

蔡韩, 刘宏, 向喜琼, 等. 徐州粉土三轴压缩特性及二维离散元数值模拟[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(6): 214-226. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.018

CAI Han, LIU Hong, XIANG Xiqiong, et al. Experimental and 2D DEM Simulation on the triaxial compression characteristics of Xuzhou silt[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(6): 214-226. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.018

徐州粉土三轴压缩特性及二维离散元数值模拟

蔡韩¹, 刘宏², 向喜琼², 王文俊², 李麟玮¹

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学喀斯特地质资源与环境教育部实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要:【目的】徐州粉土分布广泛, 为了解其三轴压缩特性, 给工程建设提供参数依据, 【方法】对取自徐州地铁一号线的粉土, 进行常规三轴压缩试验, 不断施加轴向压力直到土体破坏, 将整个试验过程看作是外加荷载对土体的做功过程。在此基础上, 采取数值模拟方法, 对徐州粉土的三轴试验过程进行模拟。【结果】结果显示: 粉土峰值强度、残余强度和变形模量均随围压增大而增大; 不同围压下均表现为剪切破坏, 低围压下橡皮膜扭曲更明显。各类裂纹均逐渐增加, 试样微裂纹在应力达到峰值时开始激增, 剪裂纹占比逐渐增加; 加载初期, 荷载做功几乎完全转化为应变能, 整个过程中应变能先增大后减小, 摩擦能和阻尼能则一直增大至模型破坏; 应变能、摩擦能与阻尼能之和约占边界能的60%, 且随轴向应变增速变化与粉土应力-应变曲线关系密切。【结论】结果表明: 数值模拟结果与室内试验结果很好吻合; 剪切裂纹主导了粉土的最终破坏; 根据能量变化将粉土三轴压缩过程破坏模式划分为峰值前的孔隙压密、弹性变形和塑性变形三个阶段, 及峰值后的加速破坏和强度剩余两个阶段。然而随着围压的增大, 峰后加速破坏和强度剩余阶段可能会消失。

关键词: 粉土; 三轴压缩; 离散元方法; 微裂纹演化; 能量演化; 破坏阶段; 数值模拟; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.018

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)06-0214-13



Experimental and 2D DEM simulation on the triaxial compression characteristics of Xuzhou silt

CAI Han¹, LIU Hong², XIANG Xiqiong², WANG Wenjun², LI Linwei¹

(1. College of Resoure and Environment Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment, Ministry of Education, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract: [Objective] Silt from Xuzhou is widely dispersed. In order to comprehend its triaxial compression characteristics and offer a parameter foundation for engineering buildings, [Methods] the silt from Xuzhou Metro Line 1 was subjected to the standard triaxial compression test, in which the axial pressure was applied constantly until the soil was destroyed. The entire test procedure can be thought of as the applied load on the soil's work process. On this premise, the numerical simulation approach is applied to simulate the triaxial test process of Xuzhou silt. [Results] The results show that: With the increase of confining

收稿日期: 2024-10-13; 修回日期: 2024-11-27; 录用日期: 2024-12-24; 网络出版日期: 2025-03-03

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3003301)

作者简介: 蔡韩(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土体研究。E-mail: 3193239423@qq.com

通信作者: 刘宏(1974—), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土体研究。E-mail: 43573194@qq.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

pressure, the peak strength and residual strength of silt increase linearly, and the deformation modulus shows a positive correlation trend; it shows shear failure under different confining pressures, and the rubber membrane distortion is more obvious under low confining pressure. All kinds of cracks gradually increase, the microcracks of the sample begin to increase sharply when the stress reaches the peak value, and the proportion of shear cracks gradually increases; at the initial stage of loading, the load work is almost completely converted into strain energy; during the whole process, the strain energy increases first and then decreases, while the friction energy and damping energy increase until the model is destroyed; the sum of strain energy, friction energy, and damping energy accounts for about 60% of the boundary energy, and the change with the axial strain growth rate is closely related to the stress-strain curve of silt. [Conclusion] The numerical simulation results are in excellent agreement with the laboratory test result. Shear cracks dominate the final failure of silt. According to the energy change, the failure mechanism of the triaxial compression process of silt is separated into three stages; pore compaction, elastic deformation, and plastic deformation before the peak value, and two stages; accelerated failure and strength residual after the peak value. However, with the increase of confining pressure, the post-peak accelerated failure and strength residual stage may disappear.

Keywords: silt; triaxial compression; discrete element approach; microcrack evolution; energy evolution; failure stages; numerical simulation; influencing factors

0 引言

粉土是砂性土与黏性土之间的过渡性土壤, 它既有砂性土的性质也有黏性土的性质^[1]。随着工程建设的发展, 不可避免会有粉土地基, 在工程扰动的影响下, 粉土会呈现一定的变形破坏, 严重者甚至会造成大的地质灾害。粉土的变形破坏程度取决于其力学特性, 因此对于粉土在三轴压缩条件下的力学特性、变形破坏机理研究有重要意义。

目前, 国内外学者已经对粉土开展了大量的三轴试验研究。宋丹青等^[2]对南京粉土按不同含水率、不同干密度重塑制样, 进行饱和静三轴固结排水剪切试验, 得出粉土强度会受初始制样含水率和干密度的影响; 彭丽云等^[3]、董金梅等^[4]都认为粉土在低围压下的变形呈应变软化型, 随围压增大应变软化现象则会消失, 变为应变硬化型; 董山等^[5]认为粉土随含水率增大, 变形会由应变软化向应变硬化转化; 肖军华等^[6]则认为粉土变形模式与最优含水率下的压实系数有关, 压实系数小于 0.85 时均为应变硬化型。此外陈宇等^[7]发现黄土状粉土动抗剪强度大幅度低于静抗剪强度, 而其不固结不排水剪切应力应变曲线没有明显的峰值, 固结不排水剪切则存在明显的峰值。粉土强度与许多因素有关, 刘寒冰等^[8]、郑英杰等^[9]认为冻融作用会导致粉土抗剪强度和动抗剪强度降低; 王跃^[10]对不同细粒含量的粉土进行静力学特性研究, 认为粗颗粒增加了颗粒间的摩擦系数, 导致粗颗粒越多, 抗剪强度越大; 孟凡丽等^[11]分析了卸荷应力路径下饱和粉土的剪切波速与抗剪强度的关联, 并给出了剪切波速与抗剪强度的表达关系式。于庆龙^[12]分析了不同动应力幅值下粉土的残余应变

增长规律和振陷模型参数与动应力幅值的关系, 发现累积残余应变随动应力幅值增大而增大, 并在一定值时会发生突变式增大, 并认为该值即为粉土的临界动应力。

传统的室内试验能够捕捉到宏观力学特性, 但是很难分析细观的力学特性。离散元方法可以分析颗粒间的接触力和非接触力, 弥补了实验室无法在宏观现象建立联系的缺陷, 被广泛应用于研究土体宏观双轴、三轴试验^[13-14]。不少学者将其应用于砂土细观变形^[15]、粗粒土力学特性^[16]及粉土动力特性^[17]等研究。周健等^[18]采用颗粒流方法模拟了砂土剪切带的发展过程; 刘成等^[19]采用 YADE 三维离散元软件分析了颗粒的细观参数对宏观参数的影响。邢炜杰等^[20]通过黏土室内三轴固结排水试验得到土体的应力-应变曲线及抗剪强度指标, 采用 PFC^{3D} 建立离散元模型, 同室内试验结果对比, 描述了细观参数与宏观力学特性的一般规律, 并研究了细观参数对宏观力学特性的影响; 张翀等^[21]采用 4 种不同形状颗粒进行双轴试验模拟, 发现颗粒形状对强度、变形模量均有影响; 张岩等^[22]通过室内试验和数值模拟的方法研究了不同黏粒含量下粉土的无侧限抗压强度, 结果表明, 不同黏粒含量下粉土的无侧限抗压强度呈先降低后增大的规律; 吴尚杰^[23]对厦蓉高速某路段粉土填料进行室内直剪试验及 PFC 直剪试验数值模拟, 并分析了颗粒转动量和平均相对位移的规律及剪切带的分布规律, 发现颗粒转动量和相对位移均随粉土试样高度呈正态分布, 而剪切带宽度会随压力的增大有相应的变化, 但是剪切带中心偏移量基本不变。

