

# 粗粒土力学特性的大型三轴试验 及离散元—有限元耦合模拟

刘重宏, 巨能攀, 周新, 许烈

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), 成都 610059

**[摘要]** 本文旨在探究粗粒土的力学特性, 并揭示细观力学组构与宏观变形特征之间的内在关系。综合室内大型三轴试验及离散元—有限元耦合技术, 建立还原大粒径块石含量及形状的粗粒土三维数值模型, 基于柔性围压加载, 考虑 Rigid Block 刚性块优化块石的细观模型, 采用 PFC 程序对粗粒土试样开展了大型三轴试验数值模拟研究, 分析粗粒土试样的宏观变形特征及细观力学组构特性。试验研究表明: 该试样呈现出应变强化效应, 在围压柔性加载下, 试样侧向鼓胀变形, 试样中部发育“X”形剪切带, 垂直方向接触力链逐渐加强, 呈现贯通趋势。结合宏观变形特征和细观力学组构综合分析, 发现试样在垂直方向由压缩引发的变形程度较试样径向方向由剪切破坏所引发的变形程度更为显著, 且垂直各向异性变化程度大于水平各向异性变化程度, 这表明细观力学组构与宏观变形特征的变化趋势具有明显的一致性。

**[关键词]** 三轴试验; 粗粒土; 离散元—有限元耦合; 细观组构

**[分类号]** TU43

**[文献标志码]** A

## Large scale triaxial test and discrete element-finite element coupling simulation of mechanical properties of coarse-grained soil

LIU Zhonghong, JU Nengpan, ZHOU Xin, XU Lie

State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

**Abstract:** This article investigated the mechanical properties of coarse-grained soil to identify the internal relationship between its micromechanical fabric and the characteristics of its macroscopic deformation. By integrating laboratory-scale triaxial tests and discrete element-finite element coupling-based simulations, we established a three-dimensional numerical model of coarse-grained soil to replicate the content and shapes of large stone blocks. We used flexible confining pressure-induced

**[收稿日期]** 2023-05-06。

**[基金项目]** 四川省科技计划资助项目(2022YFG0183); 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项目(SKLG2020Z006)。

**[第一作者]** 刘重宏(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 岩土工程试验, E-mail: 2218437968@qq.com。

**[通信作者]** 巨能攀(1973—), 男, 教授, 博士, 研究方向: 边坡稳定性及地质灾害监测预警, E-mail: jnp@cdut.edu.cn。

**[引用格式]** 刘重宏, 巨能攀, 周新, 等, 2024. 粗粒土力学特性的大型三轴试验及离散元—有限元耦合模拟[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(2): 291-302.

Liu Z H, Ju N P, Zhou X, et al., 2024. Large scale triaxial test and discrete element-finite element coupling simulation of mechanical properties of coarse-grained soil[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(2): 291-302.

loading and rigid block technology to optimize the microscopic models of the stone blocks, and conducted comprehensive numerical simulations of coarse-grained soil specimens by using the PFC (Partical Flow Code) program. The findings showed that the specimens exhibited a strain-hardening effect. Under a flexible confining pressure-induced loading, the specimens exhibited lateral bulging-induced deformation and developed “X”-shaped shear bands in the central region. The chains of the vertical contact force gradually intensified, and exhibited a trend of interconnection. Our comprehensive analysis of the macroscopic deformation and micromechanical fabric of the soil showed that the degree of deformation caused by its compression along the vertical direction was more significant than that caused by its shear failure along the radial direction, and the degree of change in its vertical anisotropy was greater than that in its horizontal anisotropy. This indicates that the trend of changes in its micromechanical fabric and the characteristics of its macroscopic deformation were clearly consistent.

**Key words:** triaxial testing; coarse-grained soil; discrete element-finite element coupling; microstructure

粗粒土作为一种广泛分布于自然界的土壤类型,在地质工程中具有重要的应用价值。尤其在滑坡堆积体稳定性分析等领域,粗粒土的力学特性研究显得尤为关键。然而,由于粗粒土具有特殊的物理性质和复杂的力学行为,其力学特性和变形规律依然存在许多未解决的争议和不确定性。因此,对粗粒土力学特性和工程应用的深入研究仍然具有重要意义。

国内外学者为探究粗粒土的力学特性,采用了物理试验和数值模拟等方法。物理试验,尤其是大型三轴试验,成为研究粗粒土力学性质和变形行为的重要手段。在过去的研究中,许多学者关注粗粒土细观特征变化对宏观力学性质的影响,如在不同围压(秦红玉等,2004;石熊等,2015)和应力路径(刘萌成等,2002,2008)条件下的力学特性和颗粒破碎特性(曹文贵等,2016;凌华等,2017;夏加国等,2017)。然而,传统的大型三轴试验存在一些局限,如试样制备的不均匀性、应力状态上的缺陷等,这些因素限制了试验结果的准确性。

为了更准确地研究粗粒土的力学特性,数值模拟成为一种重要补充手段。相对于物理试验,数值模拟能够模拟复杂应力状态,直观展示土体内部应力—应变状态,并且具备高度灵活性(邵磊等,2009)。目前,已有大量学者使用 PFC 颗粒流软件进行了相应研究(杨贵等,2010;耿丽等,2011;金磊等,2015;杨忠平等,2020),但这些模拟通常采用刚性伺服方式,这种伺服方式在试验中限制了试样径向的自由变形,无法模拟出试样的宏观变形形态(石崇,2018)。相比之下,室内三轴试验则是通过外层橡皮膜传递围压,在加载过程

中能够较为自由地变形。因此,在数值模拟中采用刚性伺服方式只能模拟围压加载,无法模拟试样的径向不均匀变形,也就无法准确模拟大型三轴试验的柔性加载特征。

目前一些研究者尝试采用分段组合墙体(金磊和曾亚武,2018)或柔性颗粒膜(张强等,2019)模拟室内大型三轴试验的柔性加载特性。然而,各分段墙体在围压伺服过程中只能沿水平方向移动,但在加载过程中,试样的变形会导致围压方向的改变,以至于采用组合墙体法难以模拟围压的准确情况。另外,若使用黏结颗粒膜模拟柔性边界,会因为其较小的弹性模量导致发生较大的变形,且颗粒的数量大大增加,从而增加了建模的难度。基于这些考虑,本文采取基于离散元—有限元耦合的方法来模拟三轴试验的柔性围压加载,此方法将有限元中的壳单元作为试样的边界,能够更加准确地模拟出橡胶膜的变形状态及受力情况。

