

文章编号: 1005-0523(2024)06-0001-10



基于离散元法的土石混合体力学特性数值分析

汤新¹, 蒋亚龙¹, 孙洋², 吴亮秦¹, 圣小珍³, 郭文杰¹, 王建立⁴

(1. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 江西省交通科学研究院有限公司, 江西 南昌 330200; 3. 上海工程技术大学城市轨道交通学院, 上海 201620; 4. 隔而固(青岛)振动控制有限公司, 山东 青岛 266108)

摘要:【目的】探究断层破碎带内部土石混合体力学特性对隧道开挖稳定性的影响。【方法】采用离散元软件PFC 3D构建黏性土石混合体精细化模型, 结合大型三轴压缩试验结果进行细观参数标定, 开展系统性研究, 分析不同因素对土石混合体的宏观力学特性的影响。【结果】随着含石量的增大, 块石与土体基质逐步形成块石-土体骨架结构, 抗剪强度快速增加; 当块石倾角从0°增加到90°时, 土石混合体抗剪强度呈现先下降后上升的趋势, 在45°左右达到最低值; 在高围压的作用下, 不同倾角的块石整体移动和旋转差异更加显著, 对试样强度影响较大。【结论】无论土石混合体内土体基质是何种性质, 围压、含石量、块石倾角对土石混合体力学特性影响均较为显著, 断层破碎带区域施工需结合上述因素进行综合分析, 总结合理的超前支护方案。

关键词: 土石混合体; 力学特性; 离散元法; 数值分析

中图分类号: [U25]; TU411

文献标志码: A

本文引用格式: 汤新, 蒋亚龙, 孙洋, 等. 基于离散元法的土石混合体力学特性数值分析[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(6): 1-10.

Numerical Analysis of Mechanical Properties of Soil-Rock Mixture Based on Discrete Element Method

Tang Xin¹, Jiang Yalong¹, Sun Yang², Wu Liangqin¹, Sheng Xiaozhen³, Guo Wenjie¹, Wang Jianli⁴

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Jiangxi Transportation Research Institute Co., Ltd., Nanchang 330200, China; 3. School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 4. GERB (Qingdao) Vibration Control Co., Ltd., Qingdao 266108, China)

Abstract: 【Objective】In order to study the influence of mechanical properties of soil-rock mixture on the stability of tunnel excavation when tunnel passes through fault fracture zone. 【Method】In this paper, discrete element software PFC 3D are used to construct a fine model of cohesive soil-rock mixture, and the mesoscopic parameter calibration is carried out in combination with the results of large-scale triaxial compression tests to carry out systematic research, and the macro-mechanical properties of non-cohesive soil-rock mixture are compared with those studied by existing scholars, so as to analyze the influence of different factors on the macro-mechanical properties of soil-rock mixture. 【Result】With the increase of volumetric block proportion, the relationship be-

收稿日期: 2024-04-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972291, 52468023); 国铁集团研发计划重点课题(N2023G040); 江西省自然科学基金项目(20224BAB204064); 江西省交通运输厅科技项目(2022Z0001, 2022Z0002); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2200607)

tween the block and the soil matrix gradually changes to the block-soil skeleton structure, and the shear strength increases rapidly; When the block orientation angle is between 0° and 90° , the shear strength of the soil-rock mixture decreases first and then increases, reaching the lowest value at about 45° ; Under the action of high confining pressure, the difference of the overall movement and rotation of the block is more significant, and the block orientation angle of the block has a greater influence on the strength of the sample. **【Conclusion】** Regardless of the nature of the soil matrix in the soil-rock mixture, confining pressure, stone content and stone inclination angle have significant effects on the mechanical properties of the soil-rock mixture. Therefore, the construction of the fault fracture zone should be combined with the above factors for comprehensive analysis, and a reasonable advance support scheme should be summarized.

Key words: soil-rock mixture; mechanical properties; discrete element method; numerical analysis

Citation format: TANG X, JIANG Y L, SUN Y, et al. Numerical analysis of mechanical properties of soil-rock mixture based on discrete element method[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(6): 1-10.

【研究意义】深埋长隧道遭遇断层破碎带时,极易发生掌子面失稳,突水涌泥,支护结构破坏等一系列工程问题^[1-3]。断层破碎带在本质上属于 Xu 等^[4-6]定义的土石混合体(soil-rock mixture, SRM),是一种非均质多相材料,其力学性能往往决定了工程过程中断层破碎带的力学行为特征,对其进行研究具有重要的工程意义。

【研究现状】由于断层破碎带内岩块和基质土存在显著不同的钻探阻力,难以取得完整的试样。因此,国内外学者主要通过室内试验及数值模拟等手段对土石混合体力学特性影响因素开展研究。

在室内试验方面,Vallejo 等^[7]开展了大型室内直剪试验,研究土石混合物的含石量和级配对试件抗剪强度、变形机制和剪切破坏特征的影响,发现土石混合物的抗剪强度与含石量关系密切。Xu 等^[8]对碎石进行了大型直剪试验,发现块石尺寸和比例控制着土石混合体的变形和断裂机制。Tao 等^[9]通过不同块体含量的三轴压缩试验验证了中尺度数值方法的有效性和合理性,结果表明,块石可以提高土石混合体的强度。

尽管上述学者采用室内试验的手段,在研究断层破碎带土石混合体力学性能影响因素方面取得了一定的成果。但断层破碎带内部结构复杂,室内试验得出的结论往往只适用于个别特定工况,且可研究的影响因素有限。数值试验成为一种新兴的试验手段深受国内外研究者的青睐^[10-12],其为进一步研究土石混合体的细观力学行为和变形破坏机