综上所述, 目前对于粉土的力学性质、本构模型及离散元数值模拟方面的研究, 国内外学者作出了

大量已见成效的贡献,然而离散元数值模拟在粉土三轴力学性质方面的深入研究还有所欠缺。如土体破坏形成宏观剪切面是由微观上微裂纹演化而来,微裂纹演化在研究土体破坏机理过程中起重要作用,同样,土体破坏可以看作能量演化的结果^[24],能量演化在分析土体破坏进程中至关重要;粉土在徐州分布广泛,徐州地铁一号线覆盖层主要为粉土,粉土的力学性质对于工程的重要性不言而喻。为了给相关工程项目提供依据,本研究利用室内标准三轴压缩试验和 PFC^{2D} 离散元数值模拟技术,探讨了粉土在不同围压作用下的力学行为、微裂纹发展及能量演化规律,并利用能量变化规律划分粉土三轴压缩的破坏阶段。

1 粉土常规三轴压缩特性试验研究

1.1 试验准备

1.1.1 原材料

试验土样取自徐州一号地铁线,呈灰黄、浅灰色,天然状态下较湿,中密,有韧性,干强度低,摇振反应迅速,局部含黏性土。处理后的粉土照片如图 1 所示,其颗粒级配曲线如图 2 所示。通过土的含水率、液塑限、击实试验等室内试验得到土的物理力学性质(见表 1)。



图 1 处理后的粉土

Fig. 1 The processed silt

1.1.2 试验方法

试验采用常规三轴压缩的方法,仪器为多功能非饱和土反压界面剪切三轴试验系统,按《土工试验规程》(YS/T 5225—2016),采用击实法制样。将重塑

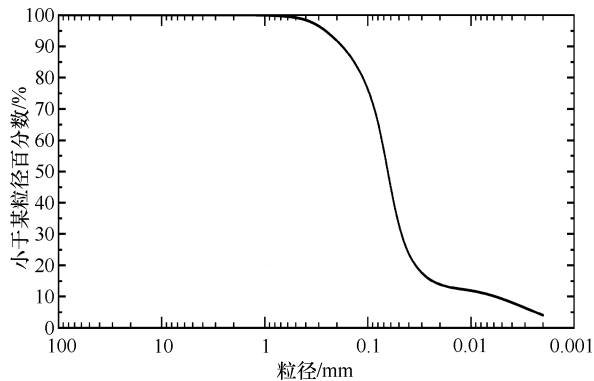


图 2 粉土颗粒级配曲线

Fig. 2 Silt particle grading curve

土样烘干后,称取一定质量的土样,按设定含水率喷洒一定质量的水,将其置入密封袋内 24 h,测定其含水率差值小于 $\pm 1\%$ 方可制样。将土样分 5 层击实,制成直径 39.1 mm、高 80 mm 的标准圆柱体试样。采用抽真空饱和的方法将试样饱和,抽真空后将试样置于桶中饱和 24 h,采用多功能非饱和土反压界面剪切三轴试验系统的 B 值检测功能检测其饱和程度, B 值达到 0.95 以上,认为其完全饱和,满足试验条件。粉土的常规三轴压缩过程,采用准静态的方法进行压缩,轴向加载通过位移控制,加载速率为 0.05 mm/min。本次试验围压设置为 100 kPa、150 kPa、200 kPa、300 kPa。

1.2 试验结果分析

1.2.1 常规三轴压缩应力-应变试验曲线关系

试验过程中试样受压直至破坏的应力-应变曲线如图 3(a)所示。曲线开始时轴向应变变化非常小,呈近直线上升,这是由于土体饱和后,土颗粒之间的孔隙充满了水,而土颗粒和水都不可压缩,产生的应变非常小。当加载一段时间后曲线开始弯曲,并达到一个峰值,此时由于土体开始出现剪切带,土体结构发生松弛,偏应力无法继续上升,开始缓慢下降,最后趋于一个稳定值。表明土体发生破坏后在一定应力条件下仍有一定的强度,并非不能再承担任何荷载,在塑性理论中,这被称为应变软化。随着围压的升高,偏应力峰值和残余应力也随之增大,这是由于围压越大,土的压实程度越高,颗粒间的咬合力增强,故而抵抗剪切的能力随之增强,峰值强度和残余强

表 1 粉土的物理力学指标

Table 1 Physical properties of soil samples

名称	含水率/%	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	比重	孔隙比	液限/%	塑限/%	塑性指数
粉土	24	1.96	1.6	2.68	0.66	29.3	22.7	6.6

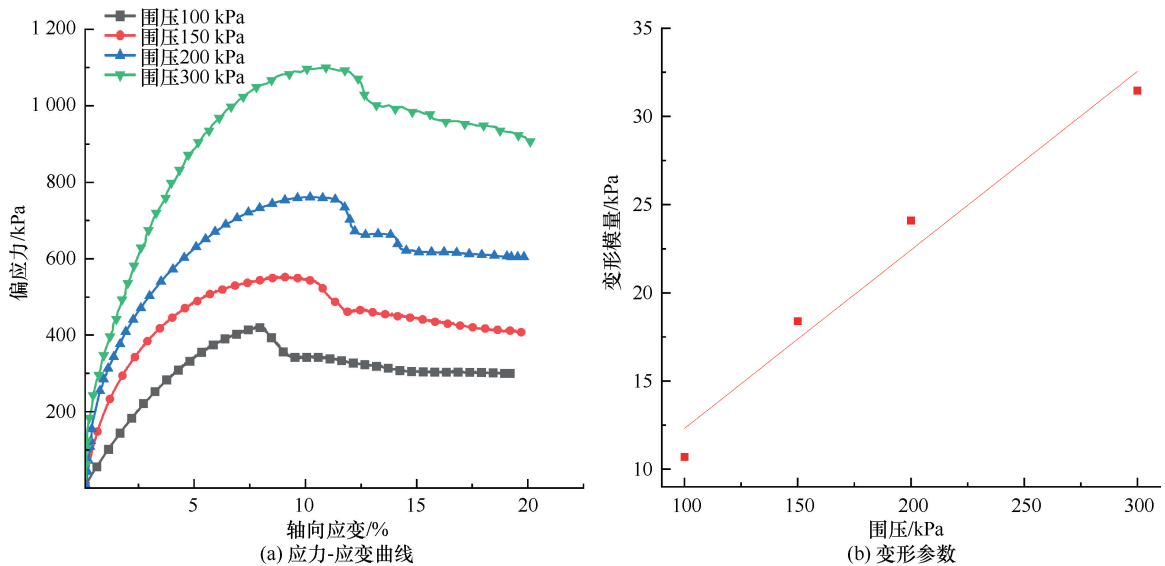


图3 粉土室内三轴压缩试验力学特性

Fig. 3 Mechanical properties of silt experimental triaxial compression test

度就越高。

土的变形中含有不可恢复的非弹性变形, 根据常规三轴压缩试验得出的应力-应变曲线可以求得土的变形模量, 土的变形模量一般与弹性理论中的弹性模量在定义上相同, 围压不变时, 施加在试样竖直方向上的应力与试样发生轴向应变的比值。文中变形模量取峰值应力一半与原点连线的斜率, 即峰值应力一半与其对应轴向应变的比值。变形模量随围压的变化关系如图 3(b) 所示。随着围压的增大, 变形模量会随之增大, 这是由于高围压下, 土体被压得更密实, 土体抵抗变形的能力就越强, 变形模量就会越大。

1.2.2 常规三轴压缩强度特征分析

分析常规三轴试验应力-应变曲线, 可以看出粉土峰值强度和残余强度都随围压的增大而增大, 破坏后的粉土强度并不会直接降为 0, 而是趋于一个稳定的值, 由于土体的破坏面之间仍然保持一定的摩擦作用, 即便在破坏之后, 土体依然能够承受一定的荷载, 表现为土壤的残余强度。

1990 年莫尔提出, 一个平面上的抗剪强度取决于作用于这个平面上的正应力, 最简单的莫尔包线是线性的, 公式为

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cot \varphi} = \sin \varphi \quad (1)$$

可以表示为

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

而在以最大主应力表示时, 可以得到

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (3)$$

式中, σ_1 、 σ_3 、 c 、 φ 、 τ_f 分别为峰值强度、围压、黏聚力、内摩擦角和抗剪强度。

这是库仑于 1776 年提出的库仑公式, 其中 c 和 φ 是黏聚力和内摩擦角, 式 (1) 或式 (2) 即为莫尔-库仑强度准则, 该准则被广泛用于解释岩土体的强度特性。依据室内强度试验数据, 采用摩尔-库仑强度准则进行分析, 可以确定土体的强度参数, 包括黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。在不同水平的围压影响下, 粉土的峰值强度计算得到其黏聚力 c 为 10.34 kPa, 内摩擦角 φ 为 39.5°。根据残余强度计算结果, 残余黏聚力为 2.1 kPa, 残余内摩擦角为 29.3°。

