

# 考虑堆积结构特征的 TBM 洞渣力学性质三轴试验研究

裴向军<sup>1,2</sup>, 罗璟<sup>\*1,2</sup>, 董自涛<sup>1</sup>

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059;

2. 天府永兴实验室, 四川 成都 610213)

**摘 要:** TBM 洞渣因其典型的针片状块石特征, 堆置后形成独特的堆积结构, 其力学特性与其他土石混合物体显著不同。本文通过倾倒堆积物理模拟和 GDS 大型三轴试验, 揭示了其堆积结构特征, 分析了不同含石量和块石定向排列对 TBM 洞渣变形破坏的影响规律, 并探讨了其影响机制。结果表明: ① TBM 洞渣中典型的针片状块石在倾倒堆积过程中易发生滑落, 形成具有块石定向排列和正粒序分布特征的独特堆积结构。② TBM 洞渣的相对密度随着含石量的增加呈现先增大后减小的趋势, 存在一个最优含石量。③ 随着含石量的增加, TBM 洞渣内部结构发生变化, 破坏形式逐渐由单一剪切带破坏转变为“X 型”共轭剪切带破坏, 抗剪强度先升高后降低, 出现明显的强度峰值。④ TBM 洞渣中的针片状块石主要以面-面接触为主, 块石间的咬合与嵌套作用较弱, 压缩过程中易发生滑动摩擦, 从而导致 TBM 洞渣整体强度较低, 压缩变形量较大。⑤ 随着围压升高, TBM 洞渣中块石定向排列的结构特征抑制了块石间的咬合与嵌套作用, 限制了强度的增长, 导致其劣势逐渐凸显。

**关键词:** TBM 洞渣; 针片状块石; 定向性; 含石量; 三轴试验

中图分类号: P642.3

文献标识码: A

作者简介: 裴向军(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事地质灾害评价与防治研究工作。E-mail: pxj@cdut.edu.cn.

## Triaxial test study on the mechanical properties of TBM muck with consideration of its soil structure

PEI Xiangjun<sup>1,2</sup>, LUO Jing<sup>\*1,2</sup>, DONG Zitao<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Tianfu Yongxing Laboratory, Chengdu 610213, China)

**Abstract:** TBM muck, a typical needle- and flake-shaped soil-rock mixture, develops a distinctive soil structure during stockpiling. Its deformation and strength characteristics differ markedly from those of other soil-rock mixtures. In this study, the entire dumping and accumulation process of TBM muck was simulated through physical model tests to investigate the resulting soil structure. Using GDS large-scale triaxial tests, we systematically analyzed the effects of varying rock block proportions and orientations on the mechanical behavior and failure characteristics of TBM muck. The results indicate that: (1) During the dumping and accumulation, flake-shaped rock blocks are prone to sliding, resulting in significant particle size segregation and the formation of a soil structure characterized by oriented rock block alignment and a well-graded distribution. (2) The relative density of TBM muck initially increases and then decreases with increasing rock block proportion, indicating the existence of an optimal rock block proportion. (3) As the rock block proportion increases, the internal structure of TBM muck evolves, and its failure mode transitions from a single shear band to an "X-shaped" conjugate shear band failure. Consequently, the shear strength initially increases, reaches a distinct peak, and then decreases. (4) The needle- and flake-shaped rock blocks in TBM muck primarily exhibit face-to-face contact, with limited interlocking and nesting between particles. Under compression, sliding friction predominates, resulting in a lower overall strength and higher compressive deformation. (5) With increasing confining pressure, the oriented arrangement of rock blocks suppresses the interlocking and nesting effects between particles, thereby limiting strength development and progressively amplifying the material's inherent structural weaknesses.

**Key words:** TBM muck; needle- and flake-shaped rock block; directionality; rock block proportion; triaxial test

基金项目: 四川省自然科学基金项目(25NSFSC2093); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究课题(SKLGP2022Z014); 国家自然科学基金项目(42107212); 国家重点研发计划项目(2023YFC3007101)

收稿日期: 2025-01-06

\*通信作者(E-mail: luoj@cdut.edu.cn)

## 0 引言

随着“西部大开发”和“一带一路”等国家战略的实施,西部山区已成为国家重大工程的高密度区。该地区地形地质条件复杂、生态环境敏感脆弱,铁路和公路常通过隧道穿越山脉,隧道占比不断增加。近年来,隧道掘进机(Tunnel Boring Machine, TBM)凭借高效、优质、低劳动强度和小环境扰动等优势,得到广泛应用。TBM产生的洞渣主要由细砂和针片状碎块石组成,不适合生产机制砂,综合利用率较低,通常以废弃堆放处理。由于其独特的颗粒级配和形状,TBM洞渣的堆积结构与其他土石混合体不同,力学特性也存在显著差异。

土石混合体作为非均质复合材料,其物质组成和结构特征存在显著的空间变异性,导致力学性质复杂且存在各向异性。含石量作为影响其宏观力学行为的关键参数,近年来得到广泛关注。周中等<sup>[1]</sup>、金磊等<sup>[2]</sup>研究发现,土石混合体渗透性随含石量的增加而增大。Wei等<sup>[3]</sup>、Xu等<sup>[4]</sup>通过直剪试验发现,试样强度随着含石量的增加而不断提升;金磊等<sup>[5]</sup>、张强等<sup>[6]</sup>、Xu等<sup>[7]</sup>通过数值模拟手段也验证了这一规律。然而,随着研究的深入,刘飞禹等<sup>[8]</sup>、唐建一等<sup>[9]</sup>、Xu等<sup>[10]</sup>、杨忠平等<sup>[11]</sup>发现,随含石量的增加,试样强度并非持续提升,而是呈现出一个明显的强度峰值。对于块石形状而言,由于试样制备技术和形态表征方法的不足,目前室内试验的研究对象大多为类球状和立方状形态的块石,而在数值分析中对块石形状的假设过于理想化,缺乏地质原型,与实际情况存有较大差异<sup>[12, 13]</sup>。

在试验方法中,直剪试验因结构简单、操作方便而广受青睐,但试样的破坏面受人为限定,难以真实反映最薄弱面,且排水条件难控,剪应力分布不均,主应力方向偏转,影响了试验准确性。相比之下,三轴试验能模拟土体的饱和、固结和剪切过程,严格控制排水条件,还原更真实的受力环境,获得自然破裂的剪切面,广泛应用于岩土体力学研究。Wang等<sup>[14]</sup>通过三轴试验发现球状块石较真实情况强度降低11%。Zhang等<sup>[15]</sup>结合三轴试验和CT扫描,研究了颗粒分布对力学行为的影响,发现块石间的互锁与断裂效应是决定强度的关键。Qian等<sup>[16]</sup>通过三轴试验发现块石含量增加会改变试样内部结构,从而影响土体力学性质。而与传统三轴仪器相比,GDS自动三轴试验仪具有更高的自动化程度,更优的试验精度和更强的可操作性,能够实时准确地获取数据<sup>[17]</sup>。Luan等<sup>[18]</sup>通过GDS三轴试验发现,块石比例约30%时,试样具有较好的渗透性与稳定性。An等<sup>[19]</sup>通过GDS三轴试验发现,在相同动荷载条件下,

