

颗粒形状对循环荷载作用下砂砾石土力学特性的影响

Effect of Particle Shape on Mechanical Properties of Sandy Gravel Soil under Cyclic Loading

彭 军

(福建省水文地质工程地质勘察研究院, 漳州 363000)

摘要: 颗粒形状是砂砾石土力学性质主要影响因素之一。为揭示颗粒形状对循环荷载作用下砂砾石土力学性质影响规律和机理, 采用颗粒流离散元方法对砂砾石土的循环剪切试验进行仿真。通过对比试验, 将颗粒形状影响因子单独分离, 获取颗粒形状对砂砾石土宏观力学响应的影响。结果表明: 在给定的循环荷载作用下, 颗粒形状对平均动模量和临界摩擦角基本无影响, 颗粒形状的不规则性会导致峰值摩擦角降低; 颗粒形状对剪切模量基本无影响, 但不规则的颗粒形状会使最大剪胀角有一定程度的降低; 不规则的颗粒形状会使循环荷载作用下 $e-p$ 临界状态线的斜率变大、截距变小; 在细观层面, 均一化后的接触密度不受颗粒形状的影响, 均一化的接触力分布不受颗粒形状的影响, 接触力异向性不受颗粒形状的影响。研究结果可对铁路路堤以及土石坝的填料设计有一定的指导意义。

关键词: 颗粒形状; 砂砾石土; 循环荷载; 离散元; 剪胀性

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249(2025)01-0074-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.015

PENG Jun

(Fujian Hydrogeological Engineering Geological Survey and Research Institute, Zhangzhou 363000, China)

Abstract: Particle shape is one of the important factors affecting the mechanical properties of sand and gravel soils. In order to reveal the influence law and mechanism of particle shape on the mechanical properties of sand-gravel soil under cyclic loading, the particle flow discrete element method was used to simulate the cyclic shear test of sand-gravel soil. Then, by setting up refined comparative experiments, the influencing factors of particle shape are separated separately, and the effect of particle shape on the macro-mechanical response of sand-gravel soil is obtained. The results show that under a given cyclic load, the particle shape has little effect on the mean dynamic modulus, the peak friction angle is reduced due to the irregularity of the particle shape, and the critical friction angle is hardly affected by the particle shape; It has no effect on the shear modulus under cyclic loading, but the irregular particle shape will reduce the maximum dilation angle to a certain extent; the irregular particle shape will change the slope of the $e-p$ critical state line under cyclic loading. Larger, smaller intercept; under the action of cyclic load, at the mesoscopic level, the contact density after homogenization is not affected by the particle shape, the uniform contact force distribution is not affected by the particle shape, and the contact force anisotropy is not affected. affected by particle shape. The research results help to construct a more accurate constitutive relation of sand-gravel soil.

Key words: particle shape; sand and gravel soil; cyclic load; discrete element; dilatancy

0 引言

随着我国基础设施建设的快速发展,砂砾石土因其优异的力学特性,如高强度和高弹性模量,被广泛应用于地基换填材料、铁路路基以及土石坝填料等工程领域^[1-3]。在实际工程中,砂砾石土通常用于处理软弱地基或作为路基填料,以提高整体结构的承载能力和稳定性。然而,砂砾石土力学性质的变化在道路循环荷载或水库水位循环升降作用下表现得尤为显著,其中颗粒形状对力学性质的影响成为近年来研究的热点问题^[4-6]。

现行国家标准 GB/T 14684—2022《建设用砂》和 GB/T 14685—2022《建设用卵石、碎石》等对砂砾石土填料的颗粒形状并无强制性要求,实际工程中多倾向于选择棱角磨圆度较低的砂砾石颗粒^[7]。以爆破方法获取的土石坝堆填料为例,其颗粒形状具有较高的粗糙度、较低的磨圆度和球度,显著影响砂砾石土的力学特性^[8]。颗粒形状对砂砾石土强度与变形特性的作用机理值得深入探讨,以优化填料设计并提高工程质量和安全性。

然而,颗粒形状的量化一直是工程地质和岩土力学领域的难点。地质历史作用形成的天然颗粒和人工爆破获得的颗粒具有显著的随机性和不规则性,传统几何学方法难以精准描述其形状特征^[9]。近年来,针对颗粒形状的量化研究主要集中于多尺度的分析框架,即从微观层面的表面粗糙度,到中尺度的棱角度发育情况,再到宏观层面的球形度^[10-12]。这些尺度的颗粒形态特征均已被证明对砂砾石土的剪切强度、变形模量等力学性质有重要影响。例如,有研究表明,颗粒表面粗糙度越高,其剪切强度越大;颗粒棱角度越显著,砂砾石土的抗剪强度越高;而颗粒球度越低,其变形性能越强^[13-14]。