1.2.3 超孔隙水压力及有效应力路径分析

如图 4 所示, 图 4(a) 为不同围压下粉土固结不排水剪切试验的超孔隙水压力变化曲线, 在加载初期, 超孔隙水压力增加, 很快达到一个峰值, 而后开始下降, 一段时间后超孔隙水压力由正转负, 最后于应力峰值对应轴向应变处开始趋于稳定值, 即为临界状态。此外, 围压越小临界状态超孔隙水压力绝对值越大; 随着围压的增大, 超孔隙水压力峰值与临界状态超孔隙水压力的差值越大, 与前人研究结果相符^[25]。

粉土从加荷至破坏过程的有效应力路径如图 4(b) 所示, 图中 q' 为偏应力, p' 为平均有效应力。有效应力路径呈弯曲发展, 随加载过程先往左侧弯曲后向右侧弯曲。有效应力路径对围压敏感性较高, 低围压下有效应力路径的弯曲幅度最大, 随着围压的增大弯曲幅度越来越小。低围压下, 土样破坏后的偏应

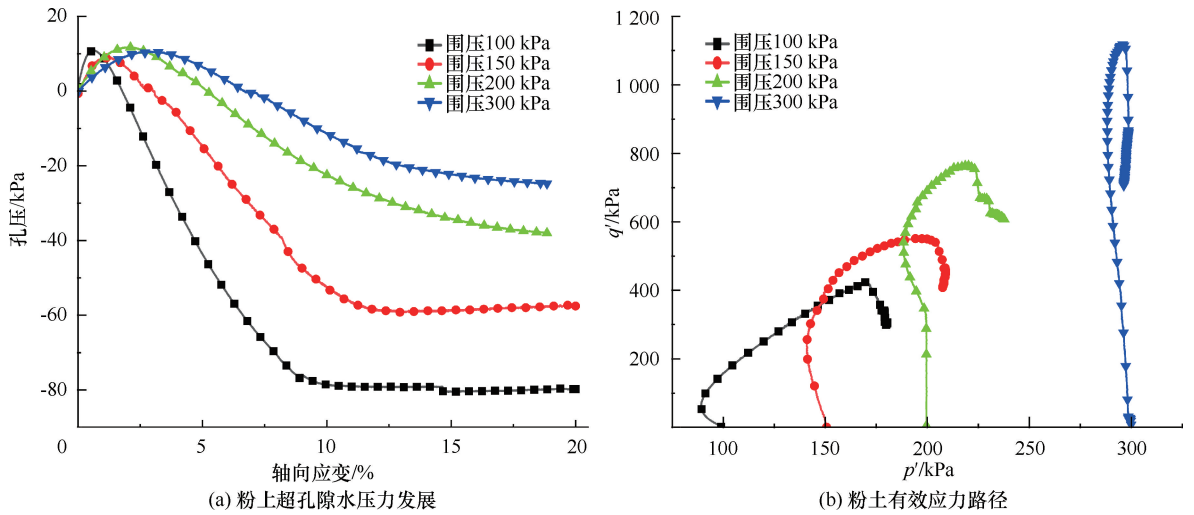


图4 粉土孔压发展及有效应力路径

Fig. 4 Pore water pressure development and effective stress path of silt

力值 q' 下降速度相对缓慢, 随着围压增大, 偏应力值下降速度增大。

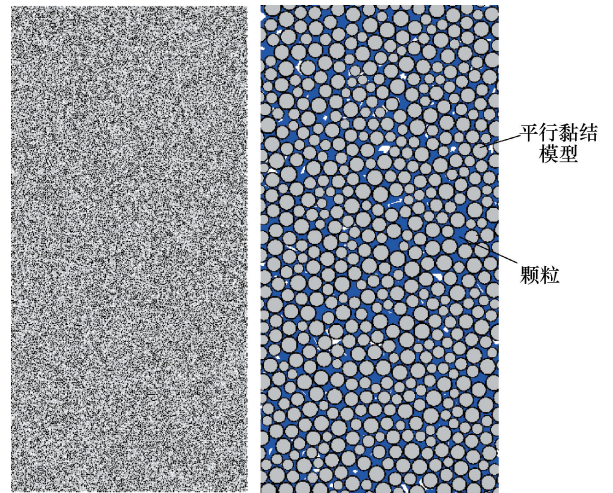
2 粉土常规三轴压缩数值模拟

粉土的塑性破坏通常认为是土颗粒间的相对位置发生移动, 这会导致裂纹的产生。随着裂纹的持续扩展并最终连接成为宏观破坏面, 土体就会发生失稳破坏。离散元数值模拟软件 PFC^{2D} 能够有效地模拟颗粒间的移动和裂纹的生成与扩展过程。基于此, PFC^{2D} 离散元模拟程序是分析粉土的力学行为和变形破坏过程的有力工具, 故本研究采用 PFC^{2D} 数值模拟从微观层面深入理解粉土的损伤和破坏机制。

2.1 数值模拟概况

室内试验中试样饱和后的密度为 $1\ 960\ \text{kg}/\text{m}^3$, 试样采用直径 $39.1\ \text{mm}$, 高度 $80\ \text{mm}$ 的标准试样, 在 PFC^{2D} 中生成数值试样如图 5 所示, 数值试样与室内试验试样尺寸保持一致, 由于土颗粒非常小且数量巨大, 如果保持数值颗粒与土颗粒同尺寸, 将难以通过软件运行, 所以在数值模拟中, 在满足实际受力特性的条件下, 对颗粒进行一定程度放大^[26], 文中土颗粒的粒径设定为 $0.12\sim 0.2\ \text{mm}$, 颗粒随机分布, 颗粒密度为 $1\ 960\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。鉴于粉土中含有黏聚力较强的黏粒, 并且考虑到在实际地下环境中粉土也会形成胶结, 在模拟颗粒间的接触时, 采用平行黏结模型来描述土颗粒之间的本构接触作用^[27]。该模型由 30 844 个球形颗粒构成, 有 52 591 个接触点, 模型如图 5 所示。加载过程中, 模型采用了准静态加载方式, 通过控制上下墙的位移实现, 其中上下墙的加载速度设定为 $0.05\ \text{m}/\text{s}$ (在 PFC^{2D} 中, 准静态加载通常

指加载速度低于 $0.2\ \text{m}/\text{s}$)^[28]。此外, 加载过程中, 采用体积不变法模拟不排水过程^[29]。

图5 PFC^{2D} 数值模型Fig. 5 PFC^{2D} numerical model of silt

本研究采用了“试错法”^[30]对粉土的细观参数进行校准, 确定粉土的各项参数。首先, 通过调整接触模量和平行黏结模量来控制压缩弹性模量, 在此过程中需要保持刚度比和内摩擦角不变。接着, 通过改变刚度比调节泊松比。最后, 改变平行黏结法向强度和切向强度以调节粉土的黏聚力和内摩擦角^[31], 完成参数校准, 确定粉土的细观参数如表 2 所列。

2.2 数值模拟和试验结果对比

2.2.1 应力-应变曲线对比

采用表 2 中的细观参数进行粉土三轴压缩数值模拟。数值模拟应力-应变曲线同室内试验对比如图 6 所示。从对比图中可以看出, 随着围压的增加, 粉

表 2 粉土 PFC^{2D} 细观参数Table 2 mesoscopic parameters of silt by PFC^{2D}

参 数	取 值
颗粒最小半径/mm	0.12
颗粒密度/kg·m ⁻³	1 960
颗粒刚度比	3.0
法向黏结强度/Pa	8.1×10^5
切向黏结强度/Pa	2.7×10^5
颗粒平行黏结模量/Pa	1.2×10^7
颗粒摩擦角/(°)	60

土的峰值强度和残余强度均呈现出线性增长的趋势。此外,离散元数值模拟与试验结果的峰值强度差异较小,峰值强度数值模拟值与室内试验值最大相差 10 kPa,模拟结果与实际试验结果一致性较好。

在低围压下,粉土变形模量离散元模拟与试验结果非常吻合,这是由于数值模拟对于围压束缚有着理想控制。但是高围压下应力-应变曲线差距较大,这是由于现实情况下粉土中存在黏粒,固结过程中,在围压的束缚下,会增强黏聚力,导致在压缩过程前期的变形模量得到进一步提升,在压缩后期黏聚力被破坏后,变形模量会大幅变小。而在数值模拟过程