含砂量的增加将降低试样的刚度,而围压的增加将提高试样的刚度。

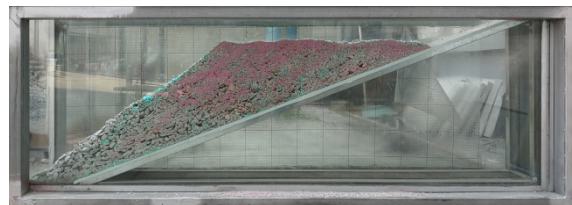
TBM洞渣作为含典型针片状块石的土石混合体,其独特堆积结构显著影响其力学特性。本文通过TBM洞渣的倾倒堆积物理模型试验,揭示其运动堆积过程及堆积结构特征。基于此,采用GDS大型三轴仪器开展力学试验,研究不同含石量条件下TBM洞渣的力学特性,为TBM弃渣场的稳定性评价与安全防护提供科学理论支撑。

## 1 TBM洞渣倾倒堆积结构特征

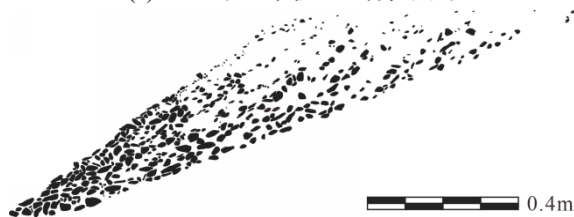
### 1.1 试验方案

为揭示TBM弃渣场块石排列特征和粒序结构,本文开展倾倒堆积物理模型试验,分析TBM洞渣运动堆积过程及堆积结构特征。试验模型箱尺寸为 $1.8\text{m}\times 0.25\text{m}\times 0.6\text{m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),场地坡度为 $20^\circ$ ,模型几何相似比为1:50。根据土工试验标准,模型箱最短边与块石最大粒径之比不应大于5。综合实际筛孔直径,试验中最大块石粒径设为40 mm,超粒径块石按等量替代法缩小。参考Medley<sup>[20]</sup>的土石阈值标准,选取10 mm作为土石阈值。现场筛分试验表明,取样点TBM洞渣含石量约为50%。为更好揭示颗粒在运动堆积过程中的分选性,预先对细颗粒进行染色处理,其中,5~10 mm颗粒染为蓝色,0.5~5 mm颗粒染为白色,小于0.5 mm颗粒染为红色。

试验采用压坡脚式(顺排)方式进行,首先按质量比例称取各粒径组装入料斗,搅拌混合均匀后从斜坡顶部20cm处缓慢倾倒,模拟装斗车倒渣过程。洞渣在重力作用下沿坡面运动堆积。后续倾倒保持高度不变,并根据堆积情况水平移动料斗,确保洞渣沿堆积坡面继续运动和堆积。



(a) TBM洞渣堆积结构特征照片



(b) TBM洞渣堆积结构特征二值化图

图1 TBM洞渣堆积结构特征

Fig. 1 TBM muck soil structure

### 1.2 试验结果

经12次的洞渣倾倒堆积模拟,所形成的堆积体

形态如图 1a 所示。在整个倾倒运动堆积过程中，发现粒径 20~40 mm 的大块石以滑移运动为主，粒径为 10~20 mm 的小块石以滑移-翻滚交替式运动，而小于 10mm 的土颗粒主要以翻滚运动为主。

由图 1 可知，由于大块石具备更大的动能，运动距离较远，多堆积在边坡下部，呈现出显著的正粒序堆积结构。将堆积体按照  $0.2H$  ( $H$  为堆积体高度) 均分为 5 层，从坡脚到坡顶分别设置为第一层到第五层。通过统计每层的颗粒组成后发现，TBM 洞渣堆积体在不同层位的级配分布情况存在明显差异。堆积体从上到下粗颗粒含量迅速增加，而细颗粒含量显著降低，表现出明显的颗粒分选特征，呈现正粒序的堆积结构，即自上而下颗粒的平均粒径逐渐增加(图 2)。

此外，堆积体中块石的长轴方向多与边坡坡面平行，呈现出显著的定向性。为更好地揭示 TBM 洞渣中针片状块石的堆积特征，引入“块石倾角”指标<sup>[21]</sup>，即块石长轴与水平方向的夹角，通过 ImageJ 软件对其进行测量统计。统计结果如图 3 所示，块石倾角主要集中在  $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$  之间，与边坡坡度大致相同，且在峰值两侧迅速减小，符合块石定向排列的分布规律<sup>[22]</sup>。

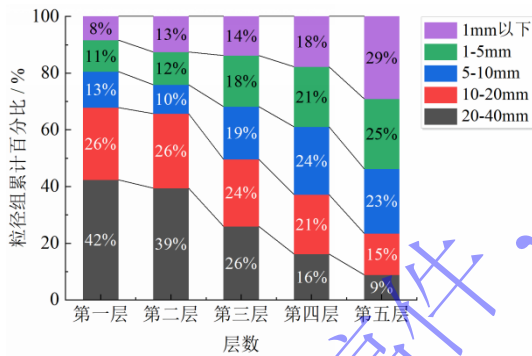


图 2 不同层位级配分布情况

Fig. 2 Grading distribution of particles at different layer positions

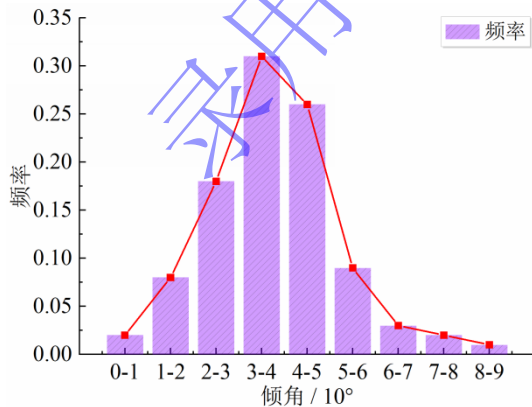


图 3 块石倾角分布情况

Fig. 3 Distribution of rock block inclination angles

## 2 不同含石量条件下 TBM 洞渣密实度

### 2.1 试验方案

为研究 TBM 洞渣的物理力学性质，探究含石量对 TBM 洞渣堆积体孔隙率的影响，本文针对不同含石量的 TBM 洞渣开展最大、最小干密度试验。考虑到粗粒土大型击实试验极易导致块石发生破碎，进而影响试样的级配特征和孔隙率，本文选取振动台法测定最大干密度，固定体积法测定最小干密度。振动台法通过试样上部加重块施加压力，并结合下部振动台高频振动，使试筒内土石混合体趋于最密实状态。