在物理试验中,颗粒形状对砂砾石土力学性质的影响机制研究面临诸多挑战。首先,很难在对比试验中严格保证试样的颗粒数量和体积完全一致,即使在数量上做到相等,颗粒之间的体积差异也会直接影响试样的堆积密度,从而间接影响力学性质的测试结果^[15]。其次,由于颗粒形状特征往往与颗粒大小及材料性质密切相关,单独分离颗粒形状影响因子的任务几乎无法通过物理试验实现。这些问

题导致了试验结果的可重复性和可靠性不足。

为克服上述问题,近年来基于离散元法的数值仿真技术被广泛应用于颗粒材料的力学性质研究。离散元仿真技术可通过精确控制颗粒数量、体积及形状参数,独立研究颗粒形状对力学行为的影响。此外,仿真技术还能够灵活施加复杂的应力路径,包括不同频率、幅值和持续时间的循环荷载,从而为深入研究砂砾石土在循环荷载作用下的力学行为提供了可能^[16-17]。

基于此,拟采用离散元法对砂砾石土的循环剪切行为进行系统仿真,揭示颗粒形状对其强度与变形特性的影响机制。研究结果不仅可为铁路路堤及土石坝的填料设计提供理论指导,还可为相关标准的修订提供科学依据,具有重要的工程实践意义。

1 试验材料与方法

1.1 仿真模型

粒径为 0.5~2 mm 的粗砂作为研究对象,其级配为直线型均匀分布。

采用颗粒流离散元软件 PFC 开展仿真试验,其优点一是能够方便基于内置 Clump 模块构建任意形状的颗粒;二是软件提供了准确可靠的粒间接触模型,如考虑颗粒旋转阻力矩的接触模型,能够准确地仿真外荷载下砂砾石土的力学特性。

有研究表明,当样本容量超过 25 时,颗粒形态指标的统计均值基本不再变化^[10]。因此,提出基于 25 个颗粒的轮廓构建天然砂的颗粒离散元试样。

为避免尺寸效应,砂砾石土试样的尺寸一般较大,出于计算效率的考量,模型的尺寸不宜过大。已有研究表明,试样的最小尺寸不小于 50 倍平均粒径时,尺寸效应的影响可忽略^[3]。构建的模型高度为 50 倍的颗粒平均粒径,模型长度为高度的 2 倍。

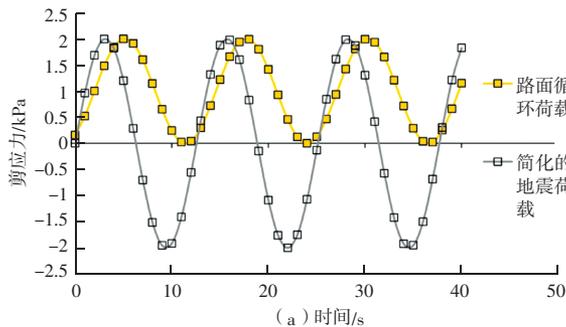
通过 PFC 内置编程语言创建功能函数,在不改变颗粒体积的情况下,使随机不规则形状颗粒构成的仿真砂样(由“Irreg-Sam”表示)转变为由标准圆形颗粒构成的试样(由“Reg-Sam”表示)。两种试样除了颗粒形状不同,其他方面完全一致,在相同的试验条件下开展平行仿真试验,获取各自的力学指标。

岩土力学

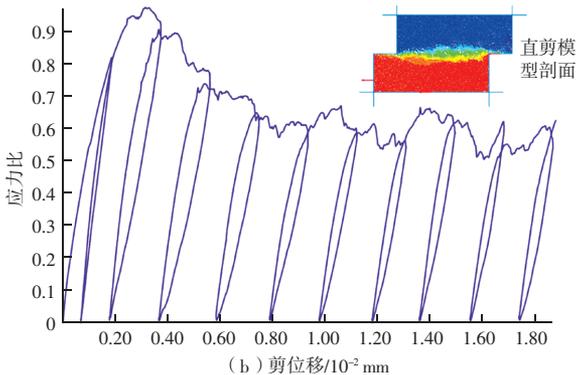
1.2 循环荷载类型

在直剪试验的基础上,采用应变控制,使随机不规则形状颗粒构成的仿真风化砂在循环剪切条件下发生破坏,记录循环剪切过程中的宏细观物理力学指标,同时与圆形颗粒构成的试样进行对比,进而揭示在循环剪切过程中颗粒形状对风化砂物理力学性质的影响。