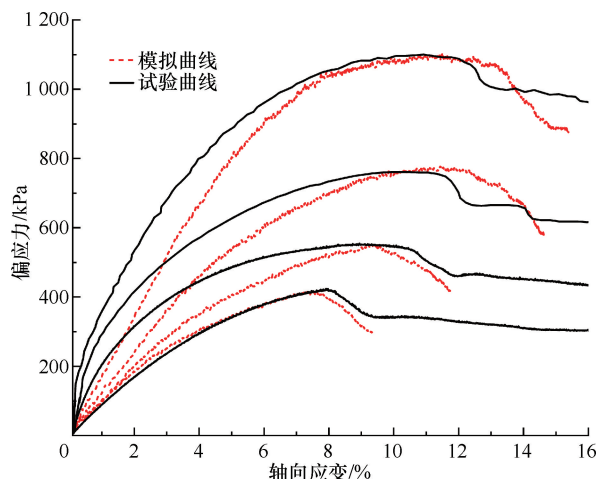


图 6 室内试验和数值模拟应力-应变曲线对比

Fig. 6 Comparison of stress-strain curves between laboratory test and numerical simulation

中,没有考虑黏粒的作用,在低围压下拟合结果吻合后,围压增大并不能大幅提高其变形模量,故出现高围压下强度吻合,而曲线差异较大的现象。

2.2.2 粉土破坏模式对比

如图 7 所示,观察粉土试样最终破坏模式在室内

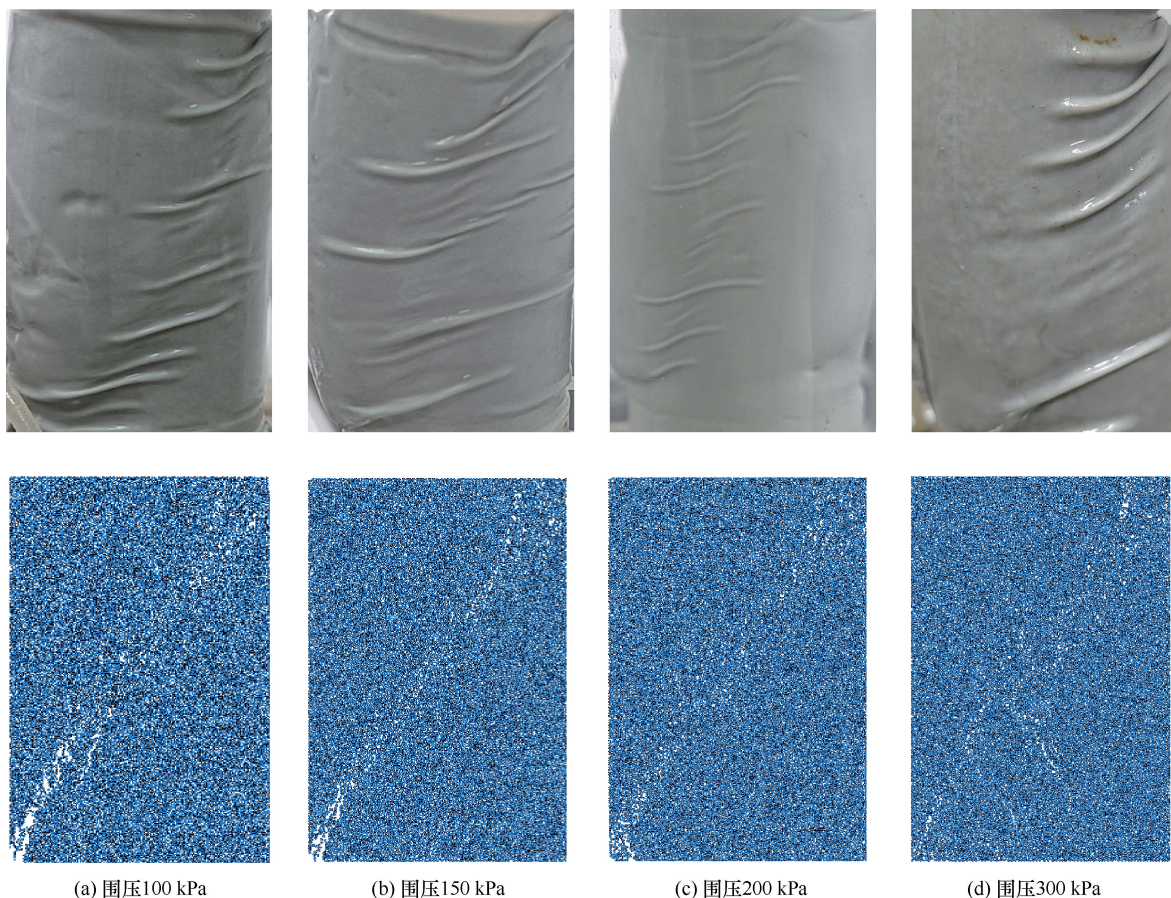


图 7 粉土三轴压缩试验与数值模拟破坏模式对比

Fig. 7 Comparison of failure modes between triaxial compression test and numerical simulation of silt

三轴压缩试验情况下的结果可以发现,不同围压下剪切加载结束时的试样形态,呈现出应变局部化变化,即出现剪切带。根据剪切带明显程度,同时依据橡皮膜的褶皱数量及其扭曲程度可以发现,低围压下的应变局部化变化更明显。不同围压下的剪切带均能贯通试样,剪切带的角度大致相同。数值模拟情况下,试样受到轴向力之后,粉土试样的胶结被破坏,粉土最终形成的破坏面如图7所示。不同围压下数值试样均发生剪切破坏,剪切带与室内试验相符,不同围压下剪切带角度大致相同,在100 kPa围压下剪切带最为明显,围压越高剪切带逐渐不明显,和室内试验破坏模式吻合。

综上可知,对于粉土的宏观力学行为特性,PFC^{2D}模拟中能很好地得到反应,基于此下面通过数值模拟对粉土损伤过程和微观演化规律进行分析。

3 常规三轴压缩破坏演化过程及机理探讨

3.1 力链结果分析

在分析颗粒材料的破坏演化过程时,分析颗粒在加载过程中内部受力变化情况极为重要,在PFC^{2D}中分析颗粒受力主要依靠接触力链的分布进行分析,接下来我们以围压100 kPa为例对加载过程中接触力链演化过程进行分析。

接触力链表示两颗粒之间力的作用,力链的粗细、颜色深浅均能表示力的大小,力链越粗颜色越深表示接触力越大。由图8可知,加载初期,试样内部强弱力链分布均匀,不具方向性,符合自然状态下粉土颗粒间的接触;随着加载进行,轴向应变达到

2%,接触力链分布发生变化,接触力链沿轴向平行排布,并逐渐产生较强的粗力链以抵抗轴向外力的作用;在轴向应变达到8%时,粉土试样处于应力峰值附近,此时试样中部分力链颜色变浅,试样中部发生力链断裂,部分力链明显变粗发生应力集中现象;此后直至轴向应变达到15%,试样内部力链并无太大变化,剪切带附近应力集中现象更加明显,剪切带左下角由于颗粒破坏严重,力链消失,表明左下角颗粒间已无接触,完全离散。

3.2 微观裂纹演化分析

土体破坏过程涉及土体内部微裂纹的扩展,这些裂纹形成和扩展直接导致土体结构和强度受损,最终导致土体破坏。在微观层面,通过离散元数值模拟软件PFC^{2D},可以详细记录加载过程中微裂纹的空间分布和生成数量等信息。这些模拟结果有助于深入理解粉土在外荷载作用下的损伤过程和微观演化规律。在PFC^{2D}中离散裂隙网络(DFN)可以对加载过程中产生的微裂纹信息进行记录,从而监测粉土在外荷载作用下的损伤过程和微观演化规律。

如图9所示,粉土试样内部微裂纹的扩展在不同围压的作用下整体呈现的规律相似,即随着轴向变形的增加从没有裂纹到先产生拉伸裂纹,随后剪切裂纹产生并缓慢增长,最后拉伸裂纹和剪切裂纹均在同一时刻快速增长,直至试样破坏。由于粉土抗压不抗拉的特性,刚开始先产生拉伸裂纹并缓慢增加,此时微裂纹总数曲线和拉伸裂纹曲线重合,剪切裂纹并没有产生;随着轴向应变增大,轴向偏应力达到峰值应力,此时拉伸裂纹和总裂纹曲线开始分离,剪切裂