### 2.2 试验结果

如图 4 所示，随着含石量的增加，TBM 洞渣的最小和最大干密度都呈现先增加后减少的趋势。当含石量达到 50% 时，最小和最大干密度均达到最大值，表明在该含石量条件下，TBM 洞渣试样的孔隙率最小、自密实程度最高，可以视为 TBM 洞渣的最优级配。在低含石量条件下，土体颗粒含量高，块石的掺入代替了具有相同重量但颗粒个数更多、比表面积更大的土体颗粒，从而导致单位体积的质量增加；当含石量达到 50% 时，土体颗粒最大程度地充填在块石形成的大孔隙中，形成了粗料骨架结构，最小和最大干密度都达到最大值；当含石量超过 50% 时，块石含量增加，大孔隙增多，土体颗粒无法填满块石间大孔隙，导致最小和最大干密度随着块石含量的增加而减小。

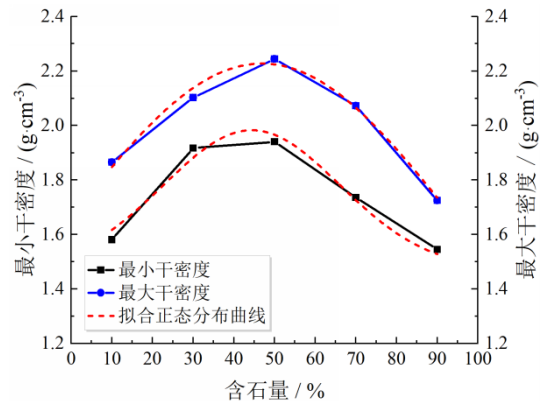


图 4 TBM 洞渣相对密度与含石量关系曲线

Fig. 4 The relationship curve between relative density and rock block proportions of TBM muck

## 3 不同含石量条件下 TBM 洞渣力学特性

### 3.1 试验方案

采用英国 GDS 大型静动三轴试验仪进行三轴压缩试验，配备 GDSLAB 控制系统，可实时记录试验数据，试验精度达千分之一。结合实际工程场景，假设堆渣高度为 10 m、20 m 和 30 m，洞渣重度为 20 kN/m<sup>3</sup>，对应围压分别设置为 100 kPa、200 kPa 和

300 kPa。根据试验方法标准,试样最大粒径应小于剪切盒尺寸的 1/5,即不超过 6 cm。考虑到 TBM 洞渣中大于 6 cm 颗粒的质量占比不足 2%,因此采用剔除法,直接剔除粒径大于 6 cm 的洞渣作为试验材料。

为了更好地评价填料的压实质量,考虑级配的影响,土力学和相关规范中应用相对密度指标 ( $D_r$ )<sup>[23]</sup>来判别填料的密实程度。

$$D_r = \frac{(\rho_d - \rho_{dmin}) \rho_{dmax}}{(\rho_{dmax} - \rho_{dmin}) \rho_d} \quad (1)$$

式中,  $\rho_{dmax}$  为最密实时的干密度,  $\rho_{dmin}$  为最松散时干密度;  $\rho_d$  为实测干密度。

本次力学特性试验首先在原始级配的前提下(含石量 50%)研究块石的定向排列对其力学行为的影响,然后还原现场块石的定向排列,等比例放缩土石比,分别研究含石量为 10%、30%、70%、90%时, TBM 洞渣试样的偏应力-轴向应变曲线、体胀(缩)特性及抗剪强度变化规律。不同含石量下的级配曲线如图 5 所示。每种工况均保持相对密度一致,设定为 0.50,并分别施加 100 kPa、200 kPa、300 kPa 的围压,共进行 15 组试验,具体试验方案见表 1。试样均经过饱和和处理,装样含水率设为天然含水率 6%,以便于击实。

表 1 TBM 洞渣三轴固结排水试验方案

Table 1 Triaxial consolidated drained test scheme for TBM muck

含石量/%	干密度/kg·m <sup>-3</sup>	围压/kPa	放置方式
50	2.09×10 <sup>3</sup>	100、200、300	随机放置
10	1.72×10 <sup>3</sup>	100、200、300	定向放置
30	2.01×10 <sup>3</sup>	100、200、300	定向放置
50	2.09×10 <sup>3</sup>	100、200、300	定向放置
70	1.9×10 <sup>3</sup>	100、200、300	定向放置
90	1.63×10 <sup>3</sup>	100、200、300	定向放置

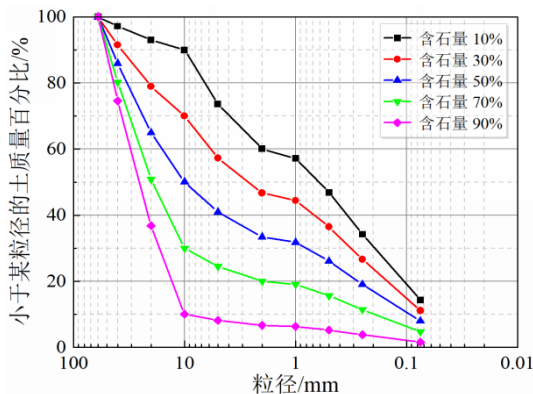


图 5 不同含石量条件下试样的级配曲线

Fig. 5 Gradation curves of soil specimens under different rock block proportions

### 3.2 试验过程

#### (1) 试样准备

试样直径为 300 mm,高度为 600 mm。首先对 TBM 洞渣进行筛分,再根据级配、密度和含水率充分混合搅拌,然后按质量五等分,待装样。

#### (2) 试样制备

为实现压缩过程中实时排水,消除试样内部孔隙水压力影响,底座上放置透水板和土工布。橡胶膜套于底座并用密封圈固定。在底座承台上安装制样筒,固定底部螺丝后,使用真空泵抽除空气。

考虑到 TBM 洞渣堆积体中针片状块石的长轴方向通常与边坡坡面平行的特征,以及弃渣场边坡浅层的最大主应力方向亦与坡面平行<sup>[24]</sup>,本试验自主研发了装填装置(图 6),确保 TBM 块石长轴方向与试验轴向应力方向一致(图 7)。

根据试验设计,将相应质量的混合料分 5 份进行分层制样。为避免洞渣下落堆积形成粒序结构,每层再分 3 次填充,分层击实至 12cm 厚,尽可能提高试样级配均匀性。为防止制样后产生分层,每层击实后均对表面进行抛毛处理。制样完成后,依次放置土工布与透水板,并拆除制样筒。



图 6 块石定向性实现装置  
Fig. 6 The device for realizing rock block orientation features



图 7 块石定向性达成效果  
Fig. 7 The achieved effect of rock block orientation features

#### (3) 试样饱和

使用叉车将压力室放于试样底座,密封后吊装至试验机。采用反压法饱和试样,以 20 kPa 梯度逐级增加反压和围压,并控制两者差值不超过 20 kPa,以防止试样结构破坏。每级压力施加后,待应力稳定再继续加压,直至孔压系数达到 0.95,即试样饱和完成。