不同于地震荷载,由车辆荷载引起的循环剪应力没有负值,其值在 0 和某一正数之间波动,如图 1 (a) 所示。循环直剪试验采用应变控制,每产生 2% 的剪应变,剪切方向变为反向,当剪应力减小到 0 时,剪切方向变为正向,如此循环,当剪切应变累计达到 20% 时,停止剪切,在整个剪切过程中共进行 10 次循环,如图 1 (b) 所示。在循环剪切过程中,每产生 0.4% 的剪应变,记录一次宏细观物理力学指标,如应力、应变、孔隙比、配位数和粒间接触力等信息。



(a) 不同加卸载条件下剪应力变形曲线



(b) 循环剪切荷载作用下的应力-应变曲线

图 1 循环加卸载类型及试样在循环剪切荷载作用下的应力-应变曲线

Fig. 1 Types of cyclic loading and unloading and stress-strain curves of samples under cyclic shear loading

在剪切初始时刻及每次变换剪切方向时,剪切速度为 0,然后以某一加速度持续增加至指定值,以

恒定速度进行剪切(每分钟产生 0.5% 剪应变)。颗粒及粒间接触的细观参数参考文献 [3],采用应变控制的循环加卸载剪切试验,其剪位移随着循环次数的增加而逐渐增大,直至试样发生剪切破坏。

循环剪切试验法向应力设为 25、50、100、200 和 300 kPa 五种情况。为了解在循环剪切荷载作用下试样的宏细观力学性质,采用常规静力直剪试验的结果进行对比。需要注意的是,当法向应力为 25 kPa 时,循环加卸载的频率为 7~8 Hz;当法向应力为 300 kPa 时,循环加卸载的频率为 4.5~5.5 Hz。

2 结果与讨论

相比于室内试验,颗粒离散元仿真的优点之一在于,能够通过自建功能函数自动记录循环剪切过程中的宏细观力学性质。在宏观方面,工程中比较关注的是剪切强度、变形和其本构关系,而 $e-p$ 临界状态线是构建本构关系的核心;在细观颗粒层面,粒间接触力的大小、方向和数量决定着试样的宏观力学行为。因此,分别就颗粒形状对循环剪切荷载作用下上述 6 个方面的影响展开研究。

2.1 颗粒形状对动剪切强度的影响

图 2 可知,循环直剪试验的剪应力-剪应变曲线外包络线基本与常规静力直剪试验结果一致,表明在该种循环荷载作用下,可采用静强度作为试样的动强度。此外,在临界状态下滞回圈形状基本保持不变,但随着法向应力的增加,滞回圈与水平面的夹角逐渐减小。这表明试样的平均动弹性模量随法向应力的增加而减小。

由图 3 可知,循环剪切荷载作用下,颗粒形状未显著改变常规直剪试验中获得的 Reg-Sam 与 Irreg-Sam 峰值及临界强度的关系。当法向应力较低时,相较于 Reg-Sam, Irreg-Sam 在循环加载和卸载过程中表现出较低的峰值强度。这表明在低法向应力条件下,颗粒形状的不规则性降低了循环荷载条件下的峰值强度。此外,尽管颗粒形状对平均动弹性模量的影响较小,但其对滞回圈形态和强度特性的细微变化仍需进一步深入研究。