制提供了有力手段。赫建明等^[13]建立了土石混合体的二维颗粒流随机结构模型,分析了结构效应对土石混合体变形破坏的影响。徐文杰等^[14]基于石混合体随机细观结构模型生成技术开发了分析软件 R-SRM-2D。张佩等^[15]采用有限差分软件 FLAC,将土石混合体视为由块石和土体基质组成的两相复合材料,采用椭圆形描述块石,建立土石混合体细观分析模型,分析块石长轴倾角对主应力差值、内摩擦角、黏聚力的变化规律,并提出了块石长轴倾角描述主应力差值、内摩擦角、黏聚力发展关系的公式。Napoli 等^[16-17]采用二维有限元(finite element method, FEM)分析方法,对土石混合体块石含量、块石倾角等因素对边坡稳定性的影响进行了广泛的统计研究。

总的来说,国内外学者已经采用室内试验及数值模拟的手段研究了含石量、块石倾角、块石尺寸等因素对土石混合体力学性能的影响,但仍存在以下问题:

1) 断层破碎带内部块石尺寸较大,粒径约为 25~270 mm^[18],采用常规三轴压缩试验必然会出现由于尺寸效应带来的误差,需要开展更大尺度的三轴压缩试验;

2) 土石混合体试样制备过程中,块石倾角难以精准控制,试验准确性不足,需要开展不同块石倾角的数值分析进行补充;

3) 目前研究尚未将砂性与黏性土石混合体进行对比分析,两者宏观力学特性具有一定差异,有

必要针对其力学特性进行对比分析。

【创新特色】综上,本研究的特色在于采用离散元软件PFC 3D构建土石混合体精细化数值模型,基于大型三轴压缩试验结果标定模型细观参数并与已有学者研究^[19]的砂性夹泥岩体宏观力学特性进行对比。**【关键问题】**研究不同块石含量、不同倾角等因素对黏性夹泥岩体力学性能的影响,总结土石混合体宏观力学性能的影响因素及变化规律。

1 大型三轴压缩试验

以膨润土及水泥为骨料,配以拌和水,制备高强度浆体作为基质,与块石混合制备黏性土石混合体,开展尺寸为500 mm×1 000 mm(直径×高度)的大型三轴压缩试验。研究围压、含石量(P_{BV} ,块石体积分数)、块石倾角对土石混合体力学性质的影响,

同时将试验得到的偏应力-轴向应变曲线为参考依据,对后续模型的细观参数进行标定。

图1为块石倾角为30°时,不同围压条件下各含石量的偏应力-轴向应变曲线。由图1可以看出,所有曲线均呈现出应变硬化特征。随围压增加,各含石量试样的主应力差值均有所提升,其中含石量为0.6的试样增加最为明显,这可能是因为其内部块石含量较多,在高围压条件下的块石咬合碰撞现象更加剧烈^[20],主应力差值也随之增加。当含石量从0.2增加至0.4时,主应力差值增量较少,而当含石量增加至0.6时,主应力差值大幅提升,这符合部分学者^[21-22]提出的S形强度曲线的结论。出现这种情况的原因可能是 P_{BV} 达到0.4后,其与土体基质逐步形成块石-土体骨架结构,这种结构相对土体基质来说,抵抗荷载的能力更强。

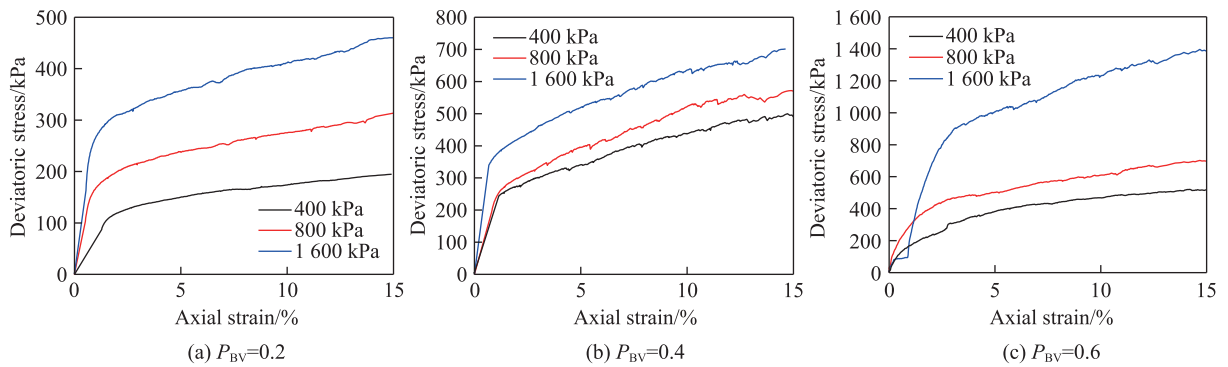


图1 不同含石量的偏应力-轴向应变曲线

Fig. 1 Deviatoric stress-axial strain curve with different P_{BV}

2 离散元数值模型构建

2.1 PFC 3D土体颗粒及块体填充

试验用基质的粒径设置为0.1~5 mm。在PFC 3D软件模型中,选择球体(Ball)来模拟基质黏土颗粒,刚性块(R_{block})则代表块体。

对于黏土颗粒,PFC 3D主要通过调节孔隙率来控制颗粒数目。相对密度 D_r ,孔隙比 e 以及孔隙率 n 之间的关系如

$$e = e_{\max} - (e_{\max} - e_{\min})D_r \quad (1)$$

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (2)$$

式中: e 为基质孔隙比, $e_{\max}$ 为基质最大孔隙比; $e_{\min}$ 为基质最小孔隙比; D_r 为基质相对密度; n 为基质孔隙率。本试验取 $D_r=0.3$, $n=0.43$,均为无量纲。