综上,本文旨在以粗粒土为对象,通过室内大型三轴试验获得试样的宏观力学参数,在此基础上,采用离散元—有限元耦合方法,模拟柔性围压加载条件下的三轴试验。并通过优化部分已还原细观形态的块石三维模型,构建粗粒土试样的数值模型,深入分析粗粒土试样的宏观变形特征及其细观组构特性。

## 1 室内试验

### 1.1 试验方案

本次试验旨在通过室内大型三轴试验探究玛尔挡水电站库区某滑坡堆积体在天然和饱和状态下的抗剪强度特性。本次试验采用抽气联合水头

饱和快剪试验,分别在 3 个天然及饱和试样上施加 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa 的围压,轴向应变加载速率设定为 4 mm/min,直至轴向应变达到 16%。

本次试验所使用的设备是应力路径控制大型三轴剪切试验机,如图 1 所示。该仪器是由四川大学华西岩土所与成都理工大学环境与土木工程学院联合研制,其压力室直径为 300 mm,高度为 600 mm。



图 1 应力路径控制大三轴剪切试验机

Fig. 1 Path of stress control of the triaxial shear-testing machine

## 1.2 试验材料

根据现场所取土样并按照试验规范对土样进行缩尺处理,据室内土工试验结果,土样的基本物理性质指标如表 1 所示,试样的颗粒级配曲线见图 2,曲线在 1~2 mm 处出现明显平台,缺少该粒径颗粒,不均匀系数  $C_u = 54.04$ ,曲率系数  $C_c = 0.24$ ,总体上该堆积土为级配不良土。

表 1 粗粒土试样基本参数表

Table 1 Basic parameters of coarse-grained soil samples

天然密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	饱和密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	天然含水率/ %	不均匀 系数
1.96	2.14	8.70	54.04
曲率系数	孔隙比	最大粒径/mm	块石岩性
0.24	0.40	60.00	砂质板岩

## 1.3 试验步骤

### (1) 试样制备与安装

首先在仪器底座上安装成型筒并将橡皮膜紧贴固定于成型筒内侧;再将试验所需的均匀混合土样分 5 层夯实并填入成型筒内,其中试样的天然密度控制在约为  $1.96 \text{ g/cm}^3$ ,饱水密度控制在约为  $2.14 \text{ g/cm}^3$ ;最后,当试样装载完成后,加装

透水板和试样帽并拆除成型筒,最终试样如图 3 所示。

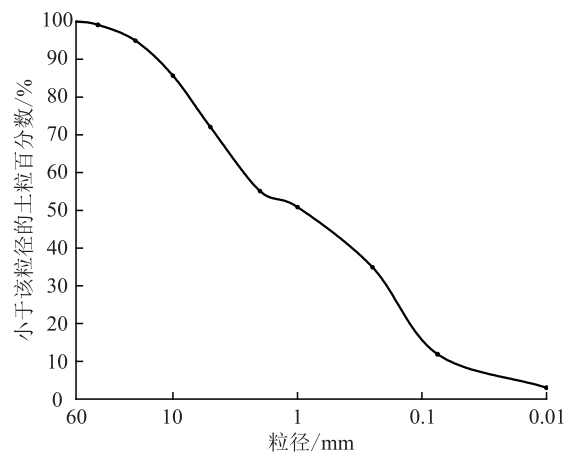
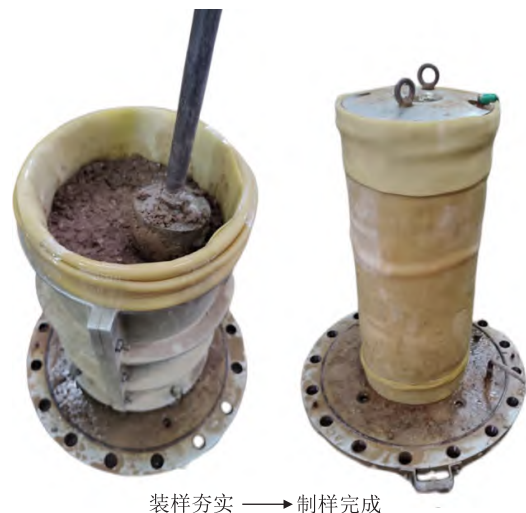


图 2 粗粒土颗粒级配曲线

Fig. 2 Curve of distribution of coarse-grained soil



装样夯实 → 制样完成

图 3 室内三轴试验制样

Fig. 3 Sample preparation for the laboratory triaxial test

### (2) 试样饱和与剪切

首先,将试样置于压力罩内部并将压力罩固定于仪器底座;其次,由试样顶部抽气至真空状态,打开进水阀,试样在负压作用下逐渐饱和。最后,待试样饱和后,打开围压阀门,对试样施加恒定围压,以指定速率施加轴向应变,直至应变达到 16%后停止剪切。

## 1.4 试验结果分析

室内大型三轴试验得到的粗粒土试样应力—应变曲线见图 4。其中,图 4-A 是天然状态下应力—应变曲线;图 4-B 是饱和状态下应力—应变曲线。

从图 4 可以得出:试样在天然及饱和条件下,偏应力随着应变的增大而增大,没有明显的峰值强度,表现为应变强化特性,可大致分为 2 个阶段:①初始压缩阶段,该阶段试样在承受初始应力后,应变速率较大,应变与应力呈现出较低的线性关系。试样在初始应力下快速压缩,当应力达到一定程度时,试样进入应变强化阶段。②应变强化阶段,该阶段随着应力的增加和颗粒重新排列,应变曲线逐渐呈现出上升趋势,且斜率开始减少。

从 2 组试样的应力—应变曲线整体形态来看,曲线形态并没有随着围压的改变而发生明显变化。试样在天然及饱和条件下,偏应力最大值

随着围压的增大而增大,天然条件下偏应力最大值的增幅明显高于饱和条件下,高围压条件下此现象表现的更加显著。在围压相同的条件下,天然试样的最大偏应力大于饱和试样,且随着围压增大二者的差值逐渐增大。

求得天然条件下试样的内聚力  $c$  为 52.27 kPa,内摩擦角  $\varphi$  为 25.04°包络线如图 5-A;求得饱和条件下试样的内聚力  $c$  为 32.98 kPa,内摩擦角  $\varphi$  为 13.73°包络线如图 5-B。可以发现,天然条件下试样的内聚力及内摩擦角均大于饱和条件下试样的内聚力及内摩擦角,内聚力的变化幅度为 37%,内摩擦角的变化幅度为 45%。

