

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.05.008

# 三维随机模型下不同含石量土石混合体的力学特性研究

张溢丰, 贾聿颀, 李庆伟, 唐 晋

(黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 为探究不同含石量对土石混合物(SRM)力学特性和形变特征的影响,以典型SRM材料试样为研究对象,依据“双随机”原理构建SRM三维随机模型,通过不同含石量SRM试样的三轴压缩数值试验开展研究。结果表明:SRM试样的应变发展主要集中在土石混合体的“土”中,应变出现明显的绕石现象,应力传递主要依靠土石混合体的“石”,承担并传递轴向应力;随着含石量的增加,在低围压作用下SRM试样的应变软化特性趋于不明显,在高围压作用下其应变硬化特性愈加明显;随着含石量的增加,黏聚力和内摩擦角均有增大趋势,黏聚力的增大趋势较摩擦角更为明显,抗剪强度有增长趋势,其增速由缓慢变为迅速。含石量是影响SRM力学特性和形变特征的关键因素,其变化会显著改变SRM的应变发展、应力传递、强度及变形特性。

**关键词:** 土石混合物;含石量;三轴压缩数值试验;形变特征;抗剪强度;应力传递

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)05-0053-07

## Mechanical Properties of Soil-rock Mixture with Different Rock Content Under Three-dimensional Random Model

ZHANG Yifeng, JIA Yujie, LI Qingwei, TANG Jin

(Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450003, China)

**Abstract:** To explore the influence of different rock contents on the mechanical properties and deformation characteristics of SRM, typical SRM material samples were taken as the research objects. A three-dimensional random model of SRM was constructed based on the "double random" principle, and the research was carried out through triaxial compression numerical tests on SRM samples with different rock contents. The results are as follow. The strain development of SRM samples is mainly concentrated in the "soil" of the soil-rock mixture, with an obvious rock-around phenomenon in the strain. The stress transfer mainly relies on the "rock" of the soil-rock mixture, which bears and transfers axial stress. With the increase of rock content, the strain softening characteristics of SRM samples tend to be unobvious under low confining pressure, while the strain hardening characteristics become more obvious under high confining pressure. As the rock content increases, both cohesion and friction angle show an increasing trend, and the increasing trend of cohesion is more obvious than that of friction angle. The shear strength shows an increasing trend, and its growth rate changes from slow to rapid. This work have shown that rock content is a key factor affecting the mechanical properties and deformation characteristics of SRM, and its change will significantly alter the strain development, stress transfer, strength and deformation characteristics of SRM.

**Keywords:** soil-rock mixture; rock content; triaxial compression numerical test; deformation characteristics; shear strength; stress transfer

收稿日期:2025-06-13

修稿日期:2025-07-11

基金项目:黄河勘测规划设计研究院有限公司自主研发项目“三维地质建模与3DE高效协同应用关键技术研究”(2025KY014)

作者简介:张溢丰(1993—),男,硕士,工程师,主要从事工程地质勘察等方面工作。E-mail:767867100@qq.com

土石混合体 (Soil-rock mixture, SRM) 指第四纪以来形成的, 由具有一定工程尺度、强度较高的块石、细粒土体及孔隙且具有一定含石量的极端不均匀松散岩土介质构成。其在自然界分布广泛, 成因主要包括坡积、崩积、冲洪积、冰积及人工堆积等, 常见的有碎石土、卵砾石、工程填筑料等, 具有非连续、非均质、非线性的特性。与一般的岩土体不同, 土石混合体的力学特性和形变特征会受到块石的含量、形状、分布等因素的影响, 又会直接影响到诸如碎石土岸坡稳定性、填筑材料承载力等。因此, 研究土石混合体的力学特性和变形破坏机制对地质灾害防治和相关工程建设的设计与施工具有重要的理论和实用价值。

