样分成等高的若干层进行制备,在制样过程中,下层土体会受到上层土体的压实作用,使下层土体的实际孔隙率小于目标孔隙率,采用分层欠压准则(式(1)~(4)),保证每层高度相同且每层孔隙率大于目标孔隙率,使最终制备的试样的孔隙率达到目标孔隙率<sup>[7]</sup>(图 1(a))。

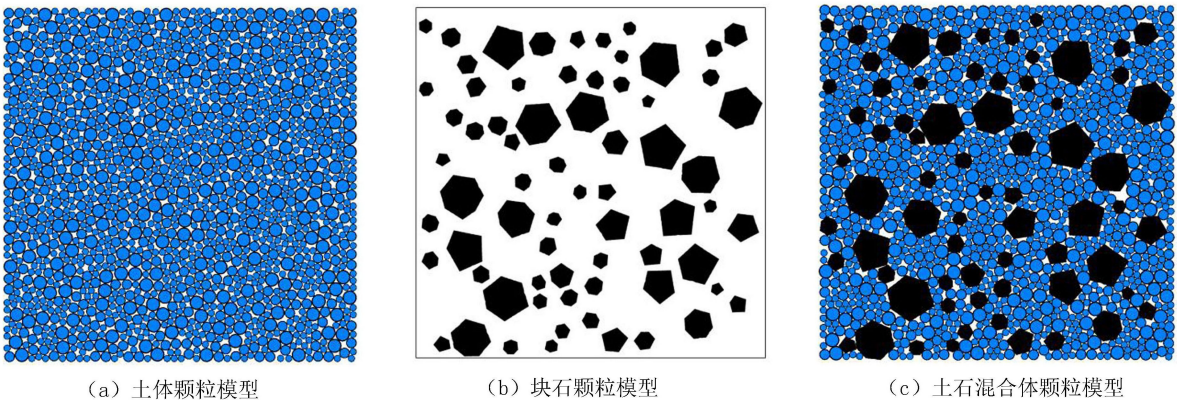


图 1 模型生成示意图  
Fig.1 Model generation diagram

$$U_1 = \frac{n_1(1 - n)}{1 - n_1} - n \tag{1}$$

$$\frac{U_i}{U_1} = 1 - \frac{i - 1}{N - 1} \tag{2}$$

$$\bar{U}_i = \frac{U_i}{i} \tag{3}$$

$$\bar{n}_i = \frac{100n - \bar{U}_i}{\bar{U}_i + 100} \tag{4}$$

式中: $U_1$ ——第 1 层的欠压系数; $n_1$ ——第 1 层孔隙率; $n$ ——初始土体试样的目标孔隙率; $i$ ——分层数编号; $U_i$ ——第  $i$  层的欠压系数; $N$ ——所制备试样总层数; $\bar{U}_i$ ——前  $i$  层的平均欠压系数; $\bar{n}_i$ ——添加第  $i$  层后,前  $i$  层试样的平均孔隙率。

1.2 块石生成和投放

土石混合体中碎块石形状各异,用圆形模拟块石,无法反映碎石的真实形状,为了提高模拟的准确性,采用多边形模拟块石,利用圆内接多边形法生成多边形块体<sup>[8-10]</sup>。

在试样范围内生成随机坐标,以该坐标( $x_i, y_i$ )为圆心, $r_i$ 为半径,按式(5)生成一系列的随机角。

$$\Delta\theta_j = \frac{2\pi}{T} + (2\zeta - 1)\alpha \frac{2\pi}{T} \tag{5}$$

式中: $\Delta\theta_j$ ——第  $j$  个随机角; $j$ ——随机角编号; $T$ ——多边形顶点的个数; $\zeta$ ——0 ~ 1 之间的随机数; $\alpha$ ——角度系数,介于 0 ~ 1 之间。