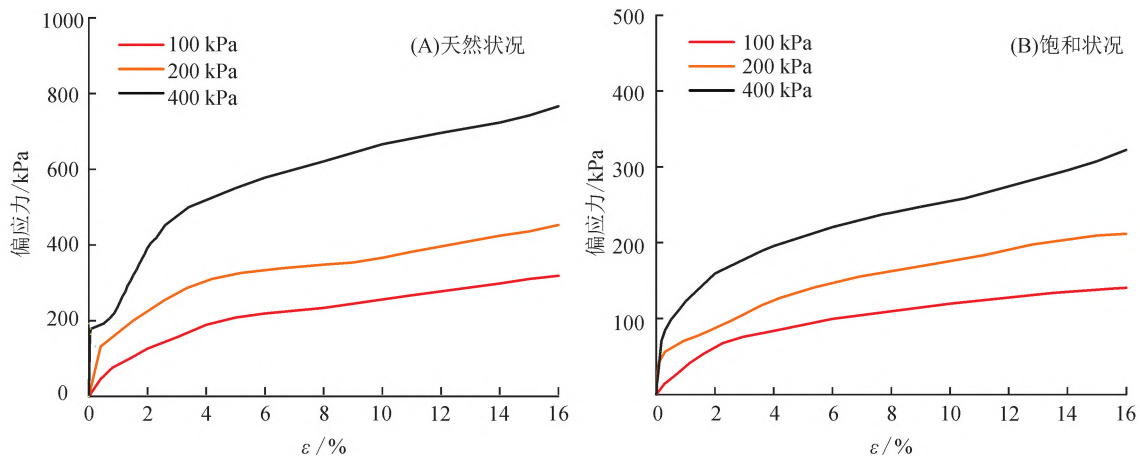


图 4 室内三轴试验应力—应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of the samples in the laboratory triaxial test

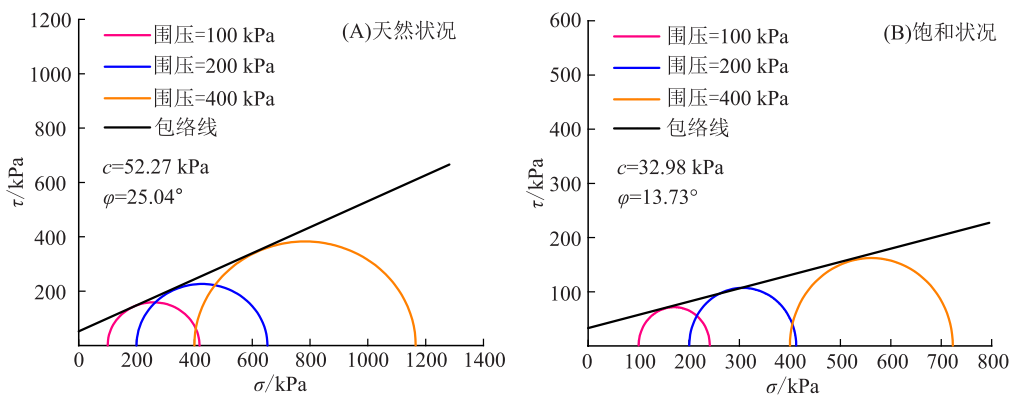


图 5 粗粒土试样莫尔包络线

Fig. 5 Mohr envelope of the coarse-grained soil samples

造成此变化的原因有:饱和条件下大量水分子附着在细粒土表面,形成了润滑层,降低了颗粒间的摩擦力,内摩擦角因此变小;水分子渗入到土

颗粒的间隙中,也会减小土颗粒间的接触力,导致土体的内聚力降低。从颗粒级配曲线可以看出,小于 1 mm 的细颗粒含量约为 50%,过多的细颗

粒也是导致内聚力和内摩擦角变化幅度增大的重要原因。

## 2 柔性三轴数值模拟

### 2.1 柔性三轴实现原理

在 PFC 模拟试验中,传统的刚性伺服方法无法模拟室内试验中试样外层的柔性橡胶膜。因此,本文采用离散元软件 PFC 与有限元软件 FLAC 耦合的方法,实现三轴试验的围压柔性加载。相较于柔性颗粒膜,耦合方法能够更准确地模拟出橡胶膜的变形形态,并降低了建模的复杂度,显著提高了模拟效率。耦合方法与分段墙体组合法相比,前者能更好地模拟围压方向随试样变形而变化的现象,因此,采用 PFC-FLAC 耦合的方式是如今的最优解。

该耦合方法利用 PFC 软件模拟颗粒介质的力学行为,同时利用 FLAC 软件模拟连续介质的力学行为,通过 Socket I/O 接口函数进行数据交换和边界条件的传递,实现了 2 种介质的相互作用。

为实现 PFC 中模型组件与 FLAC 中连续区域的交互,需首先创建一个独立的耦合模块。在此模块中,采取将 PFC 中的颗粒模型单元与 FLAC 连续结构单元相耦合的方法,如图 6 所示。

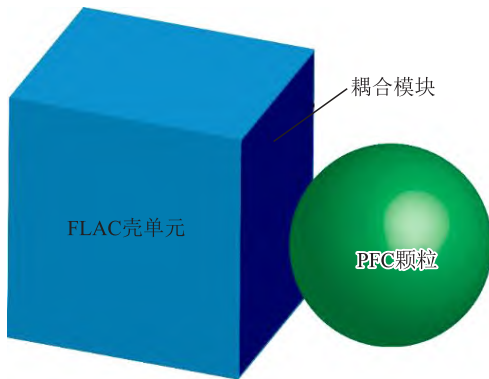


图 6 PFC-FLAC 耦合原理

Fig. 6 Principle of PFC-FLAC coupling

### 2.2 数值模型的建立

#### (1) 颗粒级配的确立

PFC 模拟三轴试验的优势在于可以模拟颗粒间的相互作用,从而能更好地研究颗粒间的力学行为和变形特征。然而,在利用 PFC 软件进行试验分析时,我们无法完全模拟出试样的实际颗粒级配,这是因为按照实际颗粒级配生成的颗粒

数目将达到百万级,导致计算效率极低。因此,需要限制颗粒数量以平衡计算精度和效率,即需要放大部分颗粒的粒径。需要注意的是,由于粗粒土材料有着明确的级配,并且颗粒级配与其宏观力学性质密切相关(张志华,2015)。因此,在对颗粒进行放大时,需要尽可能保留粗粒土的级配特征,以确保宏观力学性质的表现准确可靠。同时,根据吴锐等(2016)的研究,粗粒土中的碎石形状对其抗剪强度有着明显的影响,且粗粒土的碎石尺寸在某种程度上影响着其宏观力学参数,从而控制其宏观的变形和破坏。因此,在数值模拟中还原碎石的形状与尺寸是提高数值模拟精度的必要条件。