针对块石而言,本研究设计一个长宽高比为

2:1:1的 R_{block} 长方体块体模板,如图2。通过类似颗粒生成技术,可以控制 R_{block} 的长轴为8 mm。块石孔隙率 n_{clump} 与含石量 w 之间存在以下关系

$$n_{clump} = 1 - w \quad (3)$$

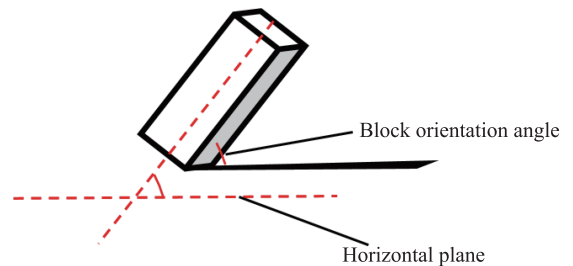


图2 R_{block} 模板及块石倾角定义

Fig. 2 R_{block} template and definition of block orientation angle

2.2 柔性颗粒膜伺服

在PFC 3D模型中,有两种伺服方式:刚性伺服和柔性颗粒膜伺服。在颗粒流模拟研究中,通常使用刚性墙体施加围压,这种建模方式相对简单,但会限制试样的横向变形。为尽可能真实地模拟实际情况,参照室内三轴试验中使用乳胶模拟物施加围压的方法,选用柔性颗粒膜伺服方法(图3)。



图3 柔性颗粒膜模拟

Fig. 3 Simulation of flexible particulate membrane

2.3 施加恒定围压及加载

为了确保试样受到稳定的侧向压力,必须通过PFC 3D软件模型的伺服控制系统精确调控墙体移动的速度,以达到预定侧向压力。

当围压达到预定值后,通过控制上下加载板速度,实现轴向加载。具体流程如下:①创建刚性墙体;②生成分层颗粒样本并进行压缩;③使用预压达到设定值;④移除刚性墙,生成柔性膜,⑤轴向加载。黏性土石混合体三轴数值模型如图4所示。

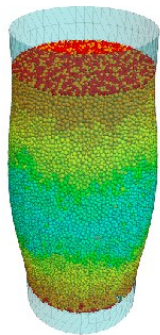


图4 黏性土石混合体三轴数值模型

Fig. 4 Triaxial numerical model for cohesive SRM

2.4 加载速率确定

PFC 3D数值模型中的颗粒较小,过快的加载速率可能会增加模型的惯性效应,从而影响模型的准静态平衡;反之,过慢的加载速率可能会导致计算时间过长。在数值试验中,需确保试样在加载过程中处于准静态状态,进而忽略加载速率带来的影响。为了提高计算效率,数值试验的加载速率通常大于室内试验的加载速率。在本研究中,本文选择了5种不同的加载速率,即0.25,0.20,0.15,0.10,0.05 m/s。在保持其他参数一致的情况下,进行的三轴试验模拟结果如图5所示。结果表明,当加载速率大于等于0.20 m/s时,试样的抗剪强度显著增加。而在加载速率为0.15,0.10,0.05 m/s时,模型计算结果的差异相对较小。为平衡模型计算精度和计算时间,本模型选择0.15 m/s的加载速率进行模拟。

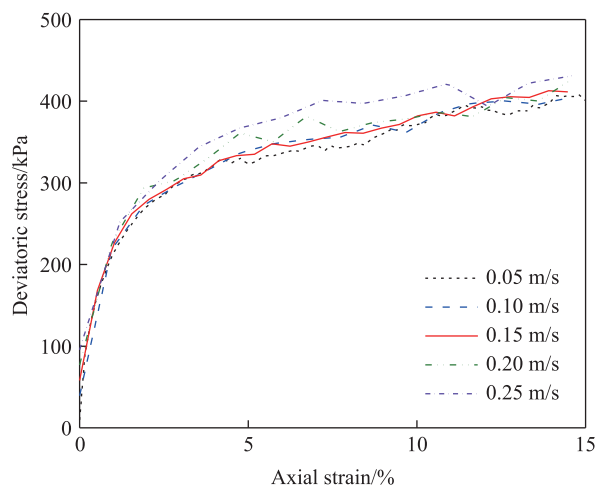


图5 不同加载速率下偏应力-轴向应变曲线

Fig. 5 Deviatoric stress-axial strain curve under different loading rates

2.5 黏性土石混合体数值模型建立

构建 $P_{BV}=0.4$,块石倾角为 30° 的黏性土石混合体三轴数值模型,考虑颗粒流模型的宏观和微观参数影响规律,基于大型三轴压缩试验结果标定模型细观参数,如表1所示。标定完成后,将模型计算结果与室内试验结果进行对比,设置15%为轴向应变终止值,得到一系列数值模拟结果,如图6所示。由图6可知数值试验得到的试样偏应力-轴向应变曲线与室内试验结果吻合,试样破坏形态与室内试验也基本一致。