含石量作为土石混合体的一个重要指标, 对土石混合体力学性质的影响是揭示其宏观演变规律和强度特征的关键问题。大量的学者采用原位试验、室内试验、数码图像处理技术及数值模拟的方法开展了研究。胡瑞林等<sup>[1]</sup>通过多尺度宏-微观室内和现场物理力学试验与模拟, 对土石混合体的强度特性、变形特性和渗透特性及其结构控制机理展开了深入研究, 提出了不同结构状态下强度参数的正确获取方法。黄宜胜等<sup>[2]</sup>通过综合分析室外原位直剪试验和室内原状样直剪试验结果, 表明土石混合体在剪切过程中变化特征均表现为明显的应力屈服及塑形变形。江强强等<sup>[3]</sup>利用室内大型直剪仪结合打孔-插丝-灌砂的方法监测剪切过程中的试样内部变形演化特征, 表明含石量小于 20% 时表现为细颗粒间错动式的剪切变形并呈应变硬化特性、20%~80% 时表现为混合体间啃掘式的剪切变形并呈逐渐表现为应变软化特性、大于 80% 后强度和变形性能均有所弱化。张振平等<sup>[4]</sup>、杨忠平等<sup>[5]</sup>、张修军等<sup>[6]</sup>对土石混合体进行室内大型直剪试验研究, 表明含石量是影响土石混合体剪切应力-剪切位移曲线以及抗剪强度的关键因素。李浩民等<sup>[7]</sup>通过开展大型叠环式单剪试验与大型三轴试验, 提出主应力轴旋转以及非共轴性是造成土石混合体两种试验强度特性差异的重要原因。刘宝臣等<sup>[8]</sup>采用自主研发的颗粒加工设备开展不同含石量、压实度、球度的大型室内直剪试验, 表明内摩擦角及黏聚力整体随着球度增加而下降、抗剪强度随着压实度逐渐增大的提升幅度逐渐降低。杨小彬等<sup>[9]</sup>通过图像处理技术获取土石混合体模型, 对大粒径石块处于不同位置和角度的土石混合体强度和稳定性进

行了研究。刘如珍等<sup>[10]</sup>结合数字图像相关方法 (DIC 技术) 分析不同含石量试样单轴压缩过程中位移、应变 (裂缝扩展) 演化规律。何卓岭等<sup>[11]</sup>利用数字图像处理技术统计红层土石混合体的分维数, 探究了含石量和相对粗砾比对红层土石混合体强度和颗粒破碎行为的影响。韩志洋等<sup>[12]</sup>、罗璟<sup>[13]</sup>运用离散元模拟程序 PFC2D/3D 建立土石混合体直剪试验离散元模型, 揭示了其在不同含石量条件下的宏观力学规律和细观变形破坏机制; 刘晓华等<sup>[14]</sup>、刘康琦等<sup>[15]</sup>运用 FLAC3D 对典型土石混合体建立细观结构模型, 对不同含石量下强度、变形的变化特征及边坡稳定性进行了研究。

综上所述, 原位试验可以真实地反映土石混合体在自然环境下的力学特性, 是岩土工程研究不可或缺的手段, 然而现场试验耗时、费力、成本较高且很难对含石量和含水率等影响因素进行专门研究; 室内试验研究所制备的试样均未考虑土石混合体天然胶结等结构性特征, 与天然状态下土石混合体的力学特性可能存在一定的差异; 数字图像处理技术虽能较好呈现土石混合体的内部细观结构特征, 但多局限于二元平面, 很难用于三维分析。相比而言, 数值分析方法研究成为应用较为广泛的研究手段和有效方法, 为从细观尺度上研究土石混合体的力学响应提供了一条新的途径。但是现阶段的数值分析方法多以数字图像技术、离散元理论为基础, 且多数数值分析也集中以二维分析为主, 缺少三维条件下的空间表述。

因此, 本研究以典型 SRM 材料试样为例, 基于 FLAC3D 构建的三维随机模型, 开展不同含石量下试样的应力应变、黏聚力和内摩擦角、抗剪强度等力学特性研究, 以期对相关工程提供参考。

## 1 三维随机模型构建

### 1.1 模型构建思路

本文研究过程中, 依据块石位置随机、块石粒径随机的“双随机”的方法<sup>[16]</sup>, 首先在三维模型网格范围内部随机挑选  $n$  个节点作为块石投放基点; 再以满足材料粒径分布要求的粒径变量  $Y$  值为包络范围, 按照一定的几何形状 (真实材料为次圆形块石, 所以考虑为圆形), 通过 FISH 程序控制自动生成试样模型范围内的所有块石; 土和石的区分主要通过模型网格单元分配不同的材料属性来实现。