胡世兴等(2021)在谢亦朋等(2021)提出的“局部粗粒化”等效方法的基础上,将块石形态分界值  $D_{fr}$  和粗化粒径  $D_s$  作为等效颗粒级配的关键粒径。当颗粒直径大于  $D_{fr}$  时,颗粒需要还原成块石形态;当颗粒直径小于  $D_{fr}$  且大于  $D_s$  时,用真实粒径的球颗粒模拟块石;当颗粒直径小于  $D_s$  时,颗粒需要被放大为统一粒径的球颗粒,认为是土颗粒。

综上所述,将块石形态分界值确定为 20 mm,粗化粒径为 10 mm,结合马幸等(2016)研究的最小粒径截距对试样力学性质的影响情况,确定最小粒径为 10 mm,即最小粒径也为粗化粒径。最终确定的试样的各粒组颗粒含量如表 2。

表 2 粗粒土数值试验各组参数表

Table 2 Parameters of coarse-grained soil in the numerical simulations

颗粒形态	球颗粒		真实块石形态
类别	土	块石	块石
体积占比/%	82.15	9.80	8.05

#### (2) 块石细观结构模型构建

受限于粗粒土内部块石分布的复杂性,建立真实的细观结构数值模型十分困难。因此,本文利用计算机随机构造技术(Xu et al.,2016)构建不规则块石的三维几何模型,并在指定空间中生成随机位置的块石颗粒,实现对复杂颗粒结构的模拟。

为还原块石的细观形态并加快模拟的计算效率,本文选择 Rigid Block 作为模拟块石的基本单元,相较于 Clump 有着以下优势:首先,Rigid Block 可以存在单个接触的对象,即与其他块体之间只能存在一次接触。这与 Clump 形成对比,

Clump 是由多个颗粒形成的超级颗粒,其中的每一个颗粒都视为一个单独颗粒,这通常会导致多颗粒 Clump 与另一块之间生成多次接触,过多的接触会严重地减缓计算效率;其次,Rigid Block 模块引入了闭合多边形、凸多边形和流行多边形的建模能力,能更好地还原块石在 PFC 软件中的真实形态。

上述方法的具体步骤为:首先,使用基于椭球

表面的随机构造多面体方法来获得块石的细观数值模型,建立形状各异的块石模型库;然后,以块石模型库为样本,在库中选取适当的块石模型,依据室内试验的块石级配生成块石集合;最后,将满足要求的块石集合导入为几何模板,如图 7。利用已生成的几何模板在指定空间内生成随机位置的 Rigid Block 刚性块,并可以通过设置随机种子数以改变块石的空间位置。

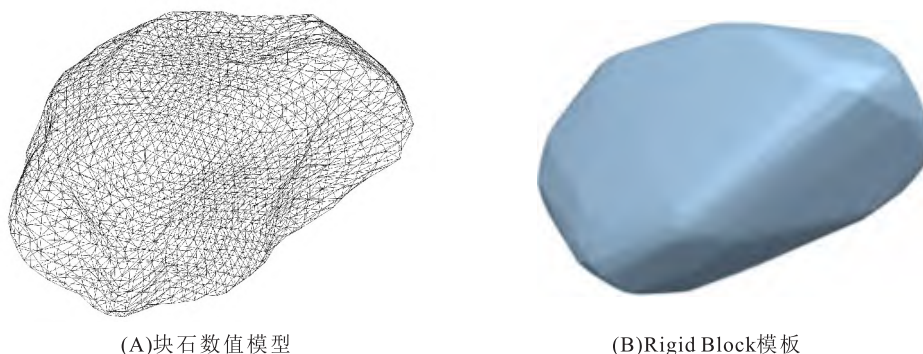


图 7 块石细观模型

Fig. 7 Mesoscopic model of stone blocks

(3)粗粒土离散元模型构建

综合上文所述,构建的粗粒土数值模型试样见图 8。模拟的整体建模流程如下:首先,生成直径 30 cm,高度 60 cm 的圆柱型模型,模型由圆柱型侧面及上下加载板组成。其次,在模型区域内生成随机位置的刚性块体,以模拟大粒径块石颗

粒,在剩余空间内按级配曲线生成球颗粒;通过伺服系统调整试样的边界条件,使得颗粒体系之间的接触尽可能达到理想状态,待颗粒平衡后对试样施加围压,并删除圆柱面墙体。最后,生成圆柱型柔性薄膜,指定薄膜表面的应力以达到柔性加载的目的,开始加载。

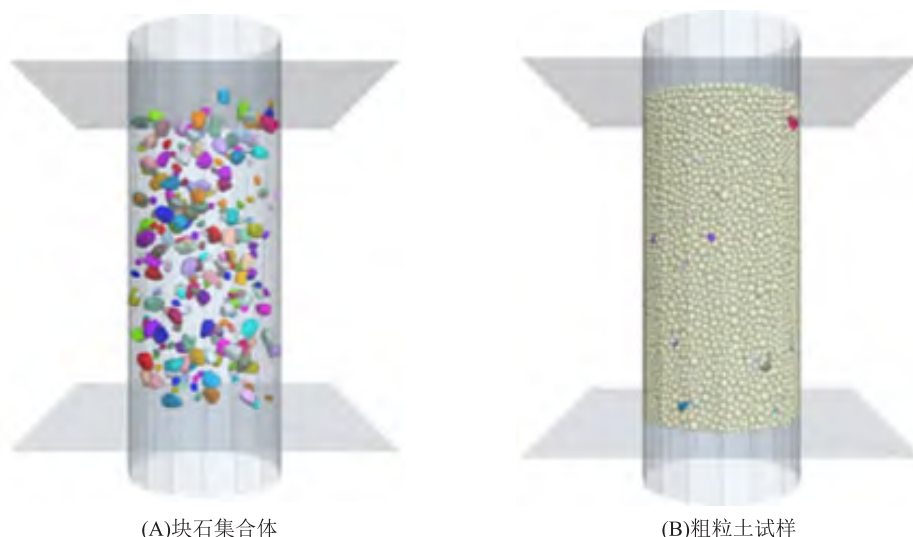


图 8 粗粒土三维离散元数值模拟试样

Fig. 8 Sample of coarse-grained soil used for the discrete 3D numerical simulations