为了保证所有  $\Delta\theta_j$  之和等于  $2\pi$ ,将  $\Delta\theta_j$  按式(6)进行处理得到  $\Delta\bar{\theta}_j$ :

$$\Delta\bar{\theta}_j = \Delta\theta_j \frac{2\pi}{\sum \Delta\theta_j} \tag{6}$$

由圆心、半径和角度信息,得到碎块石各个顶点坐标:

$$x_k = x_i + r_i \cos \sum_{j=1}^k \Delta\bar{\theta}_j \quad (k = 1, 2, \cdots, T) \tag{7}$$

$$y_k = y_i + r_i \sin \sum_{j=1}^k \Delta\bar{\theta}_j \quad (k = 1, 2, \cdots, T) \tag{8}$$

式中: $x_k$ ——多边形顶点横坐标; $y_k$ ——多边形顶点纵坐标; $k$ ——多边形顶点编号。

生成多边形后,在多边形内部填充颗粒,即可得到块石颗粒流模型,如图 1(b)所示。

1.3 土石混合体非均质性评价方法

假定土体颗粒模型是均质的,土石混合体试样的不均质性完全是由块石引起,利用 PFC 测量圆功能和内嵌的 FISH 语言编程,针对块石模型(图 1(b)),对块石的分布进行统计,孔隙率如下:

$$\eta = 1 - \omega \tag{9}$$

式中: $\eta$ ——块石模型的孔隙率; $\omega$ ——单位面积含石率。

将试样区域平均分成  $H$  行、 $L$  列,在每个小区域内布置测量圆,利用测量圆测得每个测量圆内部的孔隙率  $\eta_{ij}$ ,计算每行的平均孔隙率  $\bar{\eta}_i$ 。

$$\bar{\eta}_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^L \eta_{ij} \tag{10}$$

平均孔隙率的方差由式(11)计算:

$$S = \frac{1}{N - 1} \sum_{i=1}^H (\bar{\eta}_i - \eta)^2 \tag{11}$$

式中: $S$ ——方差,表示每层平均孔隙率和目标孔隙率之间的离散程度, $S$  值越小则块石在  $y$  方向上分布越均匀, $S$  值越大则块石在  $y$  方向上分布越不均匀。因此把方差  $S$  定义为土石混合体的不均匀系数,作为衡量土石混合体不均质性的指标。所有的不均匀系数均四舍五入保留两位有效数字。

1.4 土石混合体模型建模步骤

初始土体模型和块石模型相结合得到土石混合体颗粒流模型,具体步骤如下:(a)将块石模型内的所有多边形的顶点坐标记录并转换到土体颗粒模型中;(b)采用射线法,判断颗粒圆心是否在多边形内部,如果颗粒圆心在多边形内部则删去该颗粒;(c)在多边形内部填充颗粒,并把多边形内部的颗粒设为 clump。最终得到的土石混合体颗粒流模型,如图 1(c)所示。

2 室内试验验证与数值模拟

2.1 室内试验验证

基于试验资料——云南水麻高速公路边坡土石混合体大型剪切试验<sup>[11]</sup>,进行数值模拟试验验证。该处土石混合体具有结构松散、分布不均匀的特征,其中块石最大粒径为40 mm。对土石混合体中的超粒径块石进行等量替代,制成尺寸为600 mm×400 mm×200 mm不同含石率的试样,进行大型剪切试验。本文选取含石率为0、20%和40%的3组试验,利用PFC<sup>2D</sup>进行数值模拟。

数值模拟剪切盒由PFC中的墙体构成,长度为600 mm,高度为200 mm,认为墙体是刚性的,通过剪切盒的上下2个墙体施加法向应力200 kPa,颗粒尺寸介于1.0~3.0 mm之间,服从均匀分布,含石率为20%,颗粒密度为2700 kg/m<sup>3</sup>,按文中所述,试验所用土石混合体具有较大的非均质性,且有些部位孔隙率较大,因此将试样的孔隙率设为0.20,并将不均匀系数定为0.020,确保数值试样与室内试验试样一致。