如图 1 所示, 采用 2 mm 的试样初始网格控制

尺寸,通过网格体积来表达块石含量的占比,利用网格生成器生成单元和节点均匀分布的初始网格,导入 FLAC3D 中,再进行土、石区分,完成土石混合体模型构建。

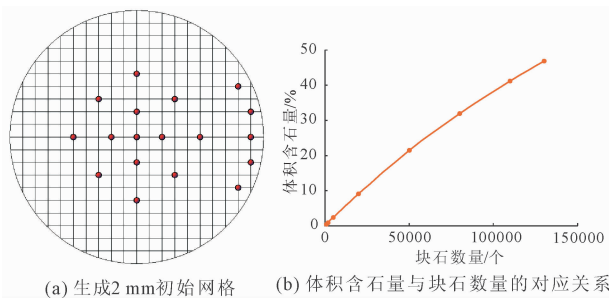


图 1 三维随机模型构建思路

### 1.2 模型校验

共进行了 8 种块石数量、共计 27 次模型构建试验。统计各级块石数量下多次重构模型对应的体积含石量,如图 2 所示。

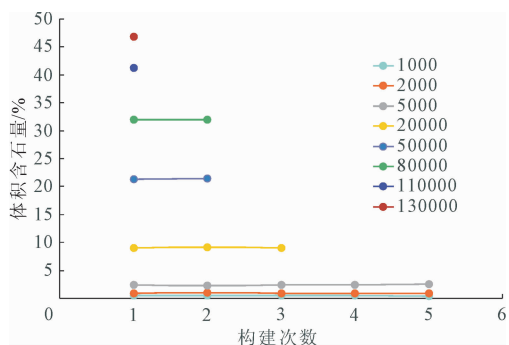


图 2 多次重构模型的体积含石量

### 1.3 模型构建效果

根据上述模型构建思路和校验结果,构建出  $\Phi = 150 \text{ mm}, h = 300 \text{ mm}$ ,不同含石量的 SRM 三维随机模型,研究所用 SRM 材料筛分试验结果如图 3 所示,三维模型如图 4 所示。

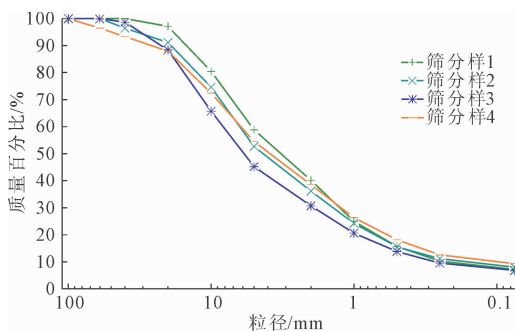


图 3 典型 SRM 材料颗粒级配曲线

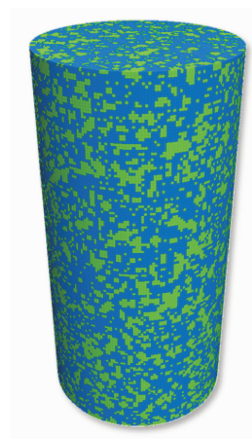


图 4 SRM 三维随机模型

## 2 三轴数值仿真

### 2.1 试验设计

为了研究含不同含石量对土石混合体特性的影响,设计了 7 种不同块石数量下的土石混合体试样,采用优化后方法构建出相应块石数量的 7 种土石混合体模型。模型中土和石材料参数取自相关文献实例并做了适当调整,详见表 1。

表 1 材料参数

类别	密度 $/( \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} )$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\mu$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
石	2600	2.00	0.28	1000	38
土	2050	0.04	0.30	10	23

根据模型中体积含石量和材料密度,可以计算出模型的质量含石量(含石量),各组试验的体积含石量、质量含石量、模拟试验条件等如表 2 所示。

按照试验方案,共设计了含石量从 0% ~ 52.77% 共 7 组土石混合体试验,在 100 kPa、200 kPa、400 kPa 三种不同围压下的进行三轴压缩模拟试验,共开展了 21 组三轴压缩数值计算。

### 2.2 块石运移形态分析

截取(质量)含石量 47.09% 的试样 2 在 400 kPa 围压下,模拟试验结果的剪应变增量和剪应力云图,如图 5 所示。

从图 5 计算结果可以看出,试样的应变发展主要集中在土石混合体的“土”中,应变出现明显的绕石现象;应力传递主要依靠土石混合体的“石”,承担并传递轴向应力。

截取  $z = 0.15$  截面,随机挑选 2 个块石,布置测

表 2 试验条件设置

试样	块石数量	体积含石量/%	质量含石量/%	试验围压/kPa
试样 1	130000	46.84	52.77	100
				200
				400
试样 2	110000	41.24	47.09	100
				200
				400
试样 3	80000	31.97	37.34	100
				200
				400
试样 4	50000	21.40	25.67	100
				200
				400
试样 5	20000	9.04	11.20	100
				200
				400
试样 6	5000	2.41	3.04	100
				200
				400
试样 7	0	0.00	0.00	100
				200
				400