### 2.3 参数标定

根据上述柔性三轴数值试验过程,对粗粒土试样进行参数标定,结合土体抗压、抗剪但不抗拉的特点,选用线性接触模型作为本构模型,其关系示意如图 9。选取的细观参数有:颗粒的法向接触刚度  $k_n$ ,切向接触刚度  $k_s$ ,刚度比  $k^*$ ,摩擦系数  $\mu$ ,颗粒弹性模量  $E_c$ 。根据周博等(2012)研究表明,粗粒土数值模型的宏观弹性模量主要受颗粒弹性模量和刚度比的影响,摩擦系数对模型的弹性性质影响较小,仅对模型的峰值强度产生影响。然而,试样的宏观物理力学参数与模拟的细观参数之间缺乏合理的定量转换方法,只能通过大量的数值模拟试验进行参数反演,以获得与室内试验结果相符的模拟结果。综合控制变量法和细观参数与宏观力学参数之间的定性关系,本文标定的粗粒土数值模型的细观接触模型参数详见表 3。

如图 10 所示,室内大型三轴试验结果与数值模拟结果的比较表明,数值模拟的应力—应变曲线与室内试验结果相符,并且试样的破坏形态也与室内试验的结果相似,说明数值模拟具有较好的准确性和可靠性。

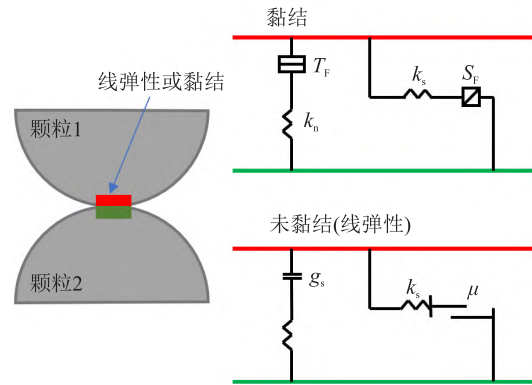


图 9 线性基础本构模型示意  
Fig. 9 Linear constitutive model

表 3 数值模拟颗粒接触细观参数表

Table 3 Mesoscopic parameters of particle contact in the numerical simulations

介质	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$E_c/\text{MPa}$	$k^*$	$\mu$	$k_n/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$
土体	1900	300	0.5	0.2	$6 \times 10^6$
块石	2000	300	1.0	0.3	$2 \times 10^8$
块—石	—	300	0.5	0.2	$5 \times 10^6$

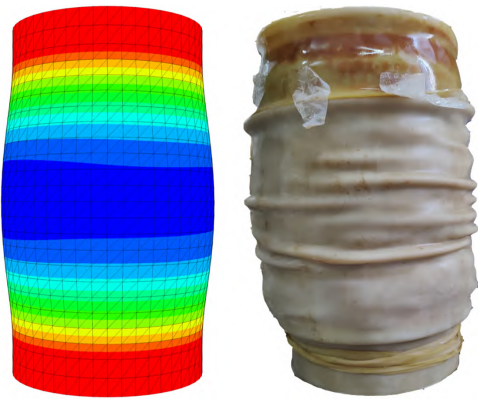
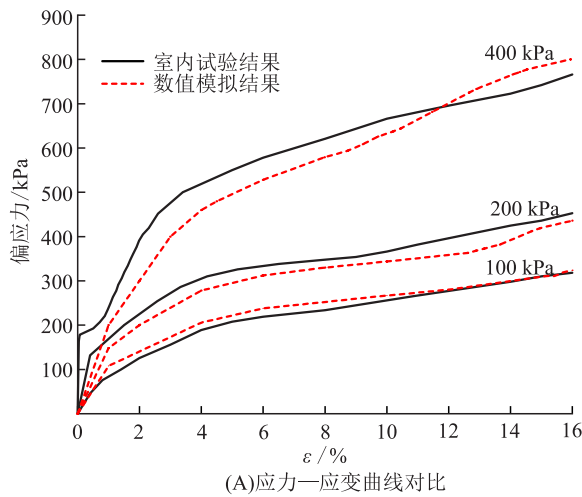


图 10 室内试验与数值模拟结果对比

Fig. 10 Comparison of the results of the laboratory test and the numerical simulation

## 3 数值模拟结果分析

### 3.1 试样宏观变形特征分析

根据图 11 所示的粗粒土试样变形破坏特征位移云图,在 PFC-FLAC 耦合的围压柔性加载条

件下,可以看出试样在加载过程中出现了明显的不均匀剪胀变形现象,表现为试样内部的局部区域发生了强烈的剪切破坏,试样表面向外膨胀。此外,不同围压条件下,试样的破坏形态也有所差异,体现了粗粒土的各向异性。

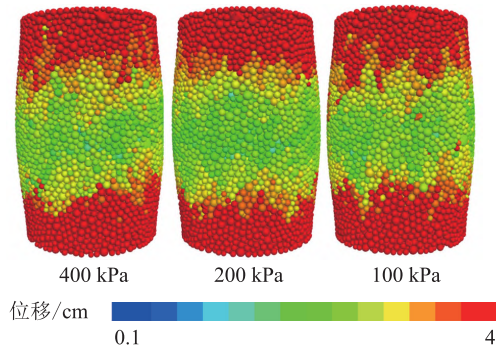


图 11 粗粒土试样数值模拟位移云图  
 Fig. 11 Cloud map of the displacement of the coarse-grained soil samples in the numerical simulations

颗粒材料破坏后通常会在试样中部形成剪切带,颗粒的旋转和位移是影响其变形演化的重要因素(Hall et al., 2010)。图 12 给出粗粒土试样在 400 kPa 围压下的中心剖面颗粒位移矢量图及

16%应变时的颗粒旋转图,通过分析试样内部颗粒的位移和旋转特征,可以进一步研究粗粒土试样在加载过程中剪切变形的演化规律。

从图 12-A 中可以看出,试样在 400 kPa 围压的条件下,上下两端颗粒向内挤压,几乎只产生竖向位移(图中黑色虚线区域),可以认为该部分区域颗粒处于弹性状态。越靠近试样中部,颗粒位移方向越向水平偏转,在试样中部出现明显的剪胀变形,整个剪切破坏区域大致呈 X 型。随着应变的增大,弹性区域逐渐减小,颗粒的位移逐渐增大,整体上表现为先竖向压密再径向变形。试验结果为:试样的变形主要表现为竖向压缩,中部剪胀变形次之。从图 12-B 可以看出,粗粒土试样中部的近似 X 型区域内的颗粒发生了旋转,表现为明显的剪切破坏,试样上下两端的三角形区域内的颗粒未发生明显的旋转,处于弹性状态,与左侧颗粒位移矢量图所得出的结果一致。