表1 黏性土石混合体试样的细观力学参数
Tab.1 Mesoscopic mechanical parameters of cohesive SRM

Item	Density/ (kg/m ³)	Contact stiffness/(N/m)		Bonding strength/N		Friction coefficient
		Normal	Tangential	Normal	Tangential	
Soil mixture	1 920	5.0×10 ⁶	2.0×10 ⁶	3.0×10 ²	3.0×10 ²	—
Rock block	2 890	1.0×10 ⁸	1.0×10 ⁸	—	—	1.00
Soil mixture-rock block	—	4.8×10 ⁶	1.9×10 ⁶	0	0	0.45
Membrane	1 500	7.0×10 ⁶	4.7×10 ⁶	1.0×10 ³⁰⁰	1.0×10 ³⁰⁰	0

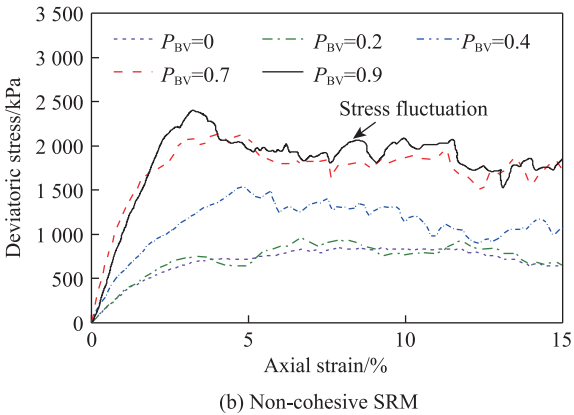
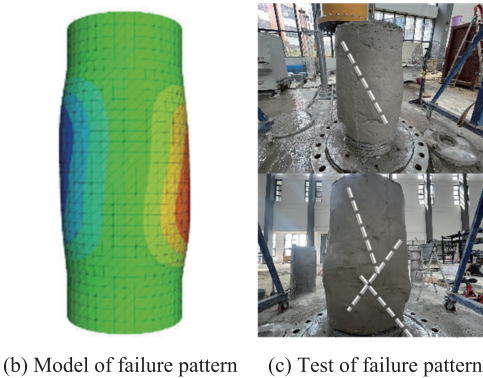
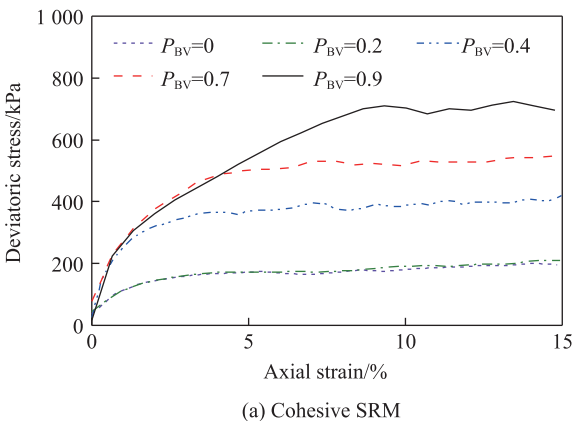
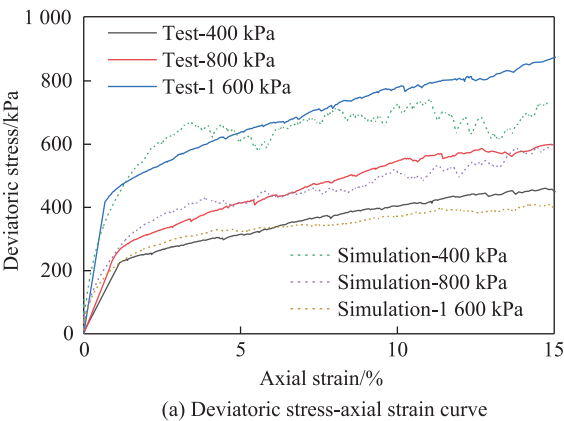


图6 标定结果
Fig. 6 Calibration result

图7 不同含石量土石混合体数值模拟对比分析
Fig. 7 Comparative analysis of numerical simulation of SRM with different P_{BV}

3 块石含量差异下试样力学指标的变化特征

3.1 不同含石量应力应变影响

构建块石倾角0°的黏土石混合体试样。围压控制为400 kPa,开展大型三轴数值仿真,记录仿真数据,绘制不同含石量条件下偏应力-轴向应变曲线图(图7),与已有学者^[21]对应条件下针对砂性土石混合体的研究结果进行对比分析。

分析偏应力-轴向应变曲线可知,含石量对土石混合体的剪切特性有较大影响。具体表现为:当

含石量不大于0.2时,曲线近乎重合。土石混合体力学特性由基质主导,当含石量大于0.2时,偏应力峰值强度随含石量的比例增大而增大。随着试样含石量的增加,曲线初始斜率也逐渐增大,这表明试样的变形模量逐步增加,并且相应地可以达到更大的偏应力峰值。

对比相同条件下的砂性土石混合体模拟,相较于黏性基质,砂性基质的土石混合体试样产生的峰

值应力远大于黏性基质下的土石混合体产生的峰值应力,将会导致更为不利的影响。在黏性基质试样中,一旦达到峰值强度,就会出现应变硬化现象,而砂性土石混合体加载曲线则会呈现应变软化。这表明黏性基质试样的弹性模量较小,在受力增加时虽然弹性模量也会增大,但始终小于砂性基质试样,黏性基质的峰值应力反而更低。当含石量为0.7及以上时,在局部曲线上出现了明显应力跳跃的现象,经过分析发现,这是因为含石量较高,导致内部空隙较大。在压实过程中,块石与块石之间突然卸载,从而引起结构重组。