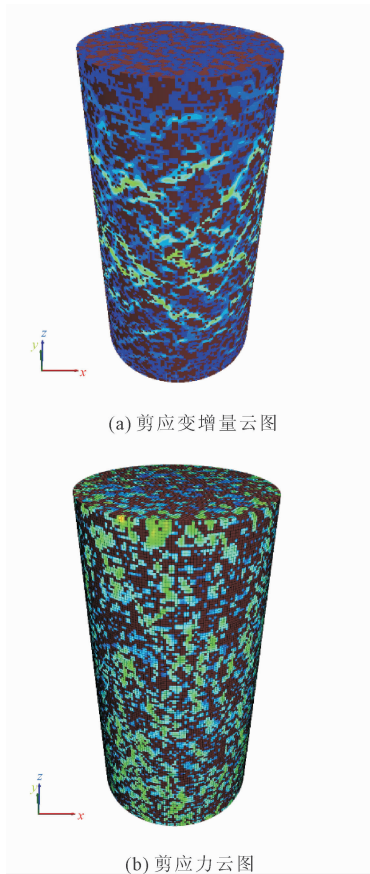
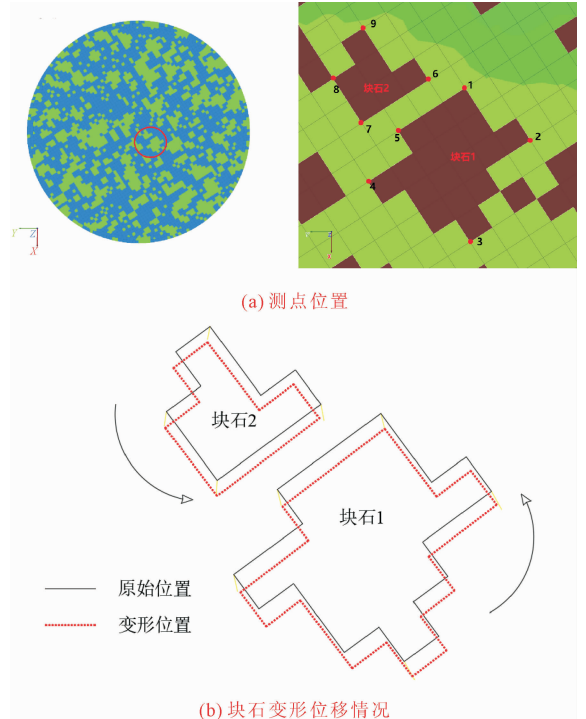


图 5 模拟试验的剪应变增量和剪应力云图(试样 2)

点,提取其的  $x$ 、 $y$  方向位移,分析块石在受压下运移形态,测点布置和块石运移特征如图 6 所示,变形位移如表 3 所示。

图 6  $z=0.15$  m 截面变形监测点表 3 测点  $x$ 、 $y$  方向位移

测点编号	位移/m		移动距离/m	移动角度/ $^{\circ}$	移动方向	
	$x$	$y$				
块石 1	1	0.0036	-0.0009	0.0037	14.0	$x$ 轴正向偏右
	2	0.0043	-0.0024	0.0049	29.2	$x$ 轴正向偏右
	3	0.0043	-0.0024	0.0049	29.2	$x$ 轴正向偏右
	4	0.0040	-0.0009	0.0041	12.7	$x$ 轴正向偏右
	5	0.0037	-0.0009	0.0038	13.7	$x$ 轴正向偏右
块石 2	6	0.0038	-0.0007	0.0039	10.4	$x$ 轴正向偏右
	7	0.0033	0.0002	0.0033	3.5	$x$ 轴正向偏左
	8	0.0033	0.0005	0.0033	8.6	$x$ 轴正向偏左
	9	0.0030	0.0006	0.0031	11.3	$x$ 轴正向偏左

注:向下为  $x$  轴正向,向左为  $y$  轴正向。

块石在轴向应力下会产生位移,根据 1—5 测点  $x$ 、 $y$  位移可以看出,在变形位移的过程中,块石 1 绕  $z$  轴产生了逆时针旋转;根据 6—9 测点  $x$ 、 $y$  位移可以看出,在变形位移的过程中,块石 2 也绕  $z$  轴产生了逆时针旋转。可见随着试样的受力变形,块石会发生扭转,考虑到土的应变增量大于石,土石共同作用下,土体不断压缩,石块不断扭转位移,不同的块石会相互接触、咬合、压密,产生咬合力、阻力,最终在试样内部构成石骨架,承担传递轴向应力。

## 2.3 应力-应变分析

### 2.3.1 不同含石量时的力学性能

试验得到的不同含石量条件下的土石混合体试

样的轴向应力-应变曲线图,见图7。

结合图7所示曲线和试验数据,可以看出应力-应变曲线呈现出4个不同的阶段:

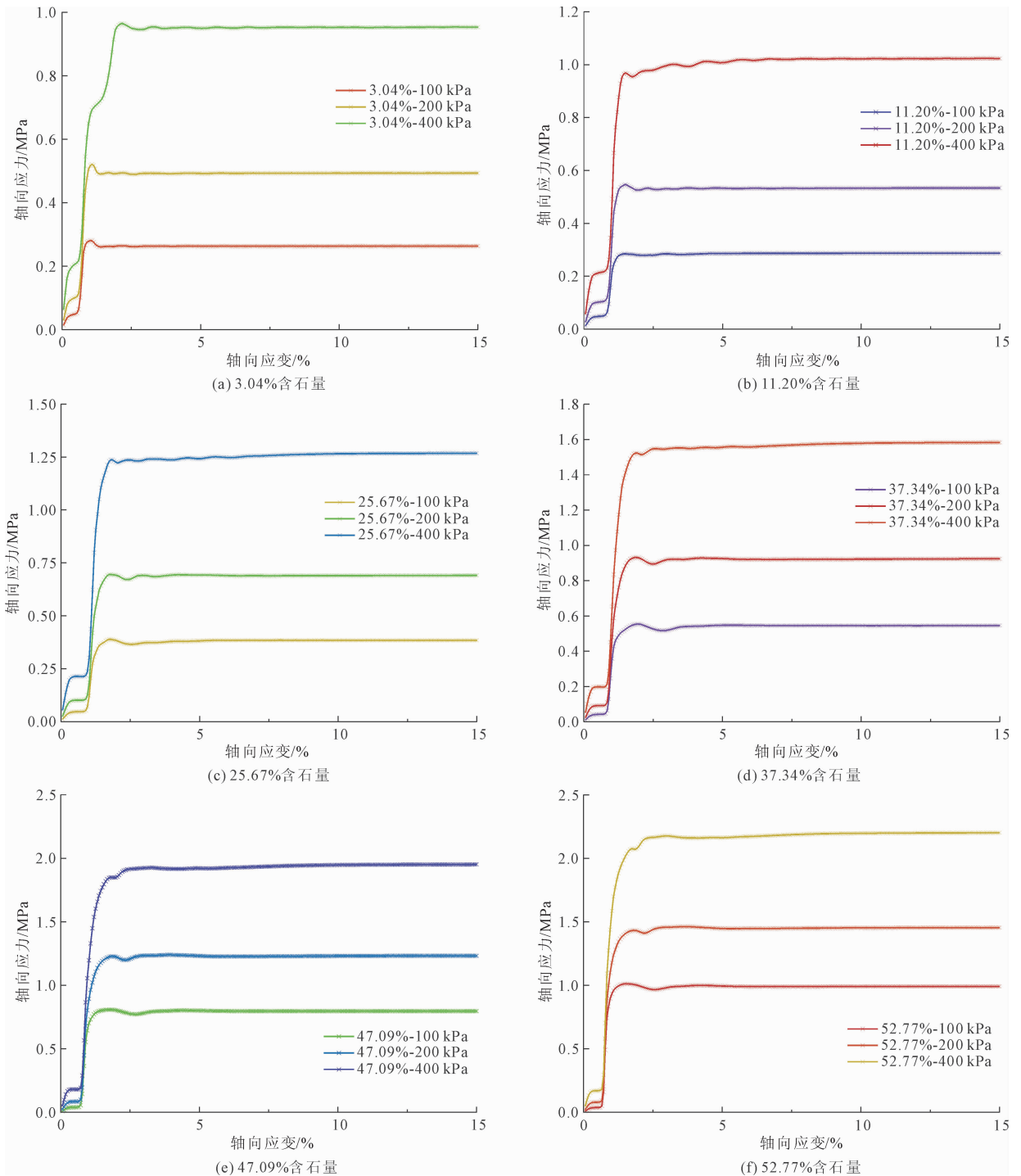


图7 不同含石量的应力-应变曲线图

① 压实阶段,曲线斜率由陡变平,随着应力的增加,试样应变增加较快,表现为试验中的土体被压实,直至石颗粒开始相互接触,应变增长速度开始放缓。

② 线性变形阶段,即应力-应变曲线近似为一条直线,因为土体承担的应变释放完毕,由石颗粒构成的骨架开始承担应力,强度主要为块石之间的咬合和摩擦力。

③ 屈服阶段,曲线斜率由陡变平,随着应变不断增加,混合材料达到屈服。

④ 软化/硬化阶段,该阶段由于土石混合体中土体已破坏,块石被压密,在不同的围压下表现出软化或硬化特性。

处于低围压(100 kPa、200 kPa)下时,土石混合体材料应力应变关系曲线在峰值之后呈现出应变软化的趋势,强度略有降低,但不是很明显,这表明土石混合体具有在峰后依然能承受较大荷载作用的强度特性。且随着含石量的增加,软化特性趋于不明显。

围压逐渐增加到 400 kPa 后,土石混合体材料应力应变关系曲线转变为应变硬化特征,但是强度同样增加得非常缓慢,可以预测,如果围压进一步增大,那么土石混合体的应变硬化特性将会变得更为显著。且随着含石量的增加,硬化特性愈加明显。