综上所述,颗粒形状的不规则性对动剪切强度的影响表现出一定相关性。结合颗粒离散元仿真技术,可进一步揭示颗粒形状对动剪切强度影响的细

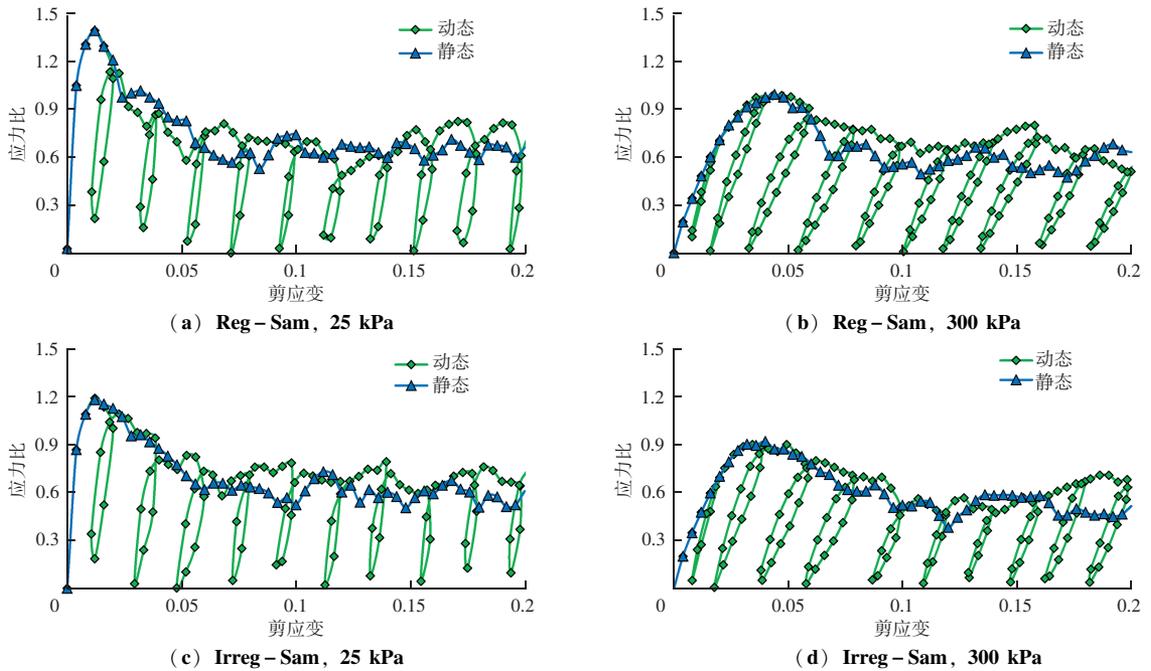


图2 不同法向应力下循环直剪及常规直剪试验获取的剪应力-剪应变曲线

Fig. 2 Shear stress-shear strain curves obtained from cyclic direct shear tests and conventional direct shear tests under different normal stresses

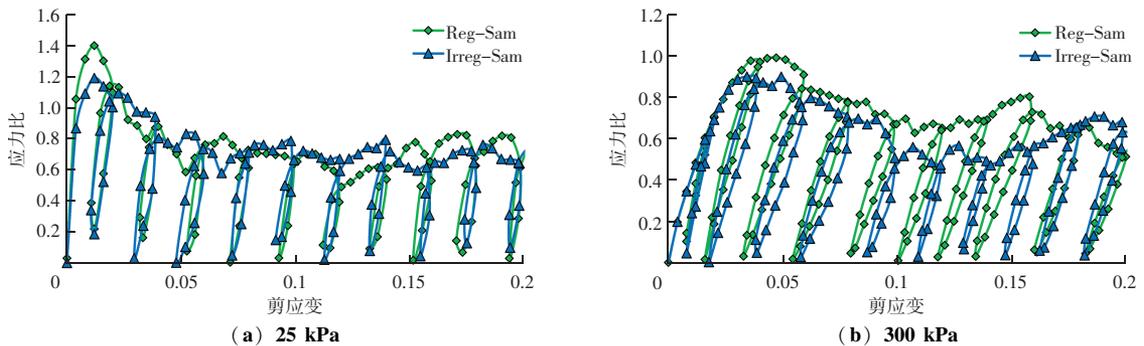


图3 不同法向应力水平下 Reg-Sam 和 Irreg-Sam 在循环剪切试验中的剪应力-剪应变曲线

Fig. 3 Shear stress-shear strain curves of Reg-Sam and Irreg-Sam in cyclic shear tests under different normal stress levels

观力学机制。

2.2 颗粒形状对动体积变形的影响

与剪应力-剪应变曲线相似,不同法向应力水平下,Reg-Sam 和 Irreg-Sam 在循环剪切试验中的体积应变率-剪应变曲线的外包络线与常规静力直剪试验的结果基本相同,如图4所示。同时,两者在循环剪切过程中的剪胀角-剪应变曲线的外包络线与常规静力直剪试验结果基本一致,且循环剪切获取的最大剪胀角与常规静力直剪试验结果相同,如图5所示。因此,在所采用的循环剪切荷载作用下,试样的剪切变形并没有因循环荷载作用而与静力剪切有所不同。

为了进一步揭示颗粒形状对循环荷载作用下体积变形的影响,分析了不同法向应力下试样的体积变形参数。如图6所示,从 Reg-Sam 与 Irreg-Sam 的最大体积应变和最终残余体积应变的具体数值可见, Irreg-Sam 的体积变形量始终小于 Reg-Sam,表明其可压缩性较小,刚度更大。特别是在高法向应力下,这种差异更为显著。

综上, Irreg-Sam 在循环剪切荷载下表现出较小的体积变形量,表明其具有更高的抗压缩性。这一发现为优化颗粒填料设计提供了重要依据,同时也为进一步研究颗粒形状对体积变形行为的微观机制提供了方向。