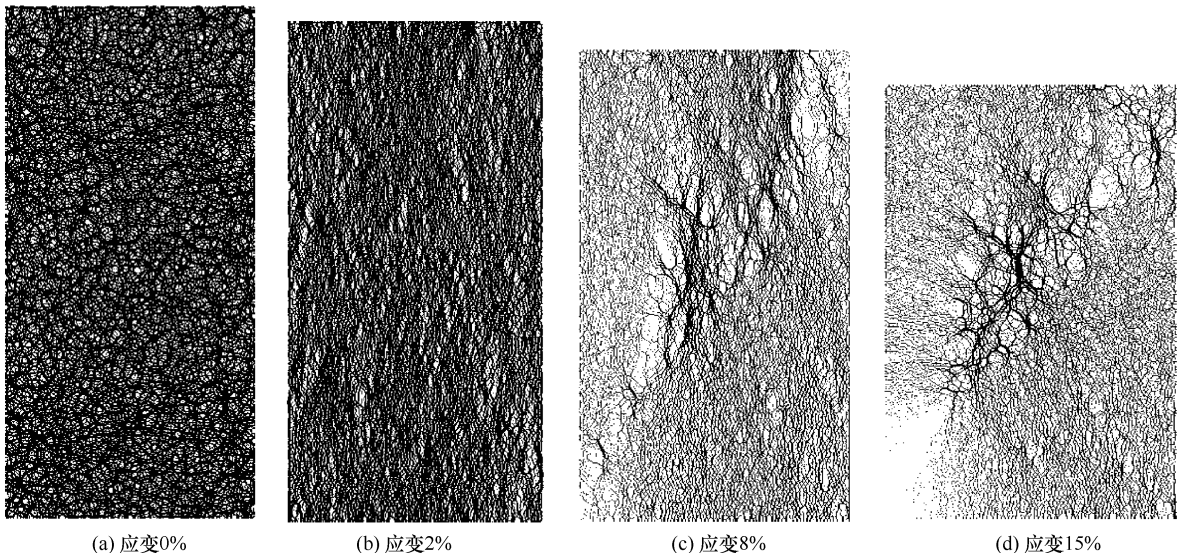


图8 加载过程中接触力链图

Fig. 8 The contact force chain diagram during the loading process

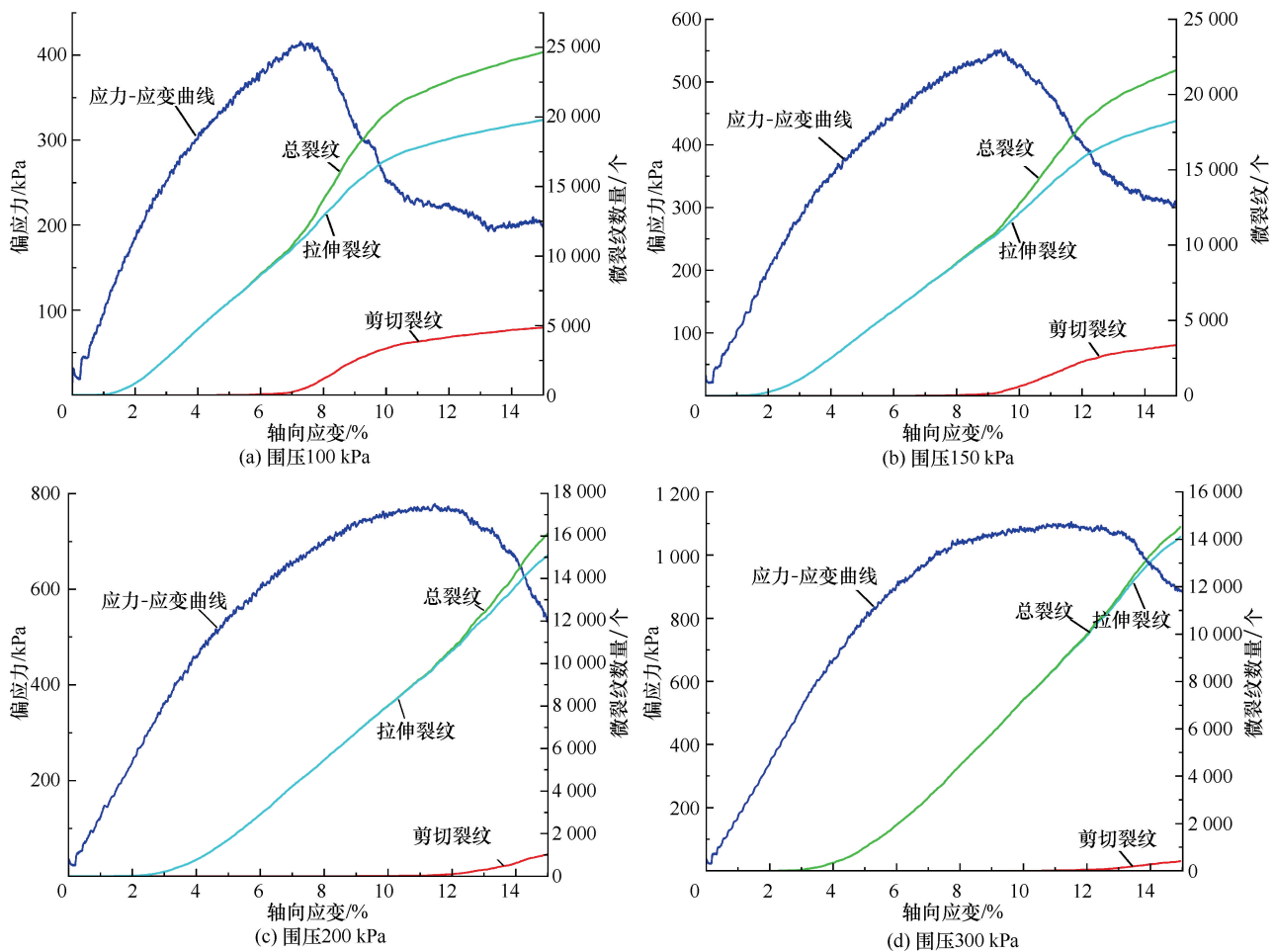


图9 数值模拟试样内部微裂纹演化曲线

Fig. 9 Numerical simulation of the evolution curve of microcracks inside the sample

纹开始增加,直至试样破坏;拉伸裂纹和剪切裂纹的数量于整个压缩过程中都在上升,自剪切裂纹出现,其数量始终小于拉伸裂纹。然而,从拉伸裂纹和剪切裂纹的占比来看,剪切裂纹的占比随加载进程在逐渐提高。该现象表明,粉土最终的宏观破坏模式由剪切裂纹主导并表现为剪切破坏。此外,对比不同围压下微裂纹发展曲线可以发现,低围压下微裂纹发展曲线斜率明显大于高围压下斜率,这说明微裂纹的扩展速率会受到较高围压的限制;同时,低围压下微裂纹、拉伸裂纹、剪切裂纹数量均大于高围压下的数量,尤其是剪切裂纹数量差距明显,这也正好符合室内试验低围压下较高围压下剪切带更明显的试验结果。

3.3 微观能量演化分析

土体的损伤是能量累积与转化的过程。在 PFC^{2D} 离散元模拟程序中,边界能 E 、应变能 E_k 、滑移能 E_μ 、阻尼能 E_β 和动能 E_c 可以通过 FISH 函数加载过程实时监测。由于本试验采用的是准静态加载方式,动能的影响可以忽略不计,只有在试样发生破坏时,

部分边界能可能转化为动能。在该系统中,阻尼作用会将动能转化为阻尼能和摩擦能,因此在此不将动能作为主要讨论对象。能量计算公式为^[32]

$$E_k = \frac{1}{2} \left[\frac{(F_n^1)^2}{k_n} + \frac{\|F_s^1\|^2}{k_s} \right] \quad (4)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \left[\frac{\bar{F}_n^2}{\bar{k}_n \bar{A}} + \frac{\|\bar{F}_s\|^2}{\bar{k}_s \bar{A}} + \frac{\|\bar{M}_b\|^2}{\bar{k}_n \bar{I}} \right] \quad (5)$$

$$E_\mu = E_\mu - \frac{1}{2} [(F_s^1)_0 + F_s^1] \times \Delta \delta_s^u \quad (6)$$

$$E_\beta = E_\beta - F_d \times (\delta \Delta_t) \quad (7)$$

式中: F_n^1 为线性法向力; F_s^1 为线性剪切力; $(F_s^1)_0$ 为初始时间步长的线性剪切力; F_n 为平行黏结法向力; F_s 为平行黏结剪切力; F_d 为阻尼力; \bar{M}_b 为平行键力矩; \bar{k}_n 为线性法向刚度; \bar{k}_s 为线性剪切刚度; \bar{k}_n 为平行黏结法向刚度; \bar{k}_s 为平行黏结剪切刚度; \bar{A} 为平行黏结截面的面积; \bar{I} 为转动惯量; $\Delta \delta_s^u$ 为剪切位移增量的滑移部分; δ 为相对平动速度; 冒号符号