### 2.3.2 不同含石量相同围压下的力学性能

不同含石量的土石混合体试样在相同围压下的轴向应力-应变关系曲线,见图 8。

由图 8 可以很明显的看到,在其他因素相同时,随着含石量的增加试样轴向应力逐渐增大,试样的含石量越高其变形模量也越大,且随轴向应变的发展,亦较快地由线弹性变形阶段进入到弹塑性变形阶段。可见,含石量不仅对土石混合体的强度特性存在较大影响,同样还会影响其变形特性。

含石量较高( $>37.34\%$ )时,应力明显大于其他含石量,这是由于此时土石混合体试样的强度由块石间的咬合力承担,含石量越多,咬合力就会越强,进而表现出类似于“岩”的特性,因此有较高的强度。

当含石量较小( $<11.20\%$ )时,应力增幅明显小于其他含石量,这是由于此时试样含石量较低,试样的强度由几乎全由“土”承担,从而强度明显小于其它含石量。

### 2.4 黏聚力、内摩擦角分析

黏聚力、内摩擦角是摩尔-库仑定理中衡量材料抗剪强度特性的两个重要参数。研究黏聚力和内摩擦角对于评价土石混合介质材料的抗剪强度,对分析土石混合体边坡的稳定性具有十分重要的意义。

不同质量含石量土石混合体的三轴压缩数值模拟试验数据结果见表 4,质量含石量对黏聚力、内摩擦角的影响变化曲线见图 9。

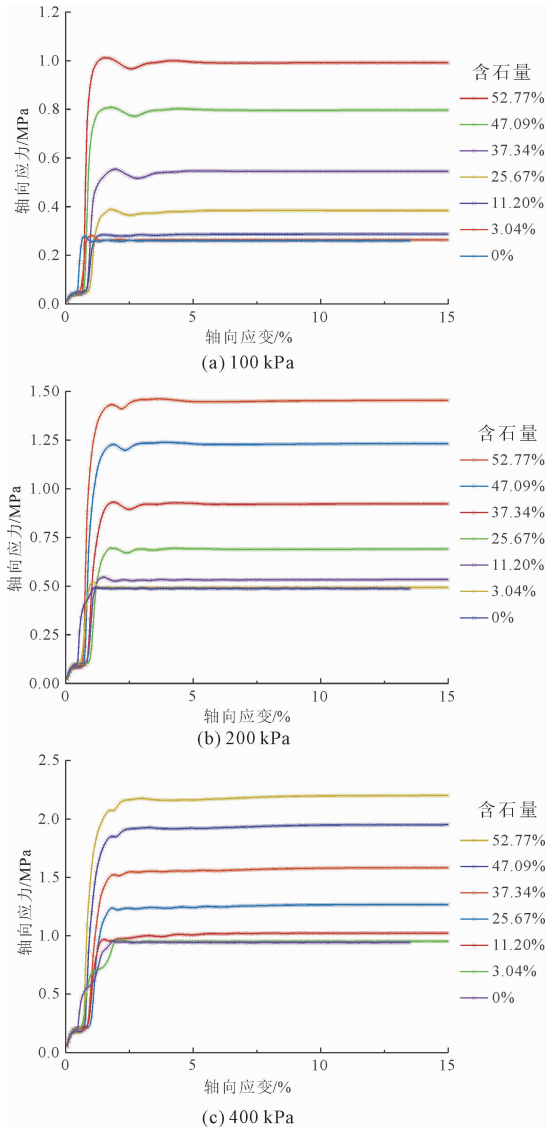


图 8 相同围压下的轴向应力-含石量关系曲线

表 4 试样的压缩试验结果

试样	体积含石量/%	质量含石量/%	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
试样 1	46.84	52.77	145.66	39
试样 2	41.24	47.09	108.82	37
试样 3	31.97	37.34	55.70	34
试样 4	21.40	25.67	26.44	30
试样 5	9.04	11.20	18.59	25
试样 6	2.41	3.04	15.28	24
试样 7	0.00	0.00	11.54	23

可见,对本节试验的土石混合体材料,随着块石含量的增加,黏聚力和内摩擦角均有增大趋势,黏聚力的增大趋势较内摩擦角更为明显。因为在相同的条件下,随着含石量的增大,试样中块石数量不断增多。相应的,粗颗粒也不断增多,随着压缩剪切的持