岩土力学

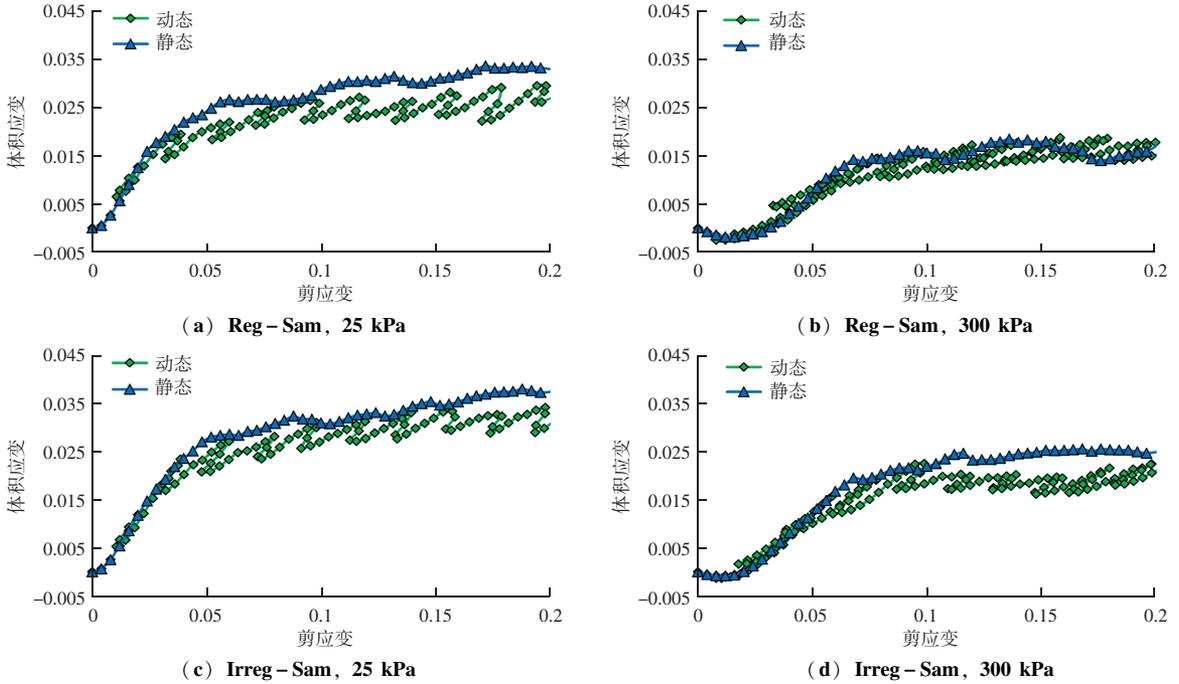


图4 不同法向应力水平下 Reg-Sam 和 Irreg-Sam 在循环剪切和常规静力直剪试验中的体积应变率-剪应变曲线
Fig. 4 Volumetric strain rate - shear strain curves of Reg-Sam and Irreg-Sam in cyclic shear tests and conventional static direct shear tests under different normal stress levels