直剪试验的数值模拟与室内试验过程完全一致。由于试样的含石率很低,且法向应力较小,在剪切过程中难以发生颗粒破碎情况,因此用clump模拟块石,采用线性接触刚度模型和滑移模型模拟土体。为了建立颗粒细观参数与宏观参数之间的直接对应关系,需要进行一系列的数值试验,使得数值试验结果与室内试验相符合,从而得到颗粒的细观参数。根据上述方法,最终确定土体的细观参数:颗粒密度为2700 kg/m<sup>3</sup>、法向刚度为20 MN/m、法切向刚度比为2.0、摩擦因数为1.5。数值试验与室内试验应力-应变曲线对比如图2所示,从图2可以看出,数值试验所反映出来的规律与室内试验相符合,证明了数值方法的可靠性。

2.2 数值试验方案

影响土石混合体力学特性的因素很多,包括含石率,块石空间分布,块石强度、形状、加载方式等。本文研究低含石率情况下土石混合体的力学特性,因此重点考虑土体性质对土石混合体力学特性的影响,同时利用不均匀系数作为衡量试样不均质性的指标。由于含石率较低,并且选取的双轴试验围压较小,因而不考虑块石破碎的情况。

数值试验中,针对含石率与土体孔隙率的研究方案,试样尺寸取为0.2 m×0.4 m,颗粒尺寸采用2.1节所使用的颗粒尺寸,介于1.0~3.0 mm之间,服从均匀分布,根据Medley<sup>[12]</sup>的建议,采用10 mm作为土石分界限,笔者主要考虑低含石率,且当块石粒径较小、数量较多的情况,块石的不均匀系数变化范围较大,采用块石的尺寸为10~20 mm,服从均匀分布,选用线性接触刚度模型和滑移模型。颗粒的细观参数选用2.1节中取得的参数。

在不均匀系数的数值试验方案中,为了排除试样长度与宽度不一致对试验结果的影响,采用方形试样进行数值模拟。已有的研究曾采用方形试样进行颗粒流模拟<sup>[13]</sup>,并与室内试验结果对比,验证了方形试样的可行性。试样尺寸取0.2 m×0.2 m,颗粒尺寸及细观参数与其他2组试验相同。

试验设计土体孔隙率(0.15,0.20,0.25)、含石率(0,10%,15%,20%,25%,30%)和不均系数(0.010,0.015,0.025)3种影响因素,共12组(表1),每组生成3个不同试样,共36个试样,分别在400 kPa围压下进行双轴试验。试验的加载速率为5 mm/s,当轴向应变达到15%时停止试验。

在试样制作过程中,所有初始土体模型分8层生成、块石模型采用10行10列的测量圆分布。

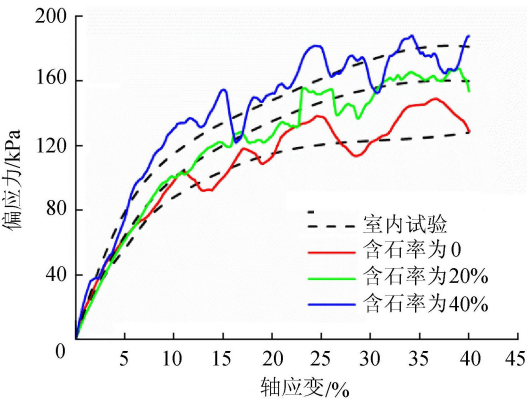


图2 室内试验和PFC模拟结果对比

Fig.2 Comparison of stress-strain curves between the laboratory test and the PFC simulation

表1 试验方案

Table 1 Testing program

| 试样编号 | 含石率/% | S     | n    |
|------|-------|-------|------|
| B1   | 0     |       | 0.20 |
| B2   | 10    | 0.015 | 0.20 |
| B3   | 15    | 0.015 | 0.20 |
| B4   | 20    | 0.015 | 0.20 |
| B5   | 25    | 0.015 | 0.20 |
| B6   | 30    | 0.015 | 0.20 |
| R1   | 20    | 0.010 | 0.20 |
| R2   | 20    | 0.015 | 0.20 |
| R3   | 20    | 0.025 | 0.20 |
| L1   | 20    | 0.015 | 0.15 |
| L2   | 20    | 0.015 | 0.20 |
| L3   | 20    | 0.015 | 0.25 |