续,在轴向应力作用下,块石发生错动、翻滚、断裂、“锁合效应”等现象,使得材料强度增大。

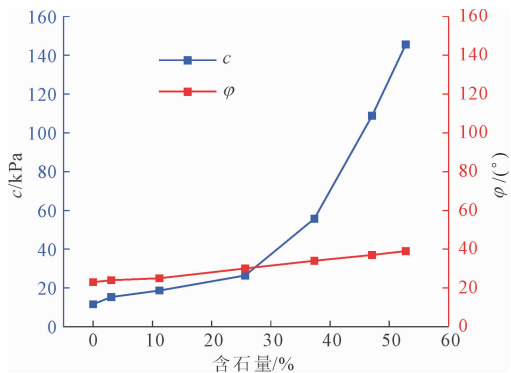


图 9 不同质量含石量下抗剪强度指标

### 2.5 抗剪强度分析

假定材料破坏符合摩尔-库仑准则,依据库仑公式计算不同围压下抗剪强度,土石混合体的抗剪强度见表 5,不同围压下抗剪强度-含石量关系曲线,见图 10。

表 5 试样的抗剪强度

试样	体积含石量/%	质量含石量/%	抗剪强度/kPa		
			100	200	400
试样 1	46.84	52.77	226.64	307.62	469.57
试样 2	41.24	47.09	184.18	259.53	410.24
试样 3	31.97	37.34	123.15	190.60	325.50
试样 4	21.40	25.67	84.18	141.91	257.38
试样 5	9.04	11.20	65.22	111.85	205.11
试样 6	2.41	3.04	59.80	104.33	193.37
试样 7	0.00	0.00	53.99	96.43	181.33

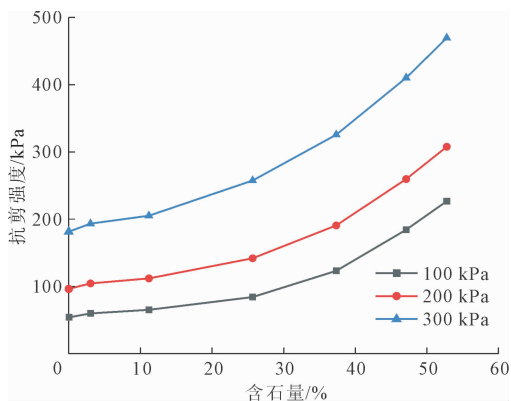


图 10 不同围压下抗剪强度-含石量关系曲线

根据图表可以将土石混合物抗剪强度分为以下 2 种情况:含石量小于 10% 时,为低含石量,随着含石量增加,强度增长较缓,因为这阶段土石混合物中“土”较多,此时块石处于悬浮状态,因而其宏观强

度主要取决于土体,进而表现出土体的特性,含石量变化对强度影响不大。

含石量大于 35% 后,块石含量较多,随着含石量增加,强度增长较快,因为材料变得更为密实,细粒土含量反而较少,试样内部的块体发生接触,而土颗粒只作为一种充填物,块石与块石的直接接触会形成支撑骨架,宏观强度由块石间的咬合力、摩擦力承担,进而表现出强度随含石量迅速增加。

## 3 结 论

本文基于真实材料数据构建了土石混合物 (SRM) 三维随机模型,开展了多组数值仿真试验,研究揭示了不同含石量对 SRM 材料力学特性的影响,也印证了土石混合物非岩非土的典型力学特征。得到主要结论如下:

(1) 随着试样的受力变形,块石会发生扭转,试样的应变发展主要集中在土石混合体的“土”中,应变出现明显的绕石现象;应力传递主要依靠土石混合体的“石”,承担并传递轴向应力。

(2) 应力-应变曲线呈现出 4 个不同的阶段:压实阶段、线性变形阶段、屈服阶段、软化/硬化阶段。中低围压(100 kPa、200 kPa)下,表现为应变软化特征,随着含石量的增加,软化特性趋于不明显;高围压(400 kPa)下,表现为应变硬化特征,随着含石量的增加,硬化特性愈加明显。

(3) 含石量不仅对土石混合体的强度特性存在较大影响,同样还会影响其变形特性。低含石量 (<11.20%) 时,应力增幅明显小于其他含石量,试样的强度由几乎全由“土”承担;较高含石量 (>37.34%) 时,应力明显大于其他含石量,表现出类似于“岩”的特性,具有较高的强度。

(4) 随着块石含量的增加,抗剪强度增大,其中黏聚力和内摩擦角均有增大趋势,黏聚力的增大趋势较摩擦角更为明显。低含石量 (<11.20%) 时,随着含石量增加,强度增长较缓,含石量变化对强度影响不大;高含石量 (>35%) 时,随着含石量增加,强度增长较快,强度随含石量迅速增加。

### 参考文献:

[1] 胡瑞林,李 晓,王 宇,等. 土石混合物工程地质力学特性及其结构效应研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2):255-281.  
 [2] 黄宜胜,方鼎元,李建林,等. 土石混合物剪切强度的室内外对比试验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2019, 41(6):26-30.