3.2 不同含石量接触力链影响

图8展示了围压为400 kPa,块石倾角为 0° 时,各含石量下试验接触力玫瑰图。从图8可以看出,随着含石量的增加,黏性土石混合体的微观结构特征发生了显著变化,其力学性质也发生了明显改变。

1) 当试样的 P_{BV} 小于0.2时,其性质近似等同土体基质,各倾向力链均匀分布。

2) 针对 P_{BV} 在0.2~0.6之间的黏性土石混合体试样,各倾向力链逐步由均匀转变为轴向力变大,

符合基础由土体基质承担荷载转变为块石土体共同承担外部荷载的情况。

3) 当 P_{BV} 增大至0.7或更高水平时,黏性土石混合体试样中承担荷载的主要是块石。此时,块石相互接触形成骨架-空隙结构,块石间的空隙变大,而空隙则由土体基质填充。由于试样内绝大部分为块石,可以将块石视为基质,因而接触力链出现类似纯土体基质力链的现象,呈现均匀分布。

4) 随含石量不断增加,接触力链逐步由均匀分布,变为轴向分布为主,再呈现均匀分布,极好地展现了土石混合体承载荷载主要载体的转变。

4 块石倾角差异下试样力学指标的变化特征

4.1 不同块石倾角应力应变影响

设置 $P_{BV}=0.4$,构建不同块石倾角 α 的黏性土石混合体试样。围压控制为400 kPa,开展大型三轴数值仿真,如图9所示。

绘制相应的偏应力-轴向应变曲线(图10),与前人研究^[21]中对应围压下的砂性土石混合体进行对比分析。

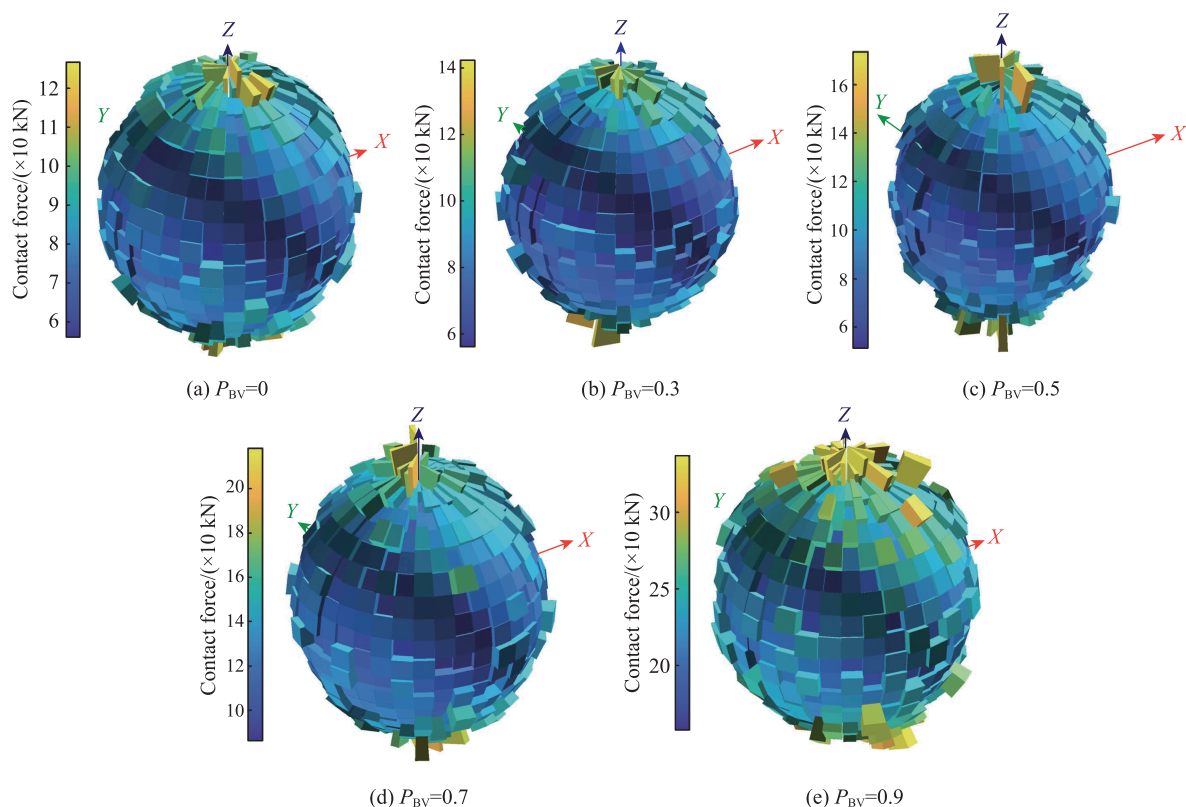


图8 接触力玫瑰图

Fig. 8 Rose diagram of contact force

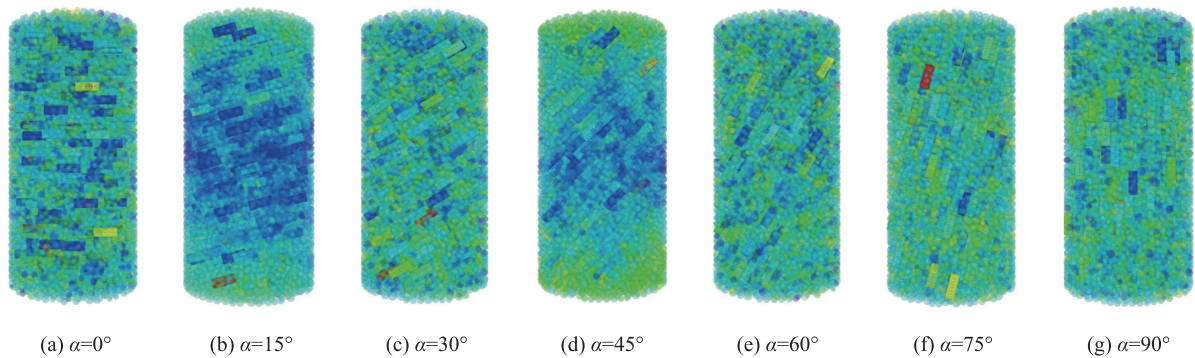


图9 不同块石倾角试样

Fig. 9 Samples with different block orientation angles

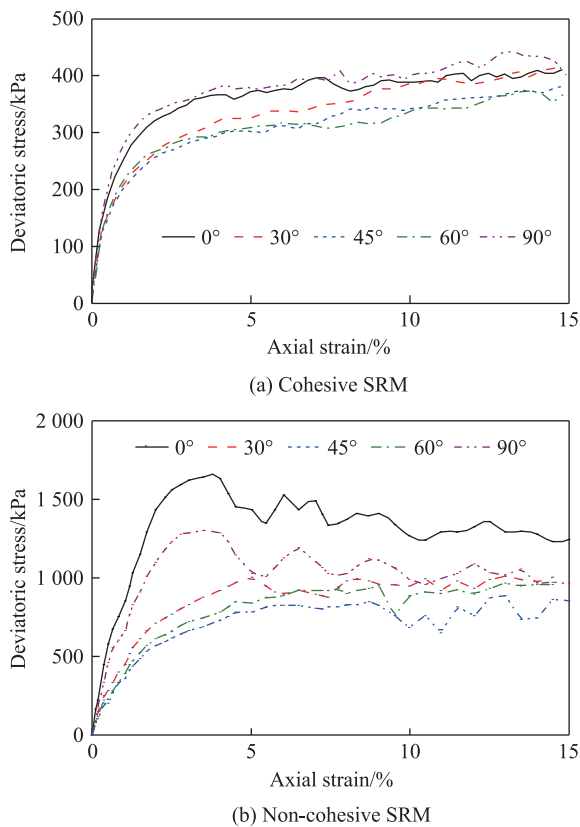


图10 不同块石倾角土石混合体数值模拟对比分析

Fig. 10 Comparative analysis of numerical simulation of SRMs with different block orientation angles