#### (4) 试样固结

试验饱和后,将量水管内水位线调整至试样中部,打开压力室排水开关,施加设计围压(100 kPa、200 kPa、300 kPa),进行排水固结。当排水曲线趋于稳定或孔隙水压力完全消散时,试样固结完成。随后,启动仪器,使试样帽、活塞和轴向压力计接触。

#### (5) 试样剪切

关闭孔隙水压力阀门，打开试样两端量水管阀门，启动轴向压力机。采用应变控制方式，在试样顶部施加轴力进行压缩试验，加载速率设为 1 mm/min。当轴向应变达到 20%时，停止加载。

#### (6) 试样结束

试验完成后，保存数据，卸载轴向应力和围压，缓慢排出压力室内的水。随后，吊起压力室，移除乳胶膜，并记录试样的变形破坏特征。

### 3.3 试验结果

#### 3.3.1 偏应力-轴向应变关系

图 8 为含石量 50%TMB 洞渣块石定向放置与随机放置试样的偏应力-轴向应变关系曲线。由图可知，在低围压（100 kPa）条件下，试样受到的约束较小。对于块石定向放置的试样，由于块石长轴方向与加载方向平行，有助于形成更有效的荷载传递路径，减小应力扩散，从而显著提高试样强度。相比之下，随机放置试样中，块石更容易发生微小转动，导致强度降低。因此，在低围压条件下，块石定向放置试样的峰值偏应力显著高于随机放置试样。随着围压的增加（200 kPa），块石随机放置试样中块石之间的咬合、嵌套以及“互锁”效应显著增强，强度迅速提升，峰值偏应力略大于定向放置试样。随着围压进一步增加（300 kPa），随机放置试样的块石之间多以点-点接触，产生明显的应力集中现象，更多块石发生破碎，曲线开始跌落，峰值偏应力略有降低。这一现象也被称为“锁固段”解锁，其强度曲线被称为“应变锁固”模型<sup>[25]</sup>。

图 9 为不同含石量下 TMB 洞渣块石定向放置试样的偏应力-轴向应变关系曲线。由图可知，在不同含石量和不同围压条件下，所有试验均未表现出明显的应变软化现象。曲线大致可划分为以下四个阶段：

- （1）剪密阶段：该阶段主要发生于剪切初期，表现为剪应力快速增长，且应力-应变曲线呈向上凸起；
- （2）弹性阶段：该阶段发生在试样达到峰值应力之前，剪应力增长速度放缓，应力-应变曲线表现为线性增长；
- （3）应变硬化阶段：该阶段发生在试样达到峰值应力之前，剪应力增长速率逐渐变小，但剪应

力仍在增加，试样未发生明显破坏；（4）应变软化或塑性硬化阶段：在围压为 100 kPa 时，含石量 50%的试样表现出一定的应变软化特征；而在高围压条件下，各含石量的应力-应变曲线均表现出明显的塑性应变和应变硬化破坏，试样达到峰值强度并保持稳定，体现出块石间相互咬合所产生的结构效应。

含石量作为土石混合体的重要指标，对其力学特性影响显著：在加载初期，应力-应变曲线之间基本重合，呈线性增长，试样处于弹性变形阶段；随着剪切的持续进行，试样开始出现塑性变形，并逐渐形成曲折的破坏面，应力-应变曲线开始产生显著差异。这说明块石的掺入导致试样结构发生显著变化：由素土逐渐转化为“土夹石”或“石夹土”状态。当含石量较低时，块石主要是以悬浮状态随机分散在土体基质中，含石量的增加导致块石间接触增多，土体结构逐步转化为骨架结构，块石间相互摩擦、咬合和嵌套极大地影响了 TBM 洞渣的强度，提升了剪应力峰值强度。然而，在较高含石量条件下，试样的孔隙率较大，密实程度较低，细颗粒难以有效充填块石内部孔隙，因此当含石量增加到 90%时，剪应力峰值强度有所降低，出现强度峰值现象。此外，相同围压条件下，随着含石量的增加，试样的变形模量显著增大；同时，随着剪切的进行，试样较快地从线弹性变形过度到弹塑性变形。

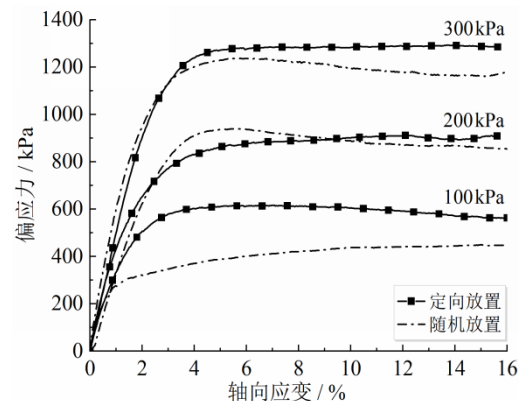
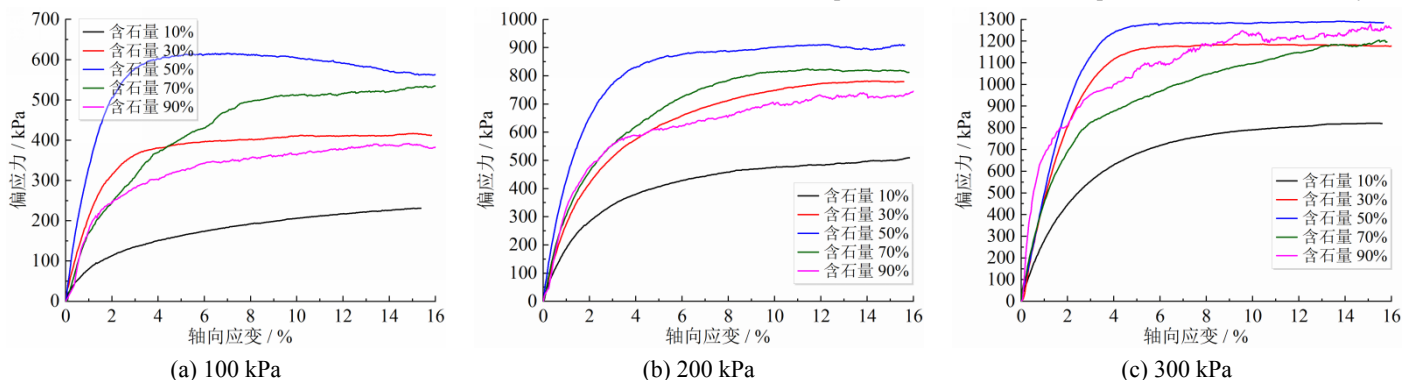


图 8 块石定向与随机放置试样的偏应力-轴向应变关系曲线  
Fig. 8 The relationship curve between deviator stress and axial strain of specimens with rock blocks placed oriented or randomly



(a) 100 kPa

(b) 200 kPa

(c) 300 kPa

图9 不同含石量条件下的偏应力-轴向应变关系曲线

Fig. 9 The relationship curve between deviator stress and axial strain under different rock block proportions