3 试验结果与分析

3.1 不同含石率模拟结果

图 3 为不同含石率试样模拟结果曲线,可以看出,此时含石率对土石混合体强度特性的影响规律与中高含石率情况下有显著差异。当含石率从 0 逐渐增加到 15% 时,试样的强度和初始弹性模量不断减小。当含石率从 20% 增加到 30% ,试样的强度和初始弹性模量又随着含石率的增大而增大。当含石率达到 30% 时,土石混合体的初始弹性模量和强度与含石率为 0 的纯土体十分接近。

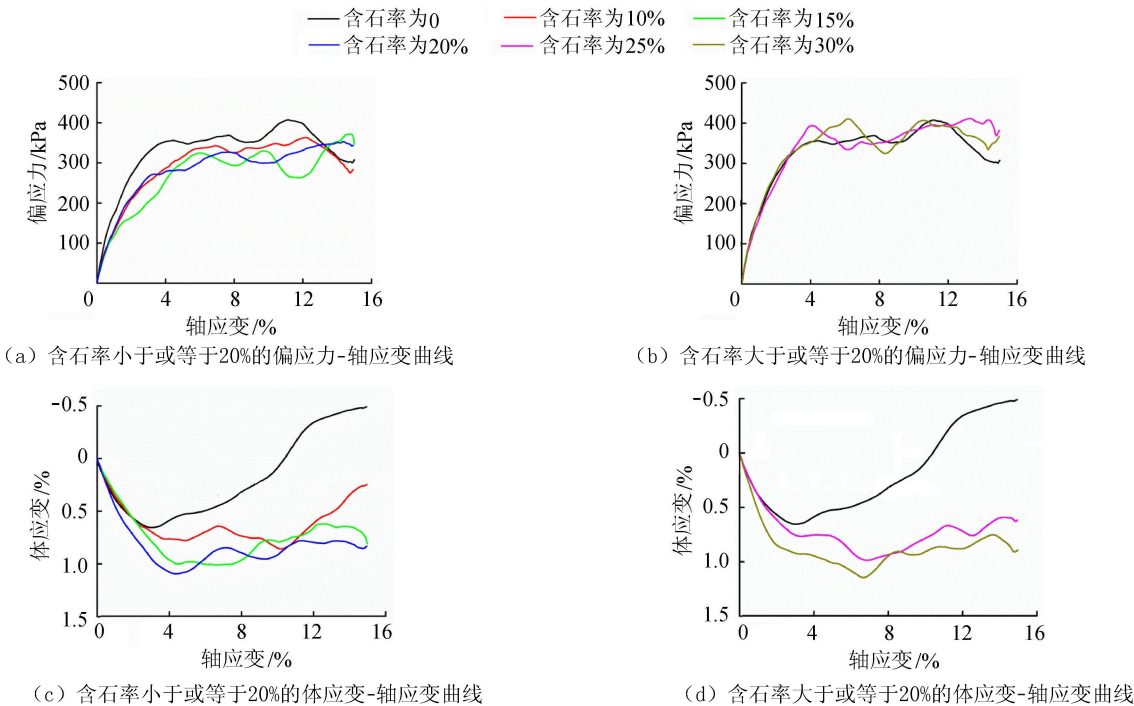


图 3 不同含石率试样偏应力、体应变-轴应变曲线

Fig.3 Curves of deviatoric stress, volumetric strain and axial strain under different rock contents