分析各偏应力-轴向应变曲线,可以发现,在加载条件一致的情况下,块石倾角对土石混合体的剪切特性有着较大影响。在中等含石量($P_{BV}=0.4$)时,随着块石倾角从 0° 逐渐增加至 90° ,主应力差先减后增,展示了抗剪强度先下降后上升的趋势。当块石长轴与最大主应力面(即水平面)平行或正交时,抗剪强度较高;而当与主应力轴夹角在 45° 到 60° 之

间时,抗剪强度相对较低,在 45° 时抗剪强度达到最低值。依据已有学者研究成果^[17]可知,试样往往会沿着基质剪切破坏角 $\alpha_s=45^\circ+\varphi_s/2$ 的方向破坏(φ_s 为基质内摩擦角),当块石的倾角趋近 α_s ,破裂面贯穿时遇到的块石阻碍越少。峰值应力及弹性模量随围压增大,并且峰值应力对应的轴向应变也会增加。对比黏性土石和砂性土石混合体,砂性土石混合体在最低抗剪强度时的块石倾角较大,峰值应力也远大于黏性土石混合体。

图11为 $P_{BV}=0.4$,围压400 kPa下 $0^\circ\sim 90^\circ$ 块石倾角下黏性土石混合体的位移云图。土石混合体在不同块石倾角下其剪切路径及变形破坏形式是不一致的。当含石量处于中含石量(P_{BV} 为0.3~0.7)时,块石和土体之间相互作用会产生一种类似图12中的结构效应。当外部加载作用于块石骨架时,结构性土体会首先达到土体基质的抗剪强度,从而引发剪切破坏。在多个位置发生剪切破裂,并在角度 α_s 的方向延伸。当破裂面扩展时遇到块石时,剪切路径被阻碍,开始沿块石和土体基质的交界面发展,最终穿越非结构性土体。因此,当块石倾角接近于 α_s 时,块石转动情况并不明显,当块石倾角与 α_s 相差较大(如 0° 和 90°),块石则会出现较为明显的转动。

4.2 主应力峰值强度

通过数值模拟探究块石倾角对土石混合体主应力差峰值的影响,绘制不同块石倾角下土石混合体主应力差峰值曲线,如图13所示。由图13可知,在400 kPa的较低围压环境中,块石倾角对黏性土石混合体的主应力差影响程度较低,但仍可以看出,当块石倾角为 45° 时,主应力差峰值最低。而随