## 3.3.2 体积应变-轴向应变关系

图10为含石量50%条件下块石定向与随机放置试样的偏应力-轴向应变关系曲线。由图可知,低围压(100 kPa)条件下,块石随机放置试样在产生较小的剪缩量后,迅速转变为剪胀,并产生较大的剪胀量。这主要是因为块石随机放置试样的内部孔隙率相对较小,初期剪缩较快完成;随着加载持续进行,试样内部的块石多以点-点接触,且低围压条件下外部约束不足,块石之间容易发生微小转动,进而产生较大的剪胀量。中等围压(200 kPa)条件下,随机放置试样内部块石间的咬合、嵌套和“互锁”效应显著增强,减小了滑移与转动的发生,导致剪缩与剪胀量明显小于块石定向放置的试样。高围压(300 kPa)条件下,点-点接触的块石产生更多破碎,导致剪胀量略有增加。

图11为不同含石量下TBM洞渣块石定向放置试样的体积应变-轴向应变关系曲线。由图可知,加载初期,试样的体积应变-轴向应变关系曲线较为平缓,表明试样呈现均质体的变形特征。随着剪切的持续进行,直至接近峰值强度时,试样内部原本相互嵌套、咬合的颗粒发生错动,产生较大的位移,导致曲线开始出现不同幅度的波动。随着围压的增加,这种

波动会发生得更晚且波动幅度更大。

在低围压(100 kPa)条件下,体积应变随着轴向应变的增大先增大后减小,呈现剪胀特性。随着含石量的增加,试样更快地由剪缩转变为剪胀,剪胀特性也更加显著;在中等和高围压(200 kPa, 300 kPa)条件下,体积应变随着轴向应变的增大持续增大,但增长速率会逐渐减缓,最终趋于稳定,表现为以剪缩特性为主。不同含石量的剪缩程度相近,这表明试样内部已达到相似的压实程度,达到了“临界配位数”。

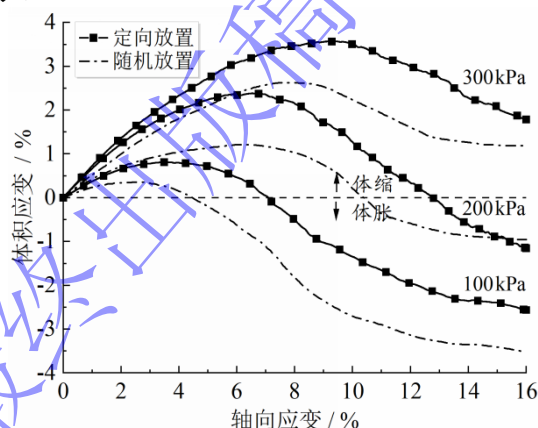


图10 块石定向与随机放置试样体积应变-轴向应变关系曲线  
Fig. 10 The relationship curve between volumetric strain and axial strain of specimens with rock blocks placed oriented or randomly

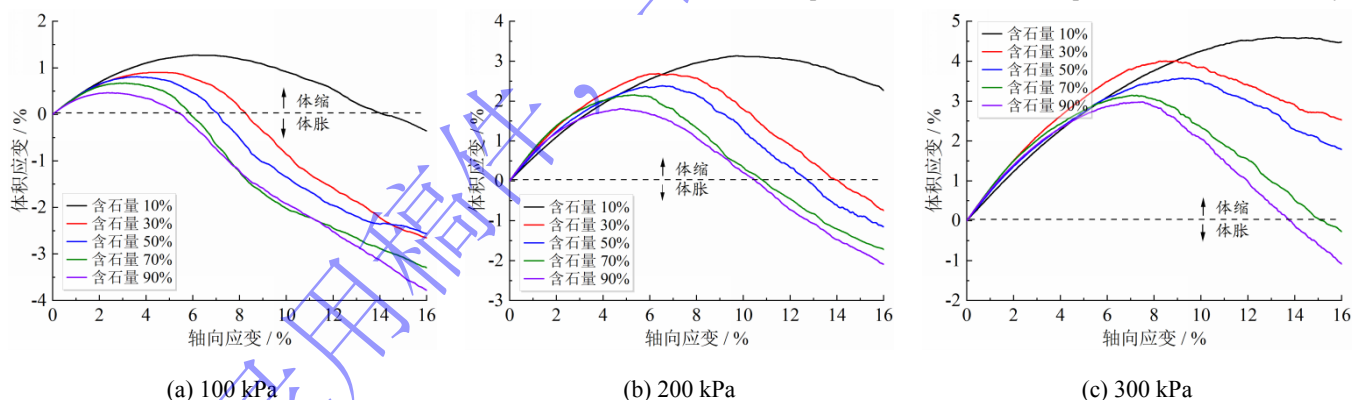


图11 不同含石量条件下的体积应变-轴向应变关系曲线

Fig. 11 The relationship curve between volumetric strain and axial strain under different rock block proportions

整体而言,围压是影响TBM洞渣变形特性的重要外部因素。随着围压的增加,试样由剪胀向剪缩转变。而含石量则是影响TBM洞渣变形特性的重要内部因素。含石量越低,在较高围压条件下通常表现出更为显著的剪缩特性;而含石量越高,在较低围压下则更容易发生明显的剪胀特征。

## 3.3.3 强度变化规律

图12为不同含石量和不同围压条件下TBM洞渣块石定向放置试样的抗剪强度。由图可知,在不同围压条件下,TBM洞渣的抗剪强度随着含石量的增

加呈现出先上升后降低的趋势,存在明显的强度峰值。只有在高围压(300 kPa)条件下,含石量为90%的试样的抗剪强度相较于含石量为70%的试样有所提升。这主要是因为高围压条件下,试样的密度增加,进一步增强了块石与块石间的互锁、嵌套效应。同时,伴随块石破碎程度的增加,填充了试样中部分空隙,进而在一定程度上提升了该围压条件下高含石量试样的抗剪强度。

图13为不同含石量下TBM洞渣块石定向放置试样的黏聚力与内摩擦角变化情况。由图可知,随着

含石量的增加，试样黏聚力和内摩擦角的变化规律相似，均呈先增大后降低的趋势，存在明显的峰值。

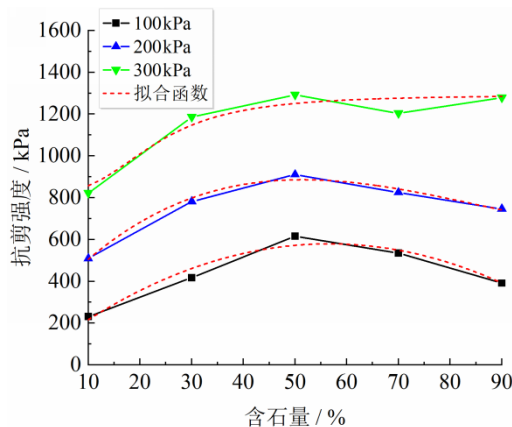


图 12 不同含石量条件下 TBM 洞渣抗剪强度曲线

Fig. 12 The shear strength curve of TBM muck under different rock block proportions