当含石率从 0 增加到 15% 时,试样中的块石含量太低,块石与块石之间还不能产生相互作用形成受力骨架,反而破坏了土体的均质性和连续性。土体的损失强度大于块石的补偿强度导致整体强度下降。当块石含量大于 20% 时,含石率较大,块石之间虽然仍无法产生相互接触,但块石距离较近的区域,接触力已有所加强,块石的补偿强度逐渐增大,当块石的补偿强度与土体的损失强度相等时,相应的含石率为临界含石率,也是区分低含石率土石混合体和高含石率土石混合体的分界值。分界值的大小受土石混合体成分的影响,Coli 等<sup>[14]</sup>研究发现该值大约在 20% ~ 25% 之间。

不同含石率土石混合体剪胀剪缩特性如图 3(c)、图 3(d) 所示,在低围压下,密实的纯土体呈现剪胀的特性,而块石的掺入,使试样完全呈现剪缩性。

不同含石率土石混合体最大主应力比和剪胀率之间存在线性关系<sup>[15-16]</sup>。根据试验数据生成不同含石率剪胀率与主应力关系,如图 4 所示。随着主应力的增大,试样由松散逐渐变得密实,剪胀率也随之减小。当剪胀率趋于 0 时,试样在主应力作用下体积不再发生变化,主应力也不再线性增加,而是波动上升,最终达到峰值强度。

不同含石率土石混合体的剪胀率与主应力比的线性拟合关系如表 2 所示。从表 2 中可以看出,随着含石率的增大,拟合曲线的斜率和截距变化不大,说明在低含石率的情况下,含石率的增加对土石混合体的体积变形影响不大。

表 2 不同含石率下土石混合体  
剪胀率-主应力比拟合

| Table 2 Dilatancy rate and principal stress<br>fitness under different rock contents |        |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|
| 含石率/%                                                                                | 斜率     | 截距    |
| 10                                                                                   | -1.147 | 0.837 |
| 15                                                                                   | -1.245 | 0.744 |
| 20                                                                                   | -1.294 | 0.778 |
| 25                                                                                   | -1.317 | 0.939 |
| 30                                                                                   | -1.151 | 0.940 |

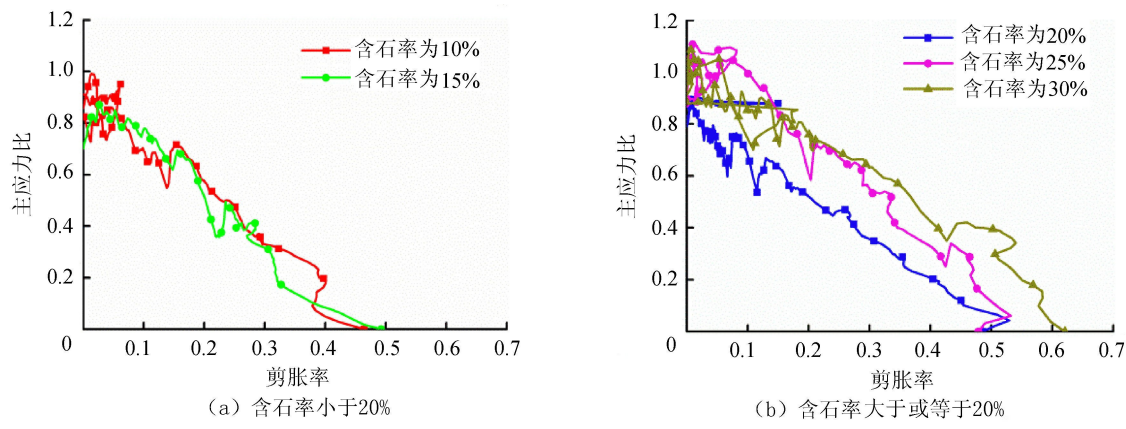


图 4 不同含石率试样剪胀率与主应力比关系

Fig. 4 Curves of principal stress ratio and dilatation rate under different rock contents