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国教育部. 关于印发《高等学校课程思政建设指导纲要》的通知;教高[2020]3号[Z]. 2020-05-28.
- [2] 河海大学《土力学(第3版)》教材编写组. 土力学[M]. 北京:高等教育出版社,2019:25-26.
- [3] 朱秀清,宋爱红,王旭. 土力学课程融合思政教育教学研究与实践[J]. 教育教学论坛,2020(27):80-81.
- [4] 王中华,雷金波,喻勇. 混合式教学模式下土力学课程思政融入的探讨[J]. 职业教育发展,2024,13(6):2267-2274.
- [5] 刘艳,李伟华,房倩. 将思政教育引入土力学教学的探索[J]. 教育现代化. 2020,7(2):137-138.
- [6] 徐慧,王灏霏. 新工科背景下“土力学与地基础”课程教学改革实践[J]. 安徽建筑. 2021,28(2):128-129.
- [7] 周京华. 土力学[M]. 北京:中国铁道出版社,2022:35-36.
- [8] 李广信. 高等土力学[M]. 第2版. 北京:清华大学出版社,2016:38-39.
- [9] 牛婷婷,胡怀利,邹久群,等. 土力学教学中思政元素的有机融入[J]. 高等建筑教育,2024,33(1):151-157.
- [10] 孙哲,赵中华,刘爱霞. 新工科背景下土力学课程思政教学研究[J]. 大学,2024(24):137-140.
- [11] 蒋水华,夏陈玮,章浩龙,等. 土力学课程思政教学方法探索[J]. 高等建筑教育,2021,30(6):81-86.
- [12] 王璐,沈扬,刘云,等. “新工科”视角下土木类大学生学习共同体构建[J]. 高等建筑教育,2020,29(4):1-7.
- [13] 董金梅,刘方爱,高洪梅,等. 提升土力学课程学生学习效果的思路与探索[J]. 高教学刊,2023,9(6):121-124.
- [14] 孙永帅,张薇. 基于思政教育的“土力学”课程研究综述[J]. 中国地质教育,2024,33(1):81-86.
- [15] 张晓磊,吴晓峰,曹培. 基于课程思政的土动力学实验教学模式探索[J]. 教育教学论坛,2022(43):41-44.

(上接第 59 页)

- [3] 江强强,徐杨青,王浩. 不同含石量条件下土石混合体剪切变形特征的试验研究[J]. 工程地质学报,2020,28(5):951-958.
- [4] 张振平,付晓东,盛谦,等. 基于含石量指标的土石混合体非线性破坏强度准则[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(8):1672-1686.
- [5] 杨忠平,李进,蒋源文,等. 含石率对土石混合体-基岩界面剪切力学特性的影响[J]. 岩土工程学报,2021,43(8):1443-1452.
- [6] 张修军,季思同,戴文杰,等. 含石量与含水率对土石混合体抗剪特性研究综述[J]. 广东土木与建筑,2022,29(6):43-47.
- [7] 李浩民,饶锡保,江泊洳,等. 单剪与常规三轴条件下土石混合体强度特性差异[J]. 长江科学院院报,2023,40(3):105-111.
- [8] 刘宝臣,张辉,林志南,等. 含石量及块石球度对土石混合体剪切特性的影响[J/OL]. 工程科学与技术,2024:1-16[2025-08-13]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20240617.1146.002>.
- [9] 杨小彬,侯鑫,裴艳宇,等. 大粒径石块分布对土石混合体稳定性的影响[J]. 科学技术与工程,2020,20(31):12962-12967.
- [10] 刘如珍,乔丹阳,刘正疆. 基于数字图像相关方法分析土石混合体的变形行为[J]. 公路工程,2024,49(3):76-84.
- [11] 何卓岭,张俊云,罗晓龙,等. 红层土石混合体颗粒破碎行为及强度产生机制[J/OL]. 西南交通大学学报,2024:1-11.
- [12] 韩志洋,曹志翔,黄开放. 基于离散元模拟的土石混合体剪切与变形特性研究[J]. 中国农村水利水电,2023(5):238-244.
- [13] 罗璟,董自涛,裴向军,等. 不同含石量条件下TBM渣料剪切特性研究[J/OL]. 工程地质学报,2023:1-15[2025-08-13]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2022.0697>.
- [14] 刘晓华,韦彬,唐皓,等. 基于蒙特卡洛随机采样的土石混合体数值模型构建方法[J]. 湖南交通科技,2020,46(2):18-24,53.
- [15] 刘康琦,刘红岩. 地震作用下土石混合体边坡稳定性分析研究[J]. 防灾减灾工程学报,2022,42(1):224-230.
- [16] 贾聿颀,李冬冬. 基于筛分试验的土石混合体三维数值建模方法研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2023(2):97-103.