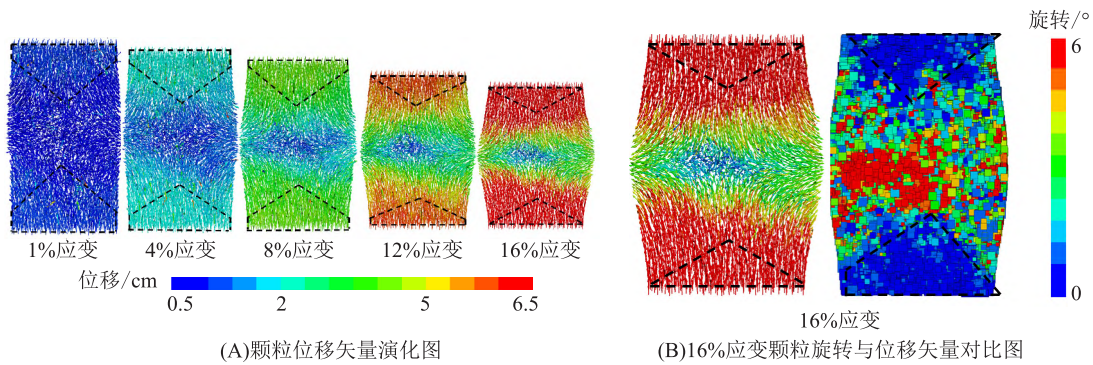


图 12 粗粒土试样颗粒位移矢量及旋转图  
 Fig. 12 Displacement vector and rotational diagram of the coarse-grained soil samples

### 3.2 试样细观力学组构分析

颗粒材料的细观组构是指材料内部结构的拓扑结构(Fonseca J et al., 2013),颗粒材料的细观组构与宏观物理力学特性有着极强的相关性(Athanassiadis et al., 2014)。本节将从接触力、组构张量及配位数 3 种组构量对粗粒土试样的细观组构特征进行分析。

图 13 展示了粗粒土试样在 400 kPa 围压条件下  $x-z$  平面上的接触力链演化图。图中颜色越暖、链条越粗代表接触力越大。初始状态下,接触力链分布相对均匀,而随着试样的应变增大,试样中的红色力链逐渐增多,呈现出在垂直方向贯通的趋势,表明试样的竖向接触力逐渐增大,试样受荷主要由法向接触力承载。高应变状态下,局部

块石位置发生了明显的接触力链集中现象(如图 13 中黑色虚线区域所示),表明试样中大粒径块石的承荷能力要大于土颗粒。

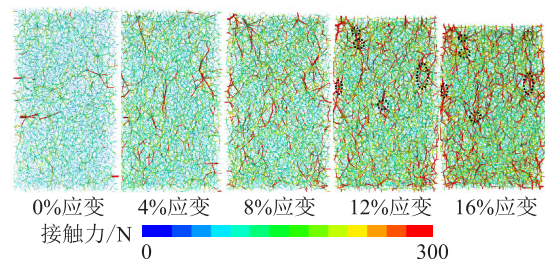


图 13 粗粒土试样数值模拟力链演化图  
 Fig. 13 Diagram of evolution of the force chain of the coarse-grained soil samples

组构张量是描述组构各向异性的重要参数,

能够较准确地反映颗粒材料细观组构向量分布的方向性特征,本文采用 Oda(1972)提出的组构张量公式来量化组构各向异性:

$$\phi_{ij} = \frac{1}{N_c} \sum_{c=1}^{N_c} n_i^c n_j^c \quad (1)$$

式中: $\phi_{ij}$ 是接触法向组构张量; $n_i^c$ 是沿接触法线方向的单位矢量; $n_j^c$ 是沿接触切线方向的单位矢

量; $N_c$ 为颗粒系统总接触数。

图 14 展示了在 400 kPa 围压下,试样成型、围压加载后及完成加载后的接触数目分布情况。图中,球体按表面积等分成三角形柱体,在球坐标系中展示。每个柱体的高度随着统计强度的变化而改变,颜色越暖代表分布越集中,柱体越高表示分布越密集。

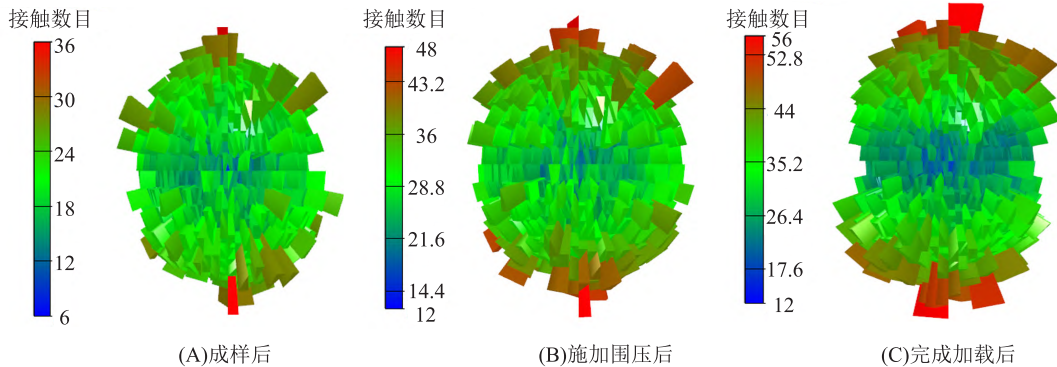


图 14 粗粒土试验数值模拟三维组构图

Fig. 14 Numerical simulation of the three-dimensional composition of the coarse-grained soil samples

如图 14 所示,在不同的加载状态下,试样的三维组构分布呈现不同的形态,并且与试样的宏观物理力学特性密切相关。在刚成样后,试样的三维组构近似于球形,组构张量各向异性较小,表明试样的初始状态比较均匀,没有明显的组织结构,试样的力学特性也比较均衡。在加载围压后,试样的三维组构形态基本保持不变,仅表现为接触数目的增加,表明试样的初始组构比较松散,随着围压的加载,试样的颗粒之间的接触增加,试样的力学性质得到了一定的改善。在完成加载后,试样的三维组构沿竖直方向被拉长,形状类似于椭圆,接触数目显著增大,在顶点处的接触集中更加明显,表明试样的力学特性在竖直方向上显著改变,但在水平方向上接触数目有所减少,这表明试样在水平方向上发生了一定的变形,力学特性发生变化,且水平方向接触数目的减少值要小于竖向接触数目的增加值。以上结果表明组构张量的各向异性显著变化,且水平各向异性变化程度小于竖直各向异性变化程度。在宏观变形方面,这表明试样发生明显的竖向压密变形及侧向剪胀破坏。

配位数是颗粒材料细观组构的基本参数之一,它描述了颗粒与其相邻颗粒的接触数(Liu et al., 1999)。然而,在颗粒体系中存在一些配位数

小于 2 的悬浮颗粒,这些颗粒对试样的力学承载能力几乎没有贡献。因此,为了更准确地描述颗粒之间的力学作用,引入了力学配位数的概念(Thornton, 2000),剔除了这些无贡献的悬浮颗粒。尽管力学配位数剔除了无力学贡献的几何配位数,但这些几何配位数对颗粒材料的稳定性仍然不可忽略。