3.2 不均匀系数模拟结果

图 5 为不同不均匀系数土石混合偏应力和体应变-轴应变关系曲线。随着不均匀系数的增大,土石混合体的强度有微小减小。从图 5(b)可以看出,试样整体呈现剪缩性,且不均匀系数对试样剪胀剪缩性有较大影响。当  $S=0.010$  时试样在轴向应变大于 12.5% 时发生膨胀;当  $S=0.015$  时试样在轴向应变大于 10% 时发生膨胀;当  $S=0.025$  时试样在轴向应变大于 4% 时发生膨胀,且随着不均匀系数的增大,体应变的膨胀也增大。

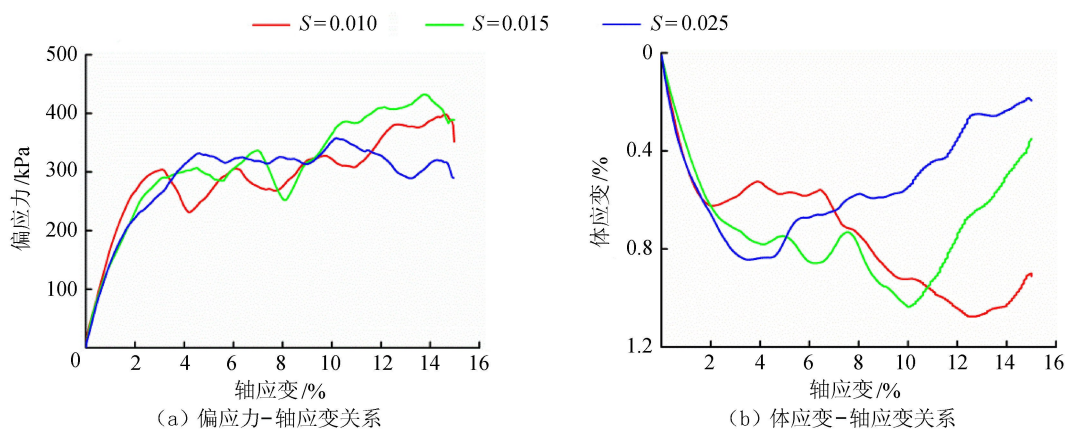


图 5 不同不均匀系数试样偏应力、体应变-轴应变关系

Fig. 5 Curves of deviatoric stress, volumetric strain and axial strain under different inhomogeneity coefficient

$S$  值越小,块石沿着垂向分布越均匀,试样整体的非均匀性和各向异性不明显。在试验过程中,颗粒滚动会填充原来的空隙,从而使试样变得更密实,表现剪缩性。 $S$  值越大,试样沿着垂向越不均匀,可能出现部分区域密实、部分区域松散的情况。密实区域的颗粒已经充分咬合,在试验过程中必须跨过相邻颗粒才能发生移动,导致体积膨胀,因此试样虽然整体表现为剪缩性,但轴向应变达到一定程度后,体应变会出现膨胀现象,且不均匀系数越大,体应变的膨胀现象越明显。

3.3 不同土体孔隙率模拟结果

图 6 为不同孔隙率试样模拟结果。此时土石混合体的力学特性与砂土极为类似,密实的试样表现为剪胀软化的特性,松散的试样表现为减缩硬化的特性。且随着土体孔隙率减小,试样强度有较大提高,在低含石率情况下,与土体孔隙率相比,含石率和不均匀系数对试样强度的影响是次要的,土体的性质对土石混合体的力学特性起主导作用,与高含石率情况下块石起主导作用的规律不同。