表示进行累加计算。

如图 10 所示, 三轴压缩数值模拟能量演化规律如下: 在不同围压作用下, 随着轴向应变的增加, 内部能量的演化也呈相似的规律。在此能量系统中, 墙体的边界是能量的总来源, 以能量转化的角度来看, 在加载的初始阶段, 所有的边界能都转化为了应变能, 而摩擦能和阻尼能几乎可以忽略不计。随着应力-应变曲线的进展, 由于粉土试样内部开始形成微裂纹, 系统中接触所积累的应变能开始逐渐转化为摩擦能和阻尼能; 在轴向偏应力达到峰值之前, 边界能和应变能都在持续增加, 边界能和应变能逐渐分离, 摩擦能和阻尼能也在以缓慢的速度积累; 当轴向偏应力达到峰值, 边界能持续上升, 应变能积累达到最大值, 随之应变能转为下降; 而摩擦能和阻尼能增加的曲线向上弯曲, 曲线斜率增大, 由缓慢增加变为快速增加。整个过程中应变能先增大后减小, 摩擦能和阻尼能则一直增大至模型破坏。此外, 从不同围压来看, 低围压下的能量均小于高围压

压, 但是从能量占比来看, 低围压下摩擦能和阻尼能占比却大于高围压, 而摩擦能和阻尼能是由系统中的动能转化而来, 而动能来源于土颗粒在压缩过程中发生位置变化, 说明了低围压下粉土在压缩过程中更容易破坏。

一直以来, 人们通常采用观察土体应力-应变曲线变化来判断土体在三轴压缩下的破坏阶段, 如果土体应力-应变曲线为直线, 被视为弹性变形, 而发生弯曲后为塑性变形。除此之外, 并无其他更有效的方法能够分辨土体的三轴压缩破坏阶段, 通常对于土体应力-应变曲线发生弯曲的节点并不好判断, 很难判断弹塑性变形的分界。土体的破坏都是能量演化的结果, 本文结合能量演化尝试对土体破坏进行阶段划分, 提供另一种土体三轴压缩破坏阶段的判断方法。应变能是以应力和应变形式存储在土体中的势能, 而摩擦能和阻尼能是压缩过程中土颗粒发生移动产生的动能转换而来, 应变能、摩擦能、阻尼能之和约占边界能的 60%。因此将这三种能量之和进行分析, 发

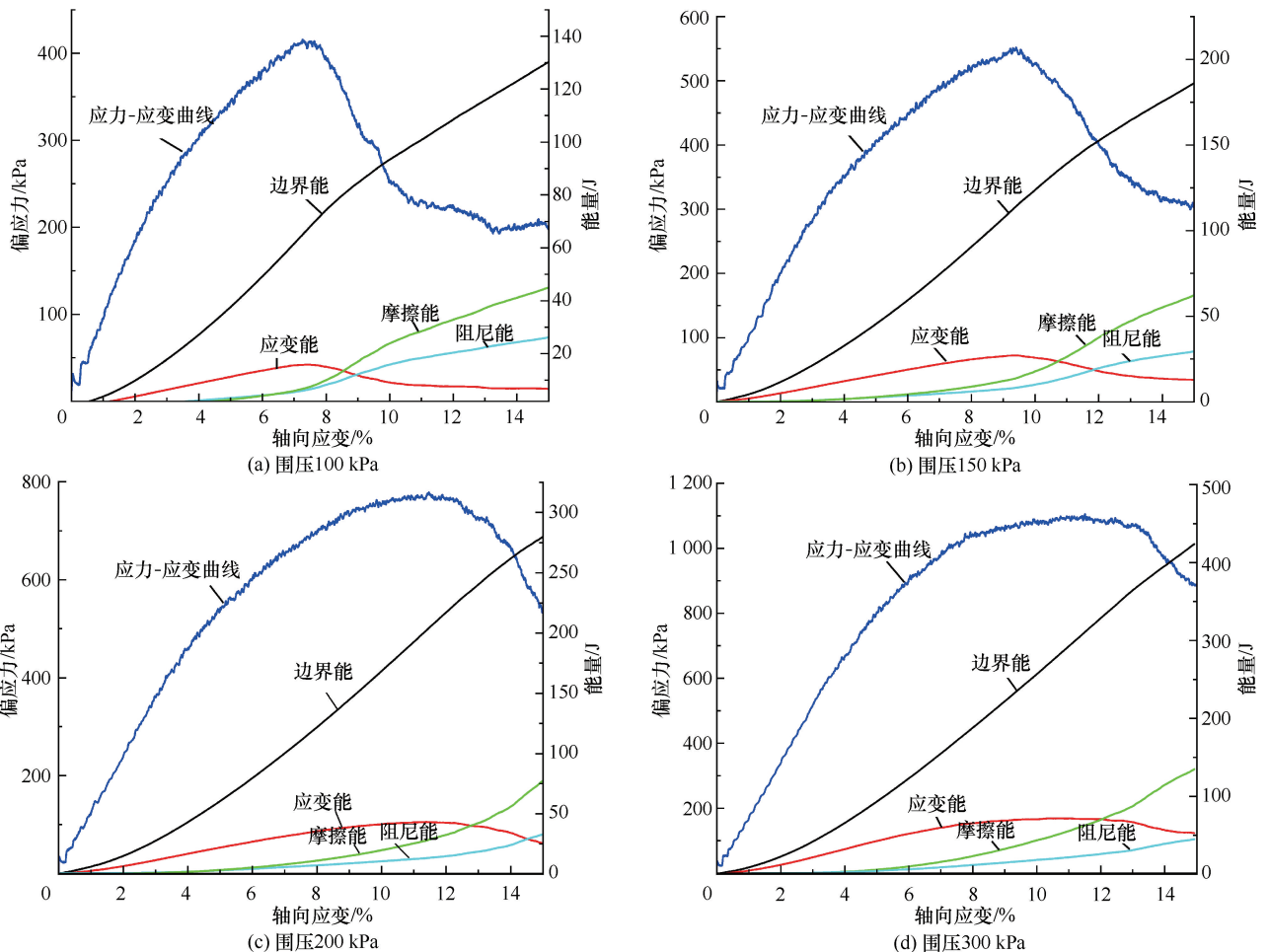


图 10 数值模拟能量演化曲线

Fig. 10 Numerical simulation of energy evolution curve

现和能量增速随应变变化与应力-应变曲线之间关系密切,如图 11 所示。观察发现不同围压之下和能量增速变化相似,其增速随轴向应变曲线刚开始较为平缓上升,随后相对较陡,而后又相对平缓,随轴向应变增加一段时间后曲线陡升,达到一个峰值之后开始下降,最后趋于平缓。基于此,将土体三轴压缩过程分为开始破坏前的孔隙压密、弹性变形和塑性变形三个阶段,以及破坏后的加速破坏和强度剩余两个阶段。AB 段和能量增速曲线变化缓慢,认为其是加载过程中孔隙压密阶段。BC 段曲线变陡,C 点正好对应粉土应力-应变曲线进入弯曲的节点,因而将 BC 段划分为弹性变形阶段,BC 段对应粉土应力-应变曲线峰值前的弯曲段,将其划分为塑性变形阶段。D 点正好对应偏应力峰值点,从而认为在 D 点开始发生破坏,DE 段对应应力-应变曲线快速下降段,将其划分为加速破坏阶段。而 EF 段应力应变曲线趋于平稳,将其划分为粉土强度剩余阶段。从不同围压角度看,低围压下和能量增速变化曲线中 D、E 两点高

度几乎相等,随着围压的增大,D、E 两点的高度差逐渐增大,距离峰值越来越远。故随着围压不断升高,E 点可能会与和能量增速曲线 D 点后的峰值持平,EF 段随之消失,土体转变成应变硬化而不再是应变软化。

4 讨论

本文采用室内三轴压缩试验和 PFC 二维离散元数值模拟的方法对徐州粉土进行研究,分析了徐州粉土三轴压缩力学行为特性、变形破坏特性等。并从微观角度分析了其微裂纹和能量演化特征,根据应变能、摩擦能和阻尼能三者能量值和随轴向应变的增速变化规律划分了粉土三轴压缩过程的破坏阶段。相比于前人的研究,本文更加系统地研究了粉土三轴压缩过程的细观演化过程,并提供了粉土三轴压缩的变形破坏阶段划分的新依据,给以后的研究和实际工程提供有意义的参考。但是本文研究依然存在一些不足之处。