在本次模拟中,图 15 给出了粗粒土试样在 400 kPa 围压下配位数与力学配位数的变化规律。随着应变的增加,配位数和力学配位数都随之增加,增加的幅度约为 0.2。这是因为应变的增加会导致颗粒之间的接触面积增加,从而增加颗粒之间的相互作用力。这些相互作用力会促使颗粒在相邻的位置上增加,使得颗粒周围的相邻颗粒数目增加、力学配位数增加,并且颗粒在该方向上的变形和剪切应力也会增加,因此颗粒的各向异性也随之增加。

需说明的是,试样压密会导致配位数增加,试样破坏则会使配位数下降,且无论试样的压密或剪胀均会导致各向异性增加。因此,在本次试验条件下,随着试样的加载,试样在竖直方向受压缩引起的变形导致各向异性的变化程度大于试样直径方向剪切破坏所引起各向异性的变化程度。这与图 14 所得的结论一致,同时也与图 12 所得出

试样的变形表现为以竖向压缩变形为主中部剪胀变形为辅的结论相符,并证明了颗粒试样的细观力学组构与宏观变形特征有着一定的相关性。

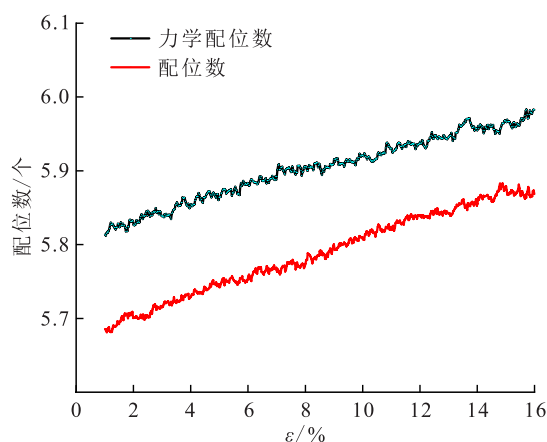


图 15 配位数与力学配位数演变规律

Fig. 15 Evolution of the coordination number and the mechanical coordination number

## 4 结论

本文基于青海省玛尔挡水电站库区某滑坡堆积体粗粒土试样的室内大型三轴试验,以及 PFC-FLAC 耦合的数值模拟方法,深入探究了粗粒土的宏观变形特征和细观力学组构特性,得出了以下结论:

a. 在围压柔性加载下,粗粒土试样呈现出应增强型特性。试样主要变形破坏区域呈非对称 X 形分布。在试样的上下两端部近似三角形区域内,颗粒几乎只发生竖直位移,且不发生旋转。

b. 模拟结果表明,在相同围压条件下,试样的三维组构分布从球状逐渐演变为椭球状。竖直方向接触数目显著增强,侧向接触数目有所减小,竖直方向接触数目的变化幅度大于侧向接触数目变化幅度。这表明着组构张量的各向异性显著变化,且水平各向异性变化程度小于竖直各向异性变化程度。

c. 细观力学组构与宏观变形的关联。通过配位数和力学配位数的分析,揭示了试样整体各向异性随着加载而增加的趋势。结合宏观颗粒位移矢量分析和细观组构张量分析,发现竖直方向受压缩引起的变形对各向异性的影响大于试样径向方向剪切破坏。试样的整体变形表现为以竖向压缩变形为主,侧向剪胀变形为辅。这进一步强调了细观力学组构与宏观变形特征之间的紧密联系。

## [ 参 考 文 献 ]

- 曹文贵,黄文健,王江营,等,2016. 土石混填体变形力学特性大型三轴试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),43(3):142-148.
- Cao W G, Huang W J, Wang J Y, *et al.*, 2016. Large-scale triaxial test study on deformation and intensity characteristics of soil-rock aggregate mixture[J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 43(3):142-148. (in Chinese)
- 耿丽,黄志强,苗雨,2011. 粗粒土三轴试验的细观模拟[J]. 土木工程与管理学报,28(4):24-29.
- Geng L, Huang Z Q, Miao Y, 2011. Meso-mechanics simulation triaxial test of coarse-grained soil[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 28(4):24-29. (in Chinese)
- 胡世兴,靳晓光,孙国栋,等,2021. 土石混合体材料大型三轴试验及 PFC-FLAC 耦合仿真研究[J]. 岩石力学与工程学报,40(增刊 2):3344-3356.
- Hu S X, Jin X G, Sun G D, *et al.*, 2021. Triaxial test and PFC-FLAC coupling simulation study on material parameters and deformation characteristics of soil-rock mixture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 40(S2):3344-3356. (in Chinese)
- 金磊,曾亚武,李欢,等,2015. 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,37(5):829-838.
- Jin L, Zeng Y W, Li H, *et al.*, 2015. Numerical simulation of large-scale triaxial tests on soil-rock mixture based on DEM of irregularly shaped particles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 37(5):829-838. (in Chinese)
- 金磊,曾亚武,2018. 土石混合体宏细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,37(6):1540-1550.
- Jin L, Zeng Y W, 2018. 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, 37(6):1540-1550. (in Chinese)
- 刘萌成,高玉峰,刘汉龙,等,2002. 粗粒料大三轴试验研究进展[J]. 岩土力学,(2):217-221.
- Liu M C, Gao Y F, Liu H L, *et al.*, 2002. Development of study on a large scale triaxial test of coarse-grained materials [J]. Rock and Soil Mechanics, (2):217-221. (in Chinese)
- 刘萌成,高玉峰,刘汉龙,2008. 应力路径条件下堆石料剪切特性大型三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,