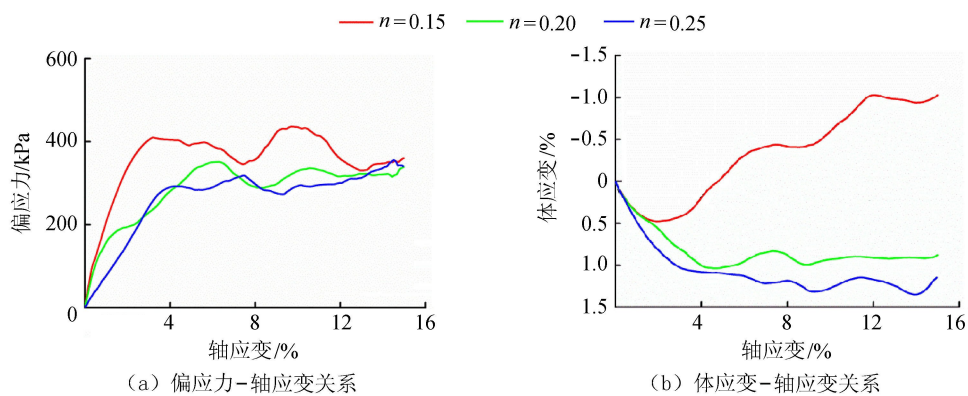


图 6 不同土体孔隙率试样偏应力、体应变-轴应变关系

Fig.6 Curves of deviatoric stress, volumetric strain and axial strain with different porosity of soil

4 结 论

- a. 低含石率与高含石率的分界值在 25% ~30% 之间。在低含石率情况下,块石的存在,破坏了土体的均质性和连续性,导致整体强度小于纯土体的强度,此时块石的补偿强度小于土体的损失强度,当含石率达到临界值时,块石提供的强度才足以补偿土体的损失强度。
- b. 土石混合体的非均质性对强度影响较小,但对体应变影响较大,在相同围压作用下,试样的不均匀系数越大,体应变的膨胀现象越明显。
- c. 在低含石率情况下,土石混合体的强度由土体主导,块石的特性对强度影响有限。

参考文献:

[ 1 ] 徐文杰,张海洋. 土石混合体研究现状及发展趋势[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(1): 80-88. (XU Wenjie, ZHAHG Haiyang. Research status and development trend of soil-rock mixture[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(1):80-88. (in Chinese))

[ 2 ] 唐建一,徐东升,刘华北. 含石量对土石混合体剪切特性的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 93-102. (TANG Jianyi, XU Dongsheng, LIU Huabei. Mesomechanics research of large direct shear test on soil and rock aggregate mixture with particle flow code simulation[J]. Rock and Soil Mechanics,2018, 39(1): 93-102. (in Chinese))

[ 3 ] 夏加国,胡瑞林,祁生文,等. 含超径颗粒土石混合体的大型三轴剪切试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(8): 2031-2039. (XIA Jiaguo, HU Ruilin, QI Shengwen, et al. Large-scale triaxial shear testing of soil rock mixtures containing oversized particles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(8): 2031-2039. (in Chinese))

[ 4 ] 胡峰,李志清,胡瑞林,等. 基于大型直剪试验的土石混合体剪切带变形特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 766-778. (HU Feng, LI Zhiqing, HU Ruilin, et al. Research on the deformation characteristics of shear band of soil-rock mixture based on large scale direct shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 766-778. (in Chinese))

[ 5 ] 金磊,曾亚武. 土石混合体宏观力学特性和变形破坏机制的三维离散元精细模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(6): 1540-1550. (JIN Lei, ZENG Yawu. Refined simulation for macro-and meso-mechanical properties and failure mechanism of soil-rock mixture by 3D DEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(6): 1540-1550. (in Chinese))

[ 6 ] 陈立,张朋,郑宏. 土石混合体二维细观结构模型的建立与数值流形法模拟[J]. 岩土力学, 2017, 38(8):2402-2410. (CHEN Li, ZHANG Peng, ZHENG Hong. Mesostucture modeling of soil-rock mixtures and study of its mesostructural mechanics based on numerical manifold method[J]. Rock and Soil Mechanics,2017, 38(8): 2402-2410. (in Chinese))

[ 7 ] JIANG Mingjing, KONRAD J M, LEROUEIL S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies [J]. Computers & Geotechnics, 2003, 30(7): 579-597.