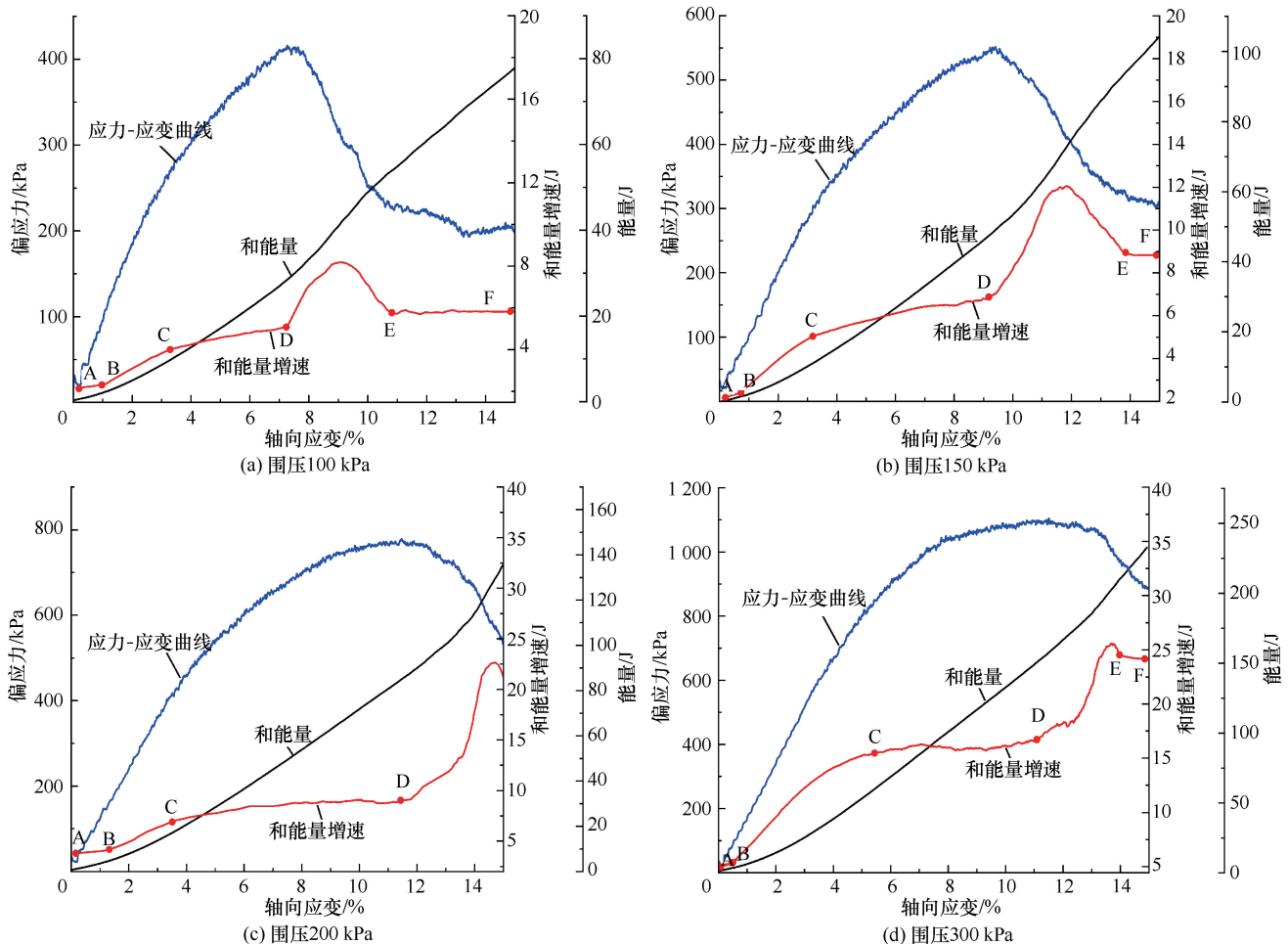


图 11 应变能、摩擦能、阻尼能之和及其增速变化

Fig. 11 The sum of strain energy, friction energy and damping energy and its growth rate change

(1) 本文在 PFC 离散元模拟中并未考虑黏粒等作用, 同时对于 PFC 的三轴压缩试验水的考虑仅限于采用饱和后的粉土试样密度近似模拟饱和土, 以及采用体积(面积)不变法考虑不排水作用的实现, 并没有考虑流固耦合的作用, 因此对于饱和土的模拟与真实情况有一定的差距, 但在一定程度上仍可以为后续研究提供参考依据。

(2) 由于试验样本有限, 本文对于粉土三轴压缩破坏阶段划分的结论不具有广泛的适用性, 其适用性仍需进一步研究。

5 结 论

(1) 粉土的峰值强度、残余强度和变形模量随围压提高线性增加, 这一现象的原因也给出了相应的解释。分析了粉土的应力-应变曲线、峰值强度和宏观破坏模式在室内试验和数值模拟结果的吻合度, 验证了微观参数设置的合理性。

(2) 在三轴压缩试验中, 粉土表现出应变局部化的特征, 即破坏主要沿着剪切带发生。不同围压条件下, 剪切面的角度大致保持一致, 但在较低围压下, 粉土的应变局部化现象更为显著。

(3) 粉土在三轴压缩试验中的破坏过程涉及试样内部微裂纹的形成。在加载初期, 粉土内部首先形成拉伸裂纹, 在轴向偏应力达到峰值应力后, 剪切裂纹开始增加, 此后过程中剪切裂纹占比不断增加, 说明剪切裂纹主导粉土的宏观破坏并表现为剪切破坏; 低围压下微裂纹曲线曲率大于高围压, 说明高围压会限制微裂纹扩展, 低围压下微裂纹数量均大于高围压, 尤其是剪切裂纹最为明显, 说明了室内试验中低围压下剪切带更明显的原因, 并进一步证明是由剪切裂纹主导粉土的破坏方式。

(4) 在轴向偏应力达到峰值之前, 边界能和应变能逐渐积累, 而随着应力-应变曲线的发展, 系统中接触所积累的应变能逐渐转化为摩擦能和阻尼能; 低围压下的能量均小于高围压, 但摩擦能和阻尼能占比却大于高围压, 说明低围压下的粉土更容易破坏。

(5) 粉土应变能、摩擦能与阻尼能之和随轴向应变增速变化规律与应力-应变曲线变化有着密切联系, 根据其增速曲线变化特征将粉土三轴压缩过程分为开始破坏前的孔隙压密、弹性变形和塑性变形三个阶段, 及破坏后的加速破坏和强度剩余两个阶段, 随着围压的升高加速破坏和强度剩余阶段可能会消失。

参考文献 (References):

[1] 路江鑫, 孙立强, 曲京辉, 等. 地震荷载作用下饱和粉土地基液

化深度试验研究 [J]. 地震工程学报, 2014, 36(3): 544-548.

LU Jiangxin, SUN Liqiang, QU Jinghui, et al. Experimental study on liquefaction depth of saturated silty soil ground under seismic loading [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 544-548.

[2] 宋丹青, 张洪瑞, 冯兴波. 饱和粉土变形特性三轴试验 [J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2017, 38(1): 52-55+6-7.

SONG Danqing, ZHANG Hongrui, FENG Xingbo. Triaxial tests on deformation characteristics of saturated silt [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2017, 38(1): 52-55+6-7.

[3] 彭丽云, 刘建坤, 肖军华, 等. 京九线路基压实粉土力学特性的试验 [J]. 北京交通大学学报, 2007, (4): 56-60.

PENG Liyun, LIU Jiankun, XIAO Junhua, et al. Mechanics properties of compacted silt on Beijing-Kowloon railway [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007, (4): 56-60.

[4] 董金梅, 朱华, 叶明鸽. 应力路径对粉土力学特性的影响试验 [J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2019, 41(3): 376-382.

DONG Jinmei, ZHU Hua, YE Mingge. Stress path experiments for effect on mechanical properties of silty soil [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2019, 41(3): 376-382.

[5] 董山, 王宏宇, 李婕, 等. 含水率及压实度对压实黄土状粉土力学特性的影响 [J]. 广西大学学报(自然科学版), 2020, 45(5): 978-985.

DONG Shan, WANG Hongyu, LI Jie, et al. Effects of water content and compaction degree on mechanical characteristics of compacted silty soil [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2020, 45(5): 978-985.

[6] 肖军华, 刘建坤, 彭丽云, 等. 黄河冲积粉土的密实度及含水率对力学性质影响 [J]. 岩土力学, 2008, (2): 409-414.

XIAO Junhua, LIU Jiankun, PENG Liyun, et al. Effects of compactness and water Yellow-River alluvial silt content on its mechanical behaviors [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, (2): 409-414.