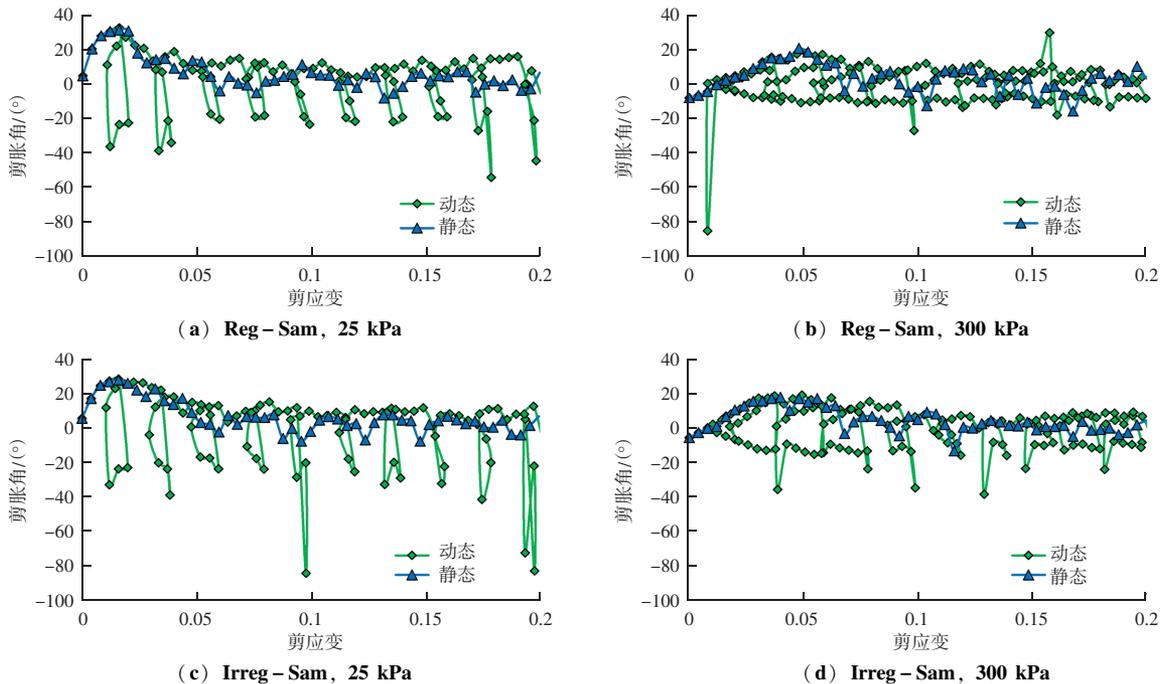


图5 不同法向应力水平下 Reg-Sam 和 Irreg-Sam 在循环剪切和常规静力直剪试验中的剪胀角-剪应变曲线
Fig. 5 Shear dilation angle - shear strain curves of Reg-Sam and Irreg-Sam in cyclic shear tests and conventional static direct shear tests under different normal stress levels

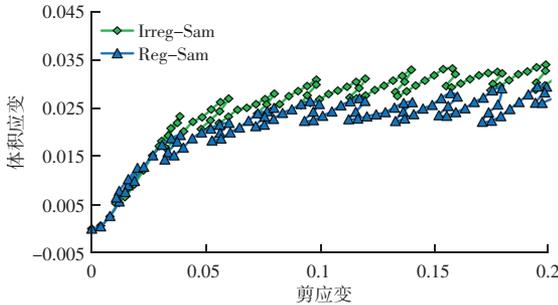
2.3 颗粒形状对动临界状态线的影响

在临界状态土力学中,采用三轴压缩或直剪试验,让砂样在不同应力水平下变形至临界状态,对

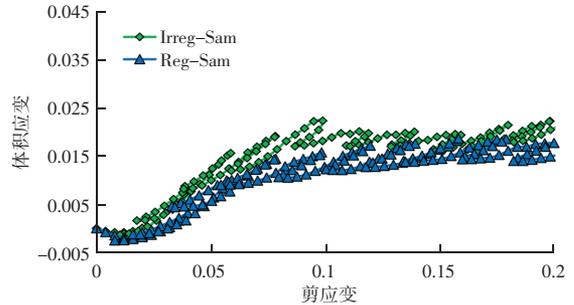
应的孔隙比与平均应力的关系可作为砂性土的临界状态线,临界状态线可作为土体稳定状态和破坏状态的分界线。在土动力学中,临界状态鲜有提及,

这里所说的动临界状态线是相对于常规静力直剪试验而言的, 指的是在所施加的循环荷载作用下, 土体在不同法向应力下发生大变形, 当其剪胀为 0 (即

体积应变增量为 0) 时, 由孔隙比和平均应力的统计平均值拟合而成的直线。



(a) 25 kPa



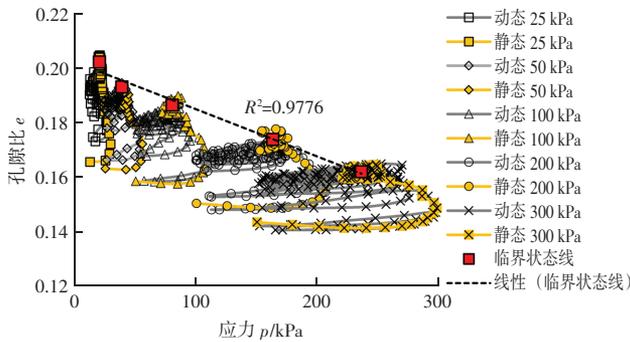
(b) 300 kPa

图 6 不同法向应力下, Reg-Sam 和 Irreg-Sam 在循环剪切试验中的体积变形率 - 剪应变曲线

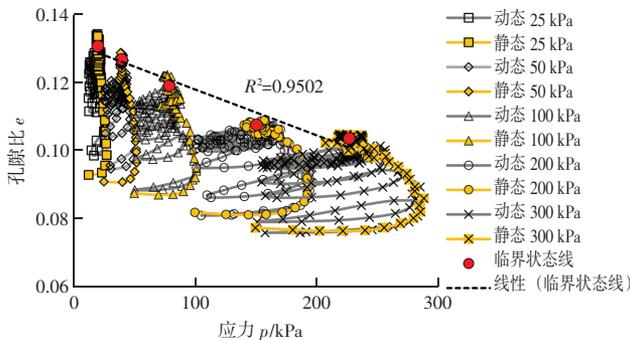
Fig. 6 Volumetric deformation rate - shear strain curves of Reg-Sam and Irreg-Sam in cyclic shear tests under different normal stresses