[ 8 ] 田湖南,焦玉勇,王浩,等. 土石混合体力学特性的颗粒离散元双轴试验模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊1): 3564-3573. (TIAN Hunan, JIAO Yuyong, WANG Hao, et al. Research on biaxial test of mechanical characteristics

on soil-rock aggregate(sra) based on particle flow code simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015,34(Sup1): 3564-3573. (in Chinese))

[ 9 ] 孙立国, 杜成斌, 戴春霞. 大体积混凝土随机骨料数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(3): 291-295. (SUN Ligu, DU Chengbin, DAI Chunxia. Numerical simulation of random aggregate model for mass concrete[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2005, 33(3): 291-295. (in Chinese))

[10] 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, 2008, 28(8): 1652-1665. (XU Wenjie, HU Ruilin, YUE Zhongqi. 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, 2008, 28(8): 1652-1665. (in Chinese))

[11] 薛亚东, 刘忠强, 吴坚. 崩积混合体直剪试验与 PFC 2D 数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊2): 587-592. (XUE Yadong, LIU Zhongqiang, WU Jian. Direct shear tests and PFC 2D numerical simulation of colluvial mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Sup2): 587-592. (in Chinese))

[12] MEDLEY E W. Estimating block size distributions of mélanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks) [C]//NARMS. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium. Toronto:University of Toronto Press, 2002;599-606.

[13] 徐安权, 徐卫亚, 石崇. 基于小波变换的数字图像技术在堆积体模拟中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5):1007-1015. (XU Anquan, XU Weiya, SHI Chong. Application of digital image technology to simulation of talus deposit based on wavelet transform[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5):1007-1015. (in Chinese))

[14] COLI N, BERRY P, BOLDINI D. In situ non-conventional shear tests for the mechanical characterisation of a bimrock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, 48(1): 95-102.

[15] 秦红玉, 刘汉龙, 高玉峰, 等. 粗粒料强度和变形的大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1575-1580. (QIN Hongyu, LIU Hanlong, GAO Yufeng, et al. Research on strength and deformation behavior of coarse Aggregates based on large-scale triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1575-1580. (in Chinese))

[16] CHARLES J A, WATTS K S. The influence of confining pressure on the shear strength of compacted rockfill[J]. Géotechnique, 1980, 30(4): 353-367.

(收稿日期:2019-01-09 编辑:张志琴)

· 简讯 ·

第十三届水科学发展论坛在河海大学举行

2019 年 19—20 日,第十三届水科学发展论坛会议在河海大学举行。会议由中国自然资源学会水资源专业委员会和郑州大学水科学研究中心主办,河海大学水文水资源学院承办,《Water Science and Engineering》、《水利水电科技进展》等编辑部协办。

大会以“大数据技术在水文水资源领域中的应用”为主题,围绕“大数据技术理论与处理方法”“水资源大数据平台构建”“融合大数据的水文模拟与预测”“大数据驱动的水资源管理、水环境保护和水灾害管理”4 个专题展开。河海大学水文水资源学院院长杨涛教授作《无线微波通信大数据挖掘与水利应用》主题报告,指出无线微波通信大数据挖掘技术将充分利用我国丰富的无线基站资源,实现低成本、精细化、无人值守式雨量监测,变革传统雨量监测方式,推动“智慧水利”的建设。北京师范大学张强教授、西北农林科技大学宋松柏教授、清华大学尚松浩研究员、中山大学谭学志副教授、河海大学刘金涛教授等分别做专题报告,16 人分别作学术报告,100 余人次参与讨论发言。论坛的召开对新形势下水科学与多学科的交叉和融合研究,以及青年学者的培育和学术创新等方面发挥了积极的推动作用。

水文水资源学院党委书记陈元芳教授致欢迎词。水文水资源学院副院长王卫光教授主持会议。来自清华大学、武汉大学、天津大学、浙江大学、南京大学、郑州大学等 93 个单位的 500 余位代表参会。

(本刊编辑部供稿)