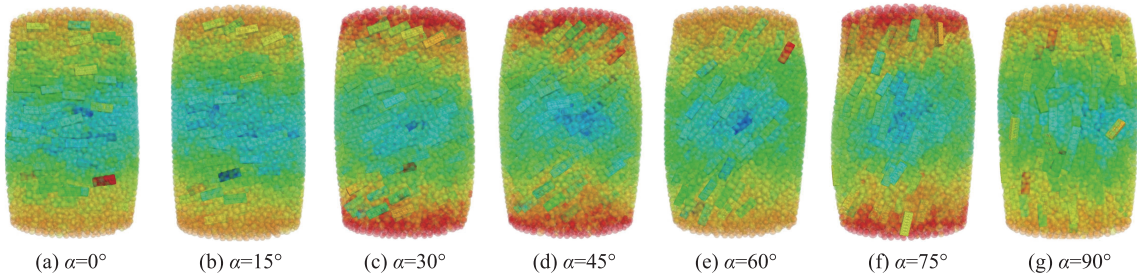


图 11 不同块石倾角试样位移云图

Fig. 11 Displacement cloud map of sample with different block orientation angles

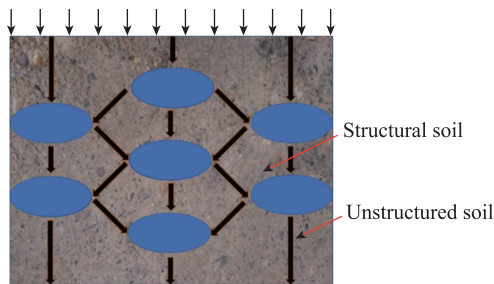


图 12 剪切路径发展

Fig. 12 The development of shear path

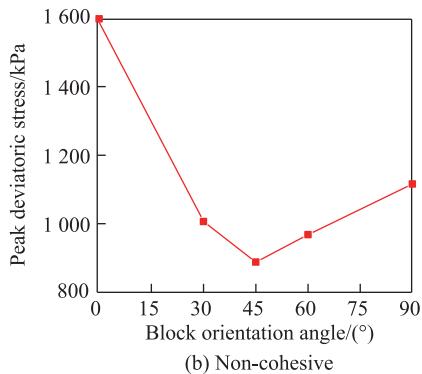
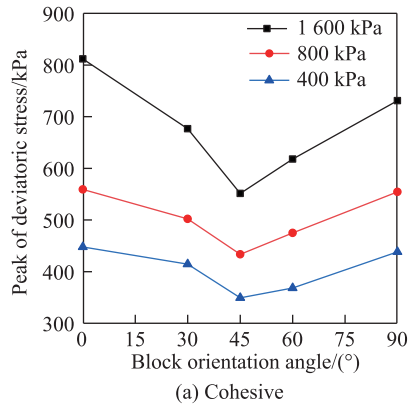


图 13 不同块石倾角土石混合物主应力差峰值曲线

Fig. 13 Peak curve of principal stress difference of SRM with different block orientation angles

围压增加至 1 600 kPa,块石倾角对主应力差的影响程度逐渐凸显。根据观察结果,推测在低围压环境下,围压对三轴试样的侧向限制作用不显著。块石在基质土中的移动与旋转程度相对一致,导致块石倾角对主应力差峰值强度影响较小。在高围压条件下,围压增加会加强对试验样本的侧向限制,更严格控制基质土内块石的形态变化。不同倾角的块石在土体中的移动难度存在差异,在侧限压力的作用下,块石的整体移动和旋转差异更加显著,块石倾角在高围压环境下对试样承受的主应力差峰值强度影响较大。

随着块石倾角的增大,不论何种基质材料性质,其主应力差峰值皆先减后增,块石倾角趋近于 45° 时主应力差峰值最小。在相同的块石倾角下,砂性土石混合体的最大主应力差明显高于黏性土石混合体,且砂性土石混合体也更易受块石角度的影响。

4.3 弹性模量

由图 14 可知,对于黏性土石混合体,初始弹性模量随块石倾角的变化趋势与主应力差基本相似。随着块石倾角增大,初始弹性模量呈现出先减后增的趋势,在 45° 时达到最小值。比较不同基质土石混合体可以看出,砂性基质的初始弹性模量大于黏性基质。

5 结论

本文使用 PFC 3D 建立三轴试验模型,通过室内试验结果,标定得到黏性土石混合体的模型细观参数。根据模拟结果,分析了含石量、块石倾角等因素对黏性土石混合体剪切特性的影响,得到以下结论。

1) 当含石量从 0.2 增加至 0.4 时,主应力差值

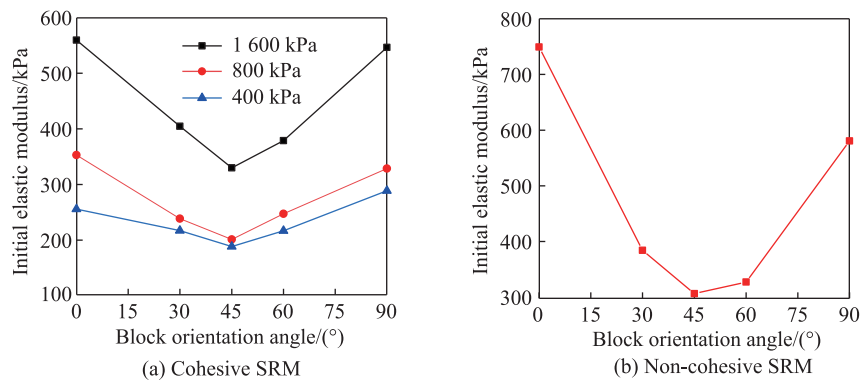


图14 不同块石倾角土石混合体初始弹性模量曲线

Fig. 14 Initial elastic modulus curve of SRMs with different block orientation angles