在不同法向应力水平下, Reg-Sam 和 Irreg-Sam 在循环剪切过程中获取的孔隙比 - 平均应力曲线如图 7 所示, 在小变形及峰值阶段, 曲线轨迹始终处于临界状态线以下, 预示着试样处于稳定状态, 而在临界阶段, 由于循环剪切, 试样在稳定状态和破坏状态中循环变换。

在施加的循环剪切荷载作用下, 试样的孔隙比 - 平均应力曲线的外包络线基本与静力情况相同, 循环剪切获取的临界状态与常规直剪获取的临界状态并无不同。可见, 虽然应力路径不同, 却可以导致相同的变形破坏结果, 说明在循环动力和常规静力荷载作用下, 砂性土遵循相同的破坏准则。另外, Reg-Sam 和 Irreg-Sam 在循环荷载作用下 $e-p$ 曲线与在静力荷载作用下的曲线位置关系可以看出, 循环荷载作用下, 颗粒形状对 $e-p$ 曲线的影响与静力荷载情况相同, 而由不规则形状颗粒构成的试样, 其临界状态线位于同等条件下圆形颗粒构成的试样临界状态线之下。



(a) Reg-Sam



(b) Irreg-Sam

图 7 由循环和常规静力剪切试验获取的

Reg-Sam 和 Irreg-Sam 的 $e-p$ 临界状态线

Fig. 7 $e-p$ critical state lines of Reg-Sam and

Irreg-Sam obtained from cyclic and conventional static shear tests

2.4 颗粒形状对循环剪切接触密度的影响

如图 8 所示, 采用循环直剪试验获取的均一化接触密度与静力常规直剪试验获取的不同之处在于, 均一化接触密度在循环剪切荷载作用下会产生闭合的滞回圈; 相同之处在于, 虽然循环荷载作用下均一化接触密度会波动, 但滞回圈的面积非常小, 排除循环剪切导致的波动部分, 两者均一化的接触密度几乎相等。

在循环剪切作用下, 颗粒形状对均一化接触密度的影响与静力剪切情况相同, 需要注意的是, 不规则形状的颗粒构成的 Irreg-Sam 均一化接触密度在循环荷载作用下的波动不如圆形颗粒构成的 Reg-Sam 明显。

2.5 颗粒形状对循环剪切接触力分布的影响

图 9 为 Reg-Sam 和 Irreg-Sam 在一个闭合循环剪切过程中均一化接触力^[6]的分布, 图例中的数字表示对应的剪应变, 负号表示剪应变在减小, 而正

岩土力学

号表示剪应变在增加，一个循环中，剪应变最小时的剪应力接近于 0。可以看出，圆形颗粒构成的 Reg-Sam 和随机不规则形状的颗粒构成的 Irreg-Sam 都有相同的规律。即在一个完整的循环过程中，接触力分布也经历了一次循环波动，剪应力接近于 0

时，正态分布最尖锐；剪应力最大时，正态分布最平阔。剪应变由循环开始至循环结束，虽然对应同样的剪应变，但是接触力的分布不完全一样，说明在经历一次循环后，接触力系统发生了不可恢复的变化。