[7] 陈宇, 宋日英, 黄志全, 等. 三门峡地区黄土状粉土动静力学试验研究 [J]. 人民黄河, 2009, 31(11): 108-110.

CHEN Yu, SONG Riyang, HUNG Zhiquan, et al. Experimental study on dynamic and static mechanics of loess-like silt in Sanmenxia area [J]. Yellow River, 2009, 31(11): 108-110.

[8] 刘寒冰, 王静, 魏海斌, 等. 冻融循环下路基土抗剪强度与塑性指数相关性 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(S2): 149-152.

LIU Hanbing, WANG Jing, WEI Haibin, et al. Correlation of subgrade soil shear strength and plasticity index under freeze-thaw cycles [J]. Correlation of subgrade soil shear strength and plasticity index under freeze-thaw cycles, 2011, 41(S2): 149-152.

[9] 郑英杰, 金青, 崔新壮, 等. 冻融循环作用下黄泛区饱和含盐粉土动力性能及微观损伤演化规律 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(9): 32-44.

ZHENG Yingjie, JIN Qing, CUI Xinzhuang, et al. Dynamic behavior

- and meso-damage evolution of saturated saline silt from Yellow River flooded area under freeze-thaw cycle [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(9): 32-44.
- [10] 王跃. 不同细粒含量饱和粉土地震动力特性和场地反应研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- WANG Yue. Study on Seismic Dynamic Characteristics and Siteresponse of Saturated Silt with Different Finecontents [D]. Xuzhou; China University of Mining & Technology, 2022.
- [11] 孟凡丽, 王逸晨, 汤鄢, 等. 卸荷应力路径下饱和粉土静力特性的试验研究 [J]. *工程勘察*, 2023, 51(8): 33-40.
- MENG Fanli, WANG Yichen, TANG Yan, et al. Experimental study on static characteristics of saturated silty soil under unloading stress path conditions [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2023, 51(8): 33-40.
- [12] 于庆龙. 不同动应力作用下黏质粉土动力特性研究 [J]. *铁道建筑技术*, 2022, (6): 100-104.
- YU Qinglong. Research on dynamic characteristics of clay silt under different dynamic stress amplitudes [J]. *Railway Construction Technology*, 2022, (6): 100-104.
- [13] BELHEINE N, PLASSLARD J P, DONZE F V, et al. Numerical simulation of drained triaxial test using 3D discrete element modeling [J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36(1/2): 320-331.
- [14] LU Y Z. Reconstruction, Characterization, Modeling and Visualization of Inherent and Induced Digital Sand Microstructures [D]. Atlanta; Georgia Institute of Technology, 2010.
- [15] 李爽, 刘洋, 吴可嘉. 砂土直剪试验离散元数值模拟与细观变形机理研究 [J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(4): 104-110.
- LI Shuang, LIU Yang, WU Kejia. Exploring mesoscopic deformation mechanism of sand in direct shear test by numerical simulation using discrete element method [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, 34(4): 104-110.
- [16] 苏明. 考虑颗粒破碎的粗粒料力学特性研究综述 [J]. *长江科学院院报*, 2015, 32(5): 82-88.
- SU Ming. Review on mechanical properties of coarse materials in consideration of particle fracture [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 32(5): 82-88.
- [17] 沈扬, 陶明安, 徐国建. 应力控制模式下粉土动力崩塌特性的PFC数值试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(12): 2280-2285.
- SHEN Yang, TAO Mingan, XU Guojian. PFC numerical experiments on dynamic collapse behaviors of silt under stress controlled mode [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(12): 2280-2285.
- [18] 周健, 池永. 砂土力学性质的细观模拟 [J]. *岩土力学*, 2003, (6): 901-906.
- ZHOU Jian, CHI Yong. Mesomechanical simulation of sand mechanical properties [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, (6): 901-906.
- [19] 刘成, 王海波, 杨平, 等. 苏北粉土非线性特性离散元模拟与参数分析 [J]. *南京工程学院学报(自然科学版)*, 2013, 11(4): 7-16.
- LIU Cheng, WANG Haibo, YANG Ping, et al. DEM simulation and parameter analysis of nonlinear characteristics of Northern Jiangsu silt [J]. *Journal of Nanjing Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 11(4): 7-16.
- [20] 邢炜杰, 余湘娟, 高磊, 等. 基于颗粒流离散元的黏性土三轴剪切试验数值模拟 [J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(35): 119-124.
- XING Weijie, YU Xiangjuan, GAO Lei, et al. Numerical simulation of cohesive soil triaxial shear test based on particle flow discrete element [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(35): 119-124.
- [21] 张翀, 舒赣平. 颗粒形状对颗粒流模拟双轴压缩试验的影响研究 [J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(8): 1281-1286.
- ZHANG Chong, SHU Ganping. Effect of particle shape on biaxial tests simulated by particle flow code [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(8): 1281-1286.
- [22] 张岩, 樊亮, 王林, 等. 黏粒含量对粉土抗压强度的影响 [J]. *路基工程*, 2022, (1): 44-48.
- ZHANG Yan, FAN Liang, WANG Lin, et al. Influence of clay content on compressive strength of silt [J]. *Subgrade Engineering*, 2022, (1): 44-48.
- [23] 吴尚杰. 粉土填料细观剪切特性的颗粒离散元数值模拟研究 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2022, 20(3): 129-133+75.
- WU Shangjie. The meso shear characteristics of silt filling based on particle discrete element simulations [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2022, 20(3): 129-133+75.
- [24] 刘光华, 袁鸿鸣, 叶思源, 等. 温榆河公园堆山岩土工程问题分析研究 [J]. *水利发展研究*, 2024, 24(11): 114-118.
- LIU Guanghua, YUAN Honghu, YE Siyuan, et al. Analysis and research on rock-soil engineering problems related to piled mountain in Wenyuhe Park [J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(11): 114-118.
- [25] 刘萌成, 胡帅峰, 戴鹏飞. 南海钙质砂不排水剪切特性三轴试验 [J]. *中国公路学报*, 2022, 35(4): 69-76.
- LIU Mengcheng, HU Shuaifeng, DAI Pengfei. Investigation on shear behavior of calcareous sand in South China Sea in undrained triaxial tests [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(4): 69-76.
- [26] 刘重宏, 巨能攀, 周新, 等. 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)*, 2024, 51(2): 291-302.
- LIU Zhonghong, JU Nengpan, ZHOU Xin, et al. 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)*, 2024, 51(2): 291-302.
- [27] 徐国建, 沈扬, 刘汉龙. 孔隙率、级配参数对粉土双轴压缩性状影响的颗粒流分析 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(11): 3321-3328.
- XU Guojian, SHEN Yang, LIU Hanlong. Analysis of particle flow for

- impacts of granular parameters and porosity on silt's properties under biaxial compression [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(11): 3321-3328.
- [28] ZHANG X P, WONG L N Y. Loading rate effects on cracking behavior of flaw-contained specimens under uniaxial compression [J]. *International Journal of Fracture*, 2013, 180(1): 93-110.
- [29] 刘明明. 基于状态演化理论的饱和砂土动力流变特性试验与数值模拟研究 [D]. 江西; 华东交通大学, 2023.
- LIU Mingming. *Experimental and Numerical Simulation Study of Dynamic Rheological Properties of Saturated Sand Soil Based on State Evolution Theory* [D]. Jiangxi; East China Jiaotong University, 2023.
- [30] 丁小彬, 谢宇轩, 施钰. 基于改进接触模型的一类岩石材料裂纹扩展分析 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(8): 146-158.
- DING Xiaobin, XIE Yuxuan, SHI Yu. Crack extension analysis of rock-like material based on the improved contact model [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 52(8): 146-158.
- [31] 闫景晨, 马苗苗, 陈秀楠. 基于 PFC 模拟的饱和粉砂强度折减范围研究 [J]. *中国科技论文*, 2024, 19(8): 895-902.
- YAN Jingchen, MA Miaomiao, CHEN Xiunan. Strength reduction range study of saturated silt based on PFC simulation [J]. *China Sciencepaper*, 2024, 19(8): 895-902.
- [32] 甄治国, 孙博文, 陈传平, 等. 灰岩三轴压缩力学特性试验及三维离散元模拟 [J]. *地下空间与工程学报*, 2023, 19(S2): 610-616.
- ZHEN Zhiguo, SUN Bowen, CHEN Chuanping, et al. Experimental and 3D DEM simulation on the triaxial compression mechanical behavior of limestone [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2023, 19(S2): 610-616.

(责任编辑 王海锋)