增速缓慢,而当含石量增加至0.6时,主应力差值大幅提升,符合S形强度曲线的结论。随着含石量的增大,块石与土体基质逐步形成块石-土体骨架结构,这种结构相对土体基质来说,其抵抗荷载的能力更强,宏观上反映为抗剪强度的快速增加。

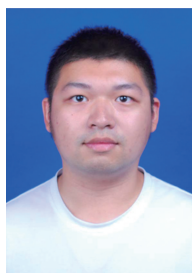
2) 无论土石混合体内土体基质是何种性质,块石倾角都会显著影响其力学特性。当块石倾角介于0°到90°之间时,黏性土石混合体和砂性土石混合体的抗剪强度呈现先减后增的趋势,在45°左右达到最低值。

3) 块石倾角在高围压环境下对试样承受的主应力差峰值强度影响较大。在高围压条件下,围压的增加会加强对试样的侧向限制,更严格控制基质土体内块石的旋转和移动,不同倾角的块石在土体中的移动难度存在差异。

参考文献:

- [1] WU Z J, JIANG Y L, LIU Q S, et al. Investigation of the excavation damaged zone around deep TBM tunnel using a Voronoi-element based explicit numerical manifold method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 112: 158-170.
- [2] LI X Z, ZHANG P X, HE Z C, et al. Identification of geological structure which induced heavy water and mud inrush in tunnel excavation: a case study on Lingji-ao tunnel[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2017, 69: 203-208.
- [3] LIU J, LI Z P, ZHANG X, et al. Analysis of water and mud inrush in tunnel fault fracture zone: a case study of Yonglian tunnel[J]. Sustainability, 2021, 13(17): 9585.
- [4] XU W J, HU R L, TAN R J. Some geomechanical properties of soil-rock mixtures in the Hutiao Gorge area, China [J]. Géotechnique, 2007, 57(7): 255-264.
- [5] 徐文杰, 张海洋, 许强, 等. 土石混合体直剪离散元数值试验研究[J]. 计算力学学报, 2014, 31(2): 228-234.
XU W J, ZHANG H Y, XU Q. Numerical simulations of direct shear test with soil-rock mixture using discrete element method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2014, 31(2): 228-234.
- [6] 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.
- [7] VALLEJO L E, MAWBY R. Porosity influence on the shear strength of granular material-clay mixtures[J]. Engineering Geology, 2000, 58(2): 125-136.
- [8] XU W J, QIANG X, 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.
- [9] TAO M, REN Q W, BIAN H B, et al. Mechanical properties of soil-rock mixture filling in fault zone based on mesostructure[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2022, 132(2): 680-705.
- [10] 徐贞珍, 刘东锋, 蒋亚龙. 尾矿固化体力学性质预测的PFC模型研究[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(1): 10-18.
XU Z Z, LIU D F, JIANG Y L. Study on the prediction of mechanical properties of tailings solidified body with PFC model[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(1): 10-18.
- [11] 金磊, 曾亚武, 程涛, 等. 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 L, ZENG Y W, CHENG T, et al. Seepage characteristics of soil-rock mixture based on lattice Boltzmann method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(4): 669-677.
- [12] 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 F Y, KONG J J, YAO J J. 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.
- [13] 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.
HE J M, LI X, WU J B, et al. Modeling method of the rock-soil aggregate and its numerical test[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2009, 29(3): 1-4.
- [14] 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 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.
- [15] 张佩, 杜修力, 金浏, 等. 块石长轴倾角对土石混合体宏观力学性能的影响研究[J]. 工程力学, 2018, 35(9): 64-72.
ZHANG P, DU X L, JIN L, et al. Study on the orientation angle of rock long axis on the macromechanical properties of soil-rock-mixture[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(9): 64-72.
- [16] NAPOLI M L, MILAN L, BARBERO M, et al. Identifying uncertainty in estimates of bimrocks volumetric proportions from 2D measurements[J]. Engineering Geology, 2020, 278: 105831.
- [17] NAPOLI M L, MILAN L, BARBERO M, et al. Investigation of virtual bimrocks to estimate 3D volumetric block proportions from 1D boring measurements[J]. Geosciences, 2022, 12(11): 405.
- [18] PALMSTROM A. RMi-a rock mass characterization system for rock engineering purposes[D]. Denmark: University of Oslo, 1995.
- [19] 张声宇. 断层破碎带夹泥岩体力学特性试验与数值分析[D]. 南昌: 华东交通大学, 2022.
ZHANG S Y. Test and numerical analysis of mechanical properties of muddy rock mass in fault fracture zone [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2022.
- [20] 胡峰, 祝诗逸, 王颂, 等. 块石破碎性质对土石混合体剪切带厚度的影响研究[J]. 工程地质学报, 2024, 32(1): 39-51.
HU F, ZHU S Y, WANG S, et al. Impact on rock block breakage characteristics to the thickness of shear band of soil-rock mixture[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(1): 39-51.
- [21] 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.
ZHANG Z P, FU X D, SHENG Q, et al. A non-linear ultimate strength criterion for soil-rock mixture based on rock block proportion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(8): 1672-1686.
- [22] KALENDER A, SONMEZ H, MEDLEY E, et al. An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrocks and bimsoils[J]. Engineering Geology, 2014, 183: 65-79.



第一作者: 汤新(2000—), 男, 博士研究生, 研究方向为隧道工程。E-mail: 1374766680@qq.com。



通信作者: 蒋亚龙(1991—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为隧道工程。E-mail: yalongjiang@whu.edu.cn。

(责任编辑: 姜红贵)