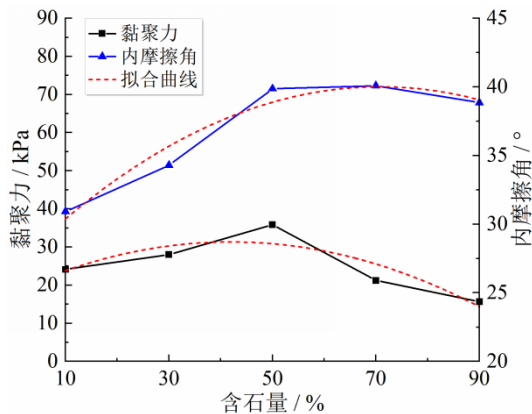


图 13 不同含石量条件下 TBM 洞渣黏聚力与内摩擦角曲线

Fig. 13 The curves of cohesion and internal friction angle of TBM muck under different rock block proportions

### 3.3.4 变形破坏特征

图 14 为低围压（100kPa）条件下，TBM 洞渣块石定向与随机放置试样的变形破坏特征。由图可知，所有试样在脱胶后仍保持良好的完整性，不易垮塌解

体，各试样中部凸出，侧面发育多条细微的剪切裂缝，最终表现为整体的剪切破坏。含石量为 10% 的块石定向放置试样所产生的体胀变形远小于其他四种含石量的块石定向放置试样，这与前文分析的体变特征一致。

在每种含石量下，块石定向放置试样侧壁均出现多处不规则孔隙和由于压缩挤压产生的起伏凹陷。具体而言，含石量 30%、50%、70% 试样的起伏凹陷数量较多，但深度较浅，约为 0.1~2 mm，面积约 15~38 mm<sup>2</sup>。而含石量 10% 和 90% 的试样由于压缩挤压产生的起伏凹陷数量较少，且均匀分布在试样上中下部，深度较大，约为 0.2~3 mm。整体来看，随着含石量的增大，试样的破坏模式逐渐从沿单侧对角线的剪切破坏转变为沿双侧对角线的“X 型”共轭剪切破坏。含石量为 50% 的定向放置试样表现为沿单侧对角线的剪切破坏，而相同含石量的块石随机放置试样表现为沿双侧对角线的“X 型”共轭剪切破坏。

受 TBM 洞渣中针片状块石的影响，试样内部结构表现出显著的不均匀性。在三向应力作用下，块石与周围土体的接触界面易形成应力集中，从而引发非协调变形，导致裂纹沿着接触界面扩展，呈现多样化的方向特征。裂纹分布在不同区域内高度不均匀，甚至出现一定程度的分层现象（图 15a）。在轻微扰动下，试样沿对角线破裂解体，破裂面呈现凹凸起伏的粗糙特征，并夹杂少量挤压破碎的块石（图 15b）。在高围压条件下，随机放置的试样中块石破碎比例显著增加（图 15c），破碎的块石在剪切带附近广泛分布，且块石表面划痕现象明显。这表明，相对于定向放置试样，随机放置试样在围压增加过程中表现出更强的嵌套、咬合和“互锁”作用，从而在加载时更易发生破碎。

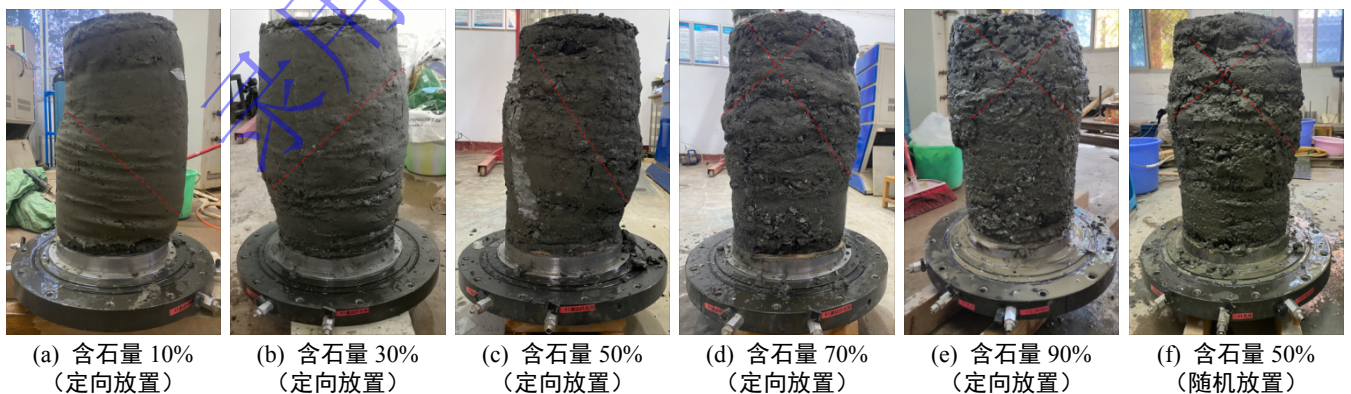


图 14 TBM 洞渣宏观变形破坏特征（围压 100kPa）

Fig. 14 Macroscopic deformation and failure characteristics of TBM muck (confining pressure 100 kPa)

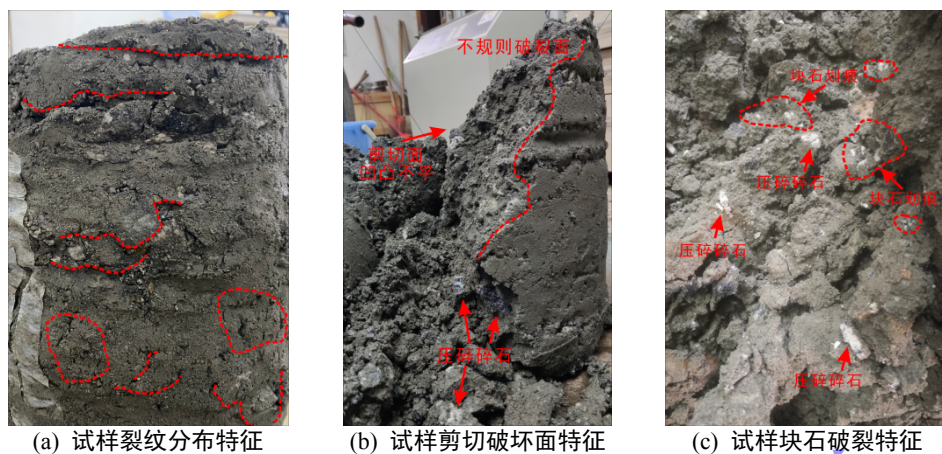


图 15 试样细部破坏特征  
Fig. 15 Local failure characteristics of specimens

## 4 讨论

通过对不同含石量 TBM 洞渣的密实度和三轴试验结果的分析发现,随着含石量的变化,试样的土体结构会发生显著改变。当试样含石量为 50% 时,其相对密度和抗剪强度均达到峰值。