- (1):176—186.
- Liu M C, Gao Y F, Liu H L, 2008. Study on shear behaviors of rockfill in large-scale triaxial tests under different stress paths[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, (1):176—186. (in Chinese)
- 凌华,傅华,韩华强,2017.粗粒土强度和变形的级配影响试验研究[J].*岩土工程学报*,39(增刊1):12—16.
- Lin H, Fu H, Han H Q, 2017. Experimental study on effects of gradation on strength and deformation of coarse-grained soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,39(S1):12—16. (in Chinese)
- 马幸,周伟,马刚,等,2016.最小粒径截距对颗粒体数值模拟的影响[J].*中南大学学报(自然科学版)*,47(1):166—175.
- Ma X, Zhou W, Ma G, *et al.*, 2016. Effect of minimum particle size on assembly in numerical simulation[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*,47(1):166—175. (in Chinese)
- 秦红玉,刘汉龙,高玉峰,等,2004.粗粒料强度和变形的大型三轴试验研究[J].*岩土力学*,25(10):1575—1580.
- Qin H Y, Liu H L, Gao Y F, *et al.*, 2004. Research on strength and deformation behavior of coarse aggregates based on large-scale triaxial tests [J]. *Rock and Soil Mechanics*,25(10):1575—1580. (in Chinese)
- 石熊,张家生,孟飞,等,2015.改良粗粒土填料大型三轴试验[J].*中南大学学报(自然科学版)*,46(2):645—652.
- Shi X, Zhang J S, Meng F, *et al.*, 2015. Large-scale triaxial test on modified coarse-grained fillers[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 46(2):645—652. (in Chinese)
- 邵磊,迟世春,贾宇峰,2009.堆石料大三轴试验的细观模拟[J].*岩土力学*,30(增刊1):239—243.
- Shao L, Chi S C, Jia Y F, 2009. Meso-mechanical simulation of a large scale triaxial test of rockfill materials [J]. *Rock and Soil Mechanics*,30(S1):239—243. (in Chinese)
- 石崇,2018.颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[M].北京:中国建筑工业出版社.
- Shi C, 2018. Particle Flow (PFC5.0) Numerical Simulation Technology and Application[M]. Beijing: China Architecture and Building Press. (in Chinese)
- 吴锐,邓清禄,付敏,等,2016.碎石尺寸对碎石土强度影响的大型直剪试验研究[J].*长江科学院院报*,33(8):80—85.
- Wu R, Deng Q L, Fu M, *et al.*, 2016. Large direct shear test on the influence of stone size on the strength of gravel soil[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*,33(8):80—85. (in Chinese)
- 夏加国,胡瑞林,祁生文,等,2017.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*,36(8):2031—2039.
- Xia J G, Hu R L, Qi S W, *et al.*, 2017. Large-scale triaxial shear testing of soil rock mixtures containing oversized particles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,36(8):2031—2039. (in Chinese)
- 谢亦朋,张聪,阳军生,等,2021.基于局部粗粒化离散元的冰水堆积体隧道围岩破坏特征与加固措施研究[J].*岩石力学与工程学报*,40(3):576—589.
- Xie Y P, Zhang C, Yang J S, *et al.*, 2021. Study on failure characteristics and reinforcement measures of surrounding rock of glacial deposit tunnels based on coarse-grained DEM[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,40(3):576—589. (in Chinese)
- 杨贵,肖杨,高德清,2010.粗粒料三维颗粒流数值模拟及其破坏准则研究[J].*岩土力学*,31(增刊2):402—406.
- Yang G, Xiao Y, Gao D Q, 2010. Study of three-dimensional particle flow numerical simulation and failure criterion for coarse-grained soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*,31(S2):402—406. (in Chinese)
- 杨忠平,田鑫,雷晓丹,等,2020.土石混合料剪切特性影响因素的离散元数值研究[J].*工程地质学报*,28(1):39—50.
- Yang Z P, Tian X, Lei X D, *et al.*, 2020. Particle discrete element numerical study on factors of shear strength characteristics for soil-rock mixture [J]. *Journal of Engineering Geology*,28(1):39—50. (in Chinese)
- 张强,汪小刚,赵宇飞,等,2019.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*,41(8):1545—1554.
- Zhang Q, Wang X G, Zhao Y F, *et al.*, 2019. 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*,41(8):1545—1554. (in Chinese)
- 张志华,2015.基于PFC3D的粗粒土三轴试验细观数值模拟[D].宜昌:三峡大学档案馆.
- Zhang Z H, 2015. Mesoscopic Numerical Simulation of Triaxial Test of Coarse Grained Soil Based on PFC3D [D]. Yichang: The Archive of China Three Gorges University. (in Chinese)

- 周博,汪华斌,赵文锋,等,2012.黏性材料细观与宏观力学参数相关性研究[J].岩土力学,33(10):3171—3175.
- Zhou B, Wang H B, Zhao W F, *et al.*, 2012. Analysis of relationship between particle mesoscopic and macroscopic mechanical parameters of cohesive materials [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 33(10):3171—3175. (in Chinese)
- Athanassiadis A G, Miskin M Z, Kaplan P, *et al.*, 2014. Particle shape effects on the stress response of granular packings[J]. *Soft Matter*, 10(1):48—59.
- Fonseca J, O'Sullivan C, Coop M R, *et al.*, 2013. Quantifying the evolution of soil fabric during shearing using scalar parameters [J]. *Géotechnique*, 63(6):818—829.
- Hall S A, Bornert M, Desrues J, *et al.*, 2010. Discrete and continuum analysis of localised deformation in sand using X-ray  $\mu$ CT and volumetric digital image correlation[J]. *Géotechnique*, 60(5):315—322.
- Liu L F, Zhang Z P, Yu A B, 1999. Dynamic simulation of the centripetal packing of mono-sized spheres [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 268(3-4):433—453.
- Oda M, 1972. Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material [J]. *Soils and Foundations*, 12(1):17—36.
- Thornton C, 2000. Numerical simulations of deviatoric shear deformation of granular media [J]. *Géotechnique*, 50:43—53.
- Xu W J, Hu L M, Gao W, 2016. Random generation of the meso-structure of a soil-rock mixture and its application in the study of the mechanical behavior in a landslide dam[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 86:166—178.

(责任编辑:黄维婷)



(上接第 290 页)

- Prakash P N S, Rajkumar N, 2021. Improved local fisher discriminant analysis based dimensionality reduction for cancer disease prediction[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12:8083—8098.
- Qi C C, Tang X L, 2018. A hybrid ensemble method for improved prediction of slope stability[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 42(15):1823—1839.
- Qin Y G, Luo Z Q, Wang J, *et al.*, 2019. Evaluation of goaf stability based on transfer learning theory of artificial intelligence[J]. *IEEE Access*, 7:96912—96925.
- Tu W F, Li L P, Li S C, *et al.*, 2019. Research on the application of dynamic weighting on the rock mass quality rating [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(3):87.
- Wang J C, Guo J, 2019. Research on rock mass quality classification based on an improved rough set-cloud model[J]. *IEEE Access*, 7:123710—123724.
- Wu A Q, Zhao W, Zhang Y H, *et al.*, 2023. A detailed study of the CHN-BQ rock mass classification method and its correlations with RMR and Q system and Hoek-Brown criterion [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 162:105290.
- Zheng S, Jiang A N, Yang X R, *et al.*, 2020. A new reliability rock mass classification method based on least squares support vector machine optimized by bacterial foraging optimization algorithm[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020:3896215.

(责任编辑:黄维婷)