当含石量低于最优含石量 (50%) 时,试样中细颗粒含量较高,土体结构表现出悬浮密实特征 (图 16a),以土-土接触为主,土-石接触为辅,石-石接触较少。在低含石量条件下,试样的强度主要受细颗粒胶结作用的影响。随着含石量的增加,试样的相对密度提高,孔隙率减小,块石形成的骨架效应增强,从而提升试样的抗剪强度。

当含石量达到最优含石量 (50%) 时,细颗粒完全填充块石间的孔隙,块石之间形成了稳定的支撑性骨架,石-石接触紧密,土体结构表现出骨架密实特征 (图 16b)。在此条件下,细颗粒的胶结作用和块石的骨架效应共同发挥作用,试样的抗剪强度达到峰值。

当含石量超过最优含石量 (50%) 时,随着块石的持续加入,试样内部骨架结构发生重组,细颗粒含

量迅速减少,难以充满块石间的孔隙,大量细颗粒堆积在块石孔隙底部,难以有效抵抗变形,土体结构表现出骨架孔隙特征 (图 16c)。在该结构下,剪切破坏易沿块石间孔隙发育,导致试样抗剪强度降低。

此外,由于 TBM 洞渣主要由针片状块石组成,其堆积过程中形成的块石定向排列结构进一步影响了土体的变形强度规律和破坏特征。当块石定向排列时,块石之间以面-面接触为主,在压缩过程中容易发生滑动摩擦,一定程度上增强试样的抗剪强度 (图 17a)。然而,随着围压的提升,滑动摩擦力的提升幅度远低于随机放置试样中块石之间咬合、嵌套和“互锁”作用的提升幅度,因此块石定向放置试样的抗剪强度提升幅度相对较小。

对于随机放置的试样,在低围压条件下,块石受外部约束较小,容易发生旋转和位移,无法提供有效的强度支撑,导致试样的抗剪强度较低。随着围压的增加,块石间的咬合、嵌套与“互锁”效应显著增强,抗剪强度迅速提升 (图 17b)。然而,在高围压条件下,块石间的点-点接触引起应力集中,超过片状块石的临界强度,导致块石破碎现象显著增多,从而使试样的抗剪强度出现略微下降 (图 17c)。

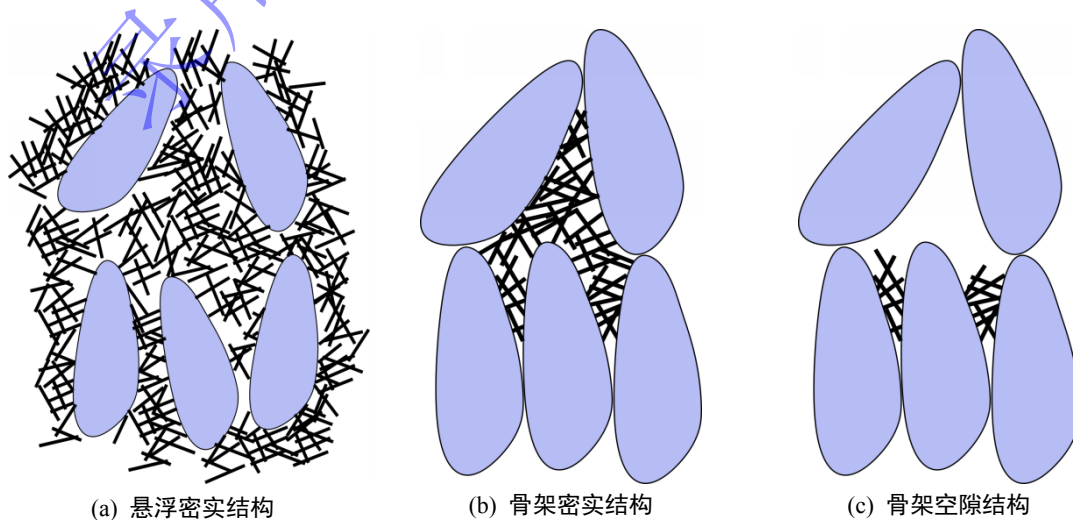


图 16 不同含石量条件下 TBM 洞渣结构特征

Fig. 16 Variations in TBM muck soil structure under different rock block proportion

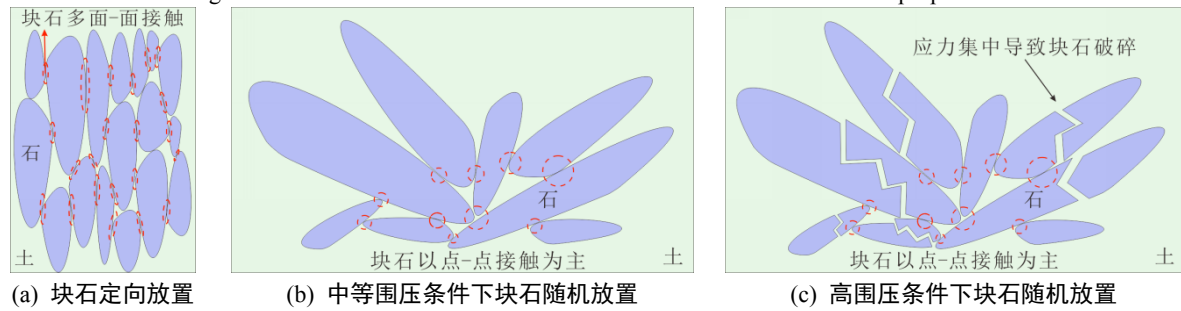


图 17 片状块石间相互作用类型

Fig. 17 Types of interaction among flake-shaped rock blocks

## 5 结论

本文通过物理模拟揭示了 TBM 洞渣的堆积结构特征, 结合 GDS 大型三轴试验, 系统分析了 TBM 洞渣的变形破坏特征, 探讨了含石量、块石定向性及围压对其力学性质的影响机制, 主要得到以下结论:

1、TBM 洞渣中块石多呈针片状, 倾倒堆积时易发生滑移, 并产生显著的粒径分选作用, 形成具有块石定向排列和正粒序分布的堆积结构。

2、TBM 洞渣的相对密度与抗剪强度随含石量增加先升高后降低, 呈现出明显的峰值特征, 其本质源于结构的演变, 即由初始悬浮密实结构, 经最优骨架密实结构, 最终过渡至骨架孔隙结构。

3、由于 TBM 洞渣的块石呈定向排列, 其接触方式以面-面接触为主, 块石间的咬合与嵌套作用减弱, 压缩过程中更易发生滑动摩擦, 从而导致 TBM 洞渣整体强度较低, 变形量较大。

4、在低围压条件下, TBM 洞渣块石的定向排列有助于荷载传递, 减少应力扩散并提高强度。但随着围压升高, 其结构缺陷抑制了块石间的咬合与嵌套作用的发挥, 限制了强度增长, 使其劣势逐渐凸显。

## 参考文献:

- [1] 周中, 傅鹤林, 刘宝琛, 谭捍华, 龙万学. 土石混合体渗透性能的正交试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1134-1138. (ZHOU Zhong, FU Helin, LIU Baochen, TAN Hanhua, LONG Wanxue. Orthogonal tests on permeability of soil-rock-mixture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1134-1138. (in Chinese))
- [2] 金磊, 曾亚武, 程涛, 李晶晶. 基于格子 Boltzmann 方法的土石混合体的渗流特性研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(4): 669-677. (JIN Lei, ZENG Yawu, CHENG Tao, LI Jingjing. Seepage characteristics of soil-rock mixture based on lattice Boltzmann method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(4): 669-677. (in Chinese))
- [3] WEI H Z, XU W J, XU X F, MENG Q S, WEI C F. Mechanical Properties of Strongly Weathered Rock-Soil Mixtures with Different Rock Block Contents[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(5): 4018026.
- [4] 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 and Mining Sciences, 2011, 48(8): 1235-1247.
- [5] 金磊, 曾亚武, 李欢, 李晶晶. 基于不规则颗粒离散元的土石混合体大三轴数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 829-838. (JIN Lei, ZENG Yawu, LI Huan, LI Jingjing. Numerical simulation of large-scale triaxial tests on soil-rock mixture based on DEM of irregularly shaped particles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(5): 829-838. (in Chinese))
- [6] 张强, 汪小刚, 赵宇飞, 周家文, 孟庆祥, 周梦佳. 基于围压柔性加载的土石混合体大型三轴试验离散元模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8): 1545-1554. (ZHANG Qiang, WANG Xiaogang, ZHAO Yufei, ZHOU Jiawen, MENG Qingxiang, ZHOU Mengjia. Discrete element simulation of large-scale triaxial tests on soil-rock mixtures based on flexible loading of confining pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8): 1545-1554. (in Chinese))
- [7] XU W J, ZHANG H Y. Research on the effect of rock content and sample size on the strength behavior of soil-rock mixture[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(3): 2715-2726.
- [8] 刘飞禹, 孔剑捷, 姚嘉敏. 含石量和压实度对格栅-土石混合体界面剪切特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(5): 903-911. (LIU Feiyu, KONG Jianjie, YAO Jiamin. Effects of

- rock content and degree of compaction on interface shear characteristics of geogrid-soil-rock mixture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(5): 903-911. (in Chinese))
- [9] 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. Effect of gravel content on shear behavior of sand-gravel mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 93-102. (in Chinese))
- [10] XU S P. Study on Soil-Stone Interaction between Strength and Deformation Characteristics of Rock-soil Mixture[J]. Chemical engineering transactions, 2018, 66: 457-462.
- [11] 杨忠平, 李进, 蒋源文, 胡元鑫, 赵亚龙. 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. (YANG Zhongping, LI Jin, JIANG Yuanwen, HU Yuanxin, ZHAO Yalong. Influences of stone content on shear mechanical properties of soil-rock mixture-bedrock interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(8): 1443-1452. (in Chinese))
- [12] 章涵, 向国梁, 王乐华, 邓华锋, 赵二平. 基于三维模型构建新方法的块石形状效应下S-RM宏细观剪切力学行为[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(10): 2030-2044. (ZHANG Han, XIANG Guoliang, WANG Lehua, DENG Huaifeng, ZHAO Erping. Effect of block form on the shear macro-and meso-mechanical behaviors of S-RM based on 3D novel modelling approach[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(10): 2030-2044. (in Chinese))
- [13] 王蕴嘉, 宋二祥. 堆石料颗粒形状对堆积密度及强度影响的离散元分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2416-2426. (WANG Yunjia, SONG Erxiang. Discrete element analysis of the particle shape effect on packing density and strength of rockfills[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(6): 2416-2426. (in Chinese))
- [14] WANG S Y, CHEN G X, ZHANG L K, YUAN J. Triaxial Discrete Element Simulation of Soil-Rock Mixture with Different Rock Particle Shapes under Rigid and Flexible Loading Modes[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(8): 1-13.
- [15] ZHANG H Y, XU W J, YU Y Z. Triaxial tests of soil-rock mixtures with different rock block distributions[J]. Soils and Foundations, 2016, 56(1): 44-56.
- [16] QIAN J F, YAO Y S, LI J, XIAO H B, LUO S P. Resilient Properties of Soil-Rock Mixture Materials: Preliminary Investigation of the Effect of Composition and Structure[J]. Materials, 2020, 13(7): 1658.
- [17] WANG P F, ZHANG X Y. Experimental Study on Seepage Characteristics of a Soil-Rock Mixture in a Fault Zone[J]. Fluid Dynamics & Materials Processing, 2022, 18(2): 271-283.
- [18] LUAN B Y, ZHOU W, MENG X, LU X, LIU Z C. Study on Permeability of Soil-Rock Mixture in Water-Blocking Layer of Open-Pit Coal Mine Dump Site[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 1925849.
- [19] AN L S, ZHAO X X, LI D W, LIU Y, LI P, GUO L, WANG L N. Cyclic and Post-Cyclic Behaviors of Stabilized Sand-Containing Soft Soil in Coastal Areas[J]. Sustainability, 2022, 14(22): 15017.
- [20] Medley E W. The engineering characterization of melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks)[D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 1994.
- [21] 王盛年, 朱银, 李跃. 考虑结构构成的冰水堆积体变形破坏分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 3262-3270. (WANG Shengnian, ZHU Yin, LI Yue. Deformation and failure analysis of the glacial deposit considering structure and composition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1): 3262-3270. (in Chinese))
- [22] 赵晓彦, 万宇豪, 张肖兵. 汶马高速公路千枚岩堆积体岩块定向性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 175-184. (ZHAO Xiaoyan, WAN Yuhao, ZHANG Xiaobing. Experimental study of fragment orientation of phyllite talus at Whenchuan-Maerkang expressway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 175-184. (in Chinese))
- [23] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学(第3版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2022. (LI Guangxin, ZHANG Bingyin, YU Yuzhen. Soil Mechanics (3rd ed)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2022. (in Chinese))
- [24] 张倬元, 王仕天, 王兰生, 黄润秋, 许强, 陶连金. 工程地质分析原理(第4版)[M]. 北京:地质出版社, 2016. (ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng, HUANG Runqiu, XU Qiang, TAO Lianjin. Principles of engineering geology analysis (4th ed)[M]. Beijing: Geology Press, 2016. (in Chinese))
- [25] 李志清, 文吉英, 姚国明, 周应新, 胡瑞林, 胡峰. 土石混合体大型直剪设备研发与应变锁骨强度特征试验研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(6): 1975-1988. (LI Zhiqing, WEN Jiying, YAO Guoming, ZHOU Yingxin, HU Ruilin, HU Feng. Development on large direct shear equipment for soil-rock mixture and experimental study on strength characteristics of strain locking[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(6): 1975-1988. (in Chinese))

录用稿件，  
非最终出版稿

录用稿件, 非最终出版稿