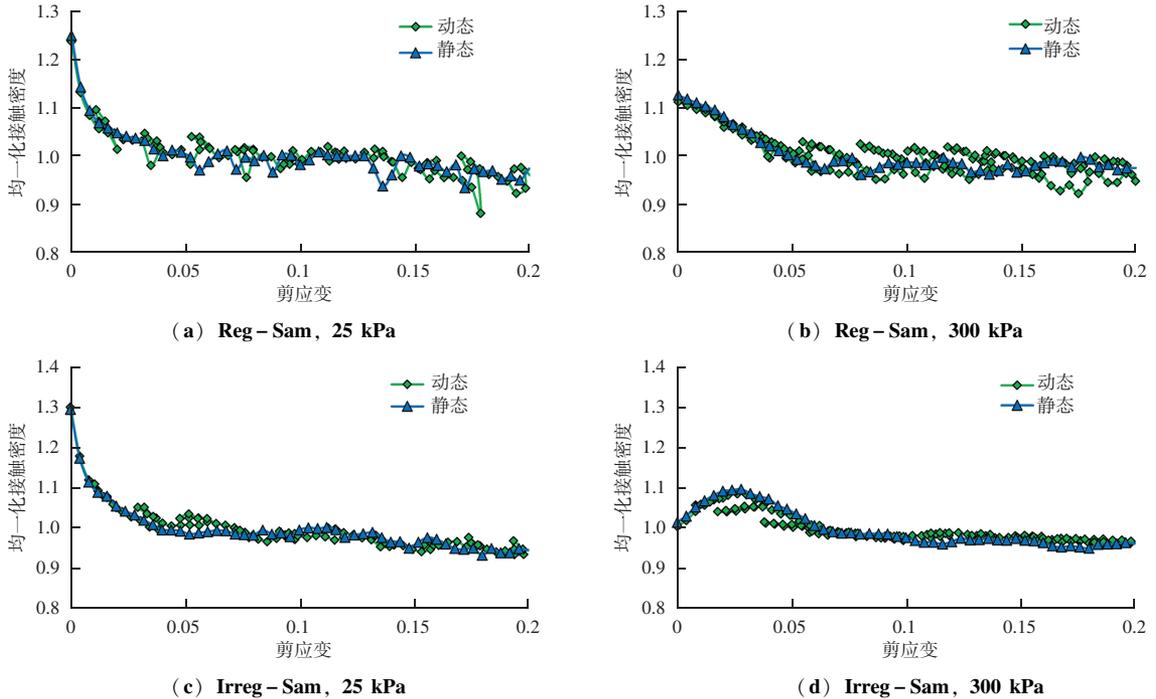


图 8 不同法向应力水平下 Reg-Sam 和 Irreg-Sam 在循环和常规剪切试验中的均一化接触密度 - 剪应变曲线
 Fig. 8 Normalized contact density - shear strain curves of Reg-Sam and Irreg-Sam under different normal stress levels in cyclic and conventional shear tests

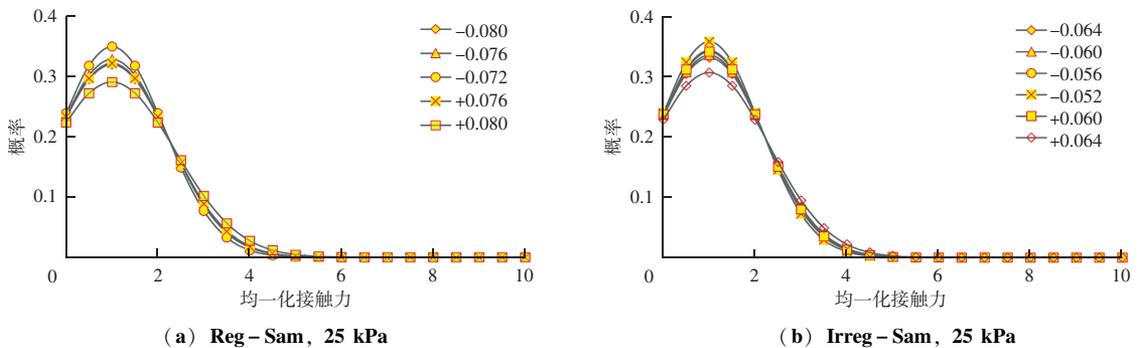


图 9 在一个完整的循环剪切过程中 Reg-Sam 和 Irreg-Sam 接触力分布的变化
 Fig. 9 Changes in contact force distribution of Reg-Sam and Irreg-Sam during a complete cyclic shear process

2.6 颗粒形状对循环剪切接触力组构的影响

由图 10 可知，循环剪切荷载作用下，试样的宏观应力和应变等响应与细观接触力的各向异性密切相关，由此推测，由常规静力直剪建立的宏细观本构模型同样适用于循环剪切情况。在所施加的循环剪切荷载作用下，颗粒形状对接触力组构的影响与

常规静力剪切一样。

Irreg-Sam 的接触力链分布更为均匀，主方向性较弱，而 Reg-Sam 的接触力链则集中于特定方向，体现出更强的各向异性。

颗粒形状对循环剪切接触力组构的影响主要体现在接触力的强度分布、各向异性及其动态演化特

征上。不规则颗粒形状试样表现出更高的接触力分散能力和更低的各向异性指标,有助于提高循环荷

载作用下的力学稳定性。这一发现对颗粒材料的填料优化设计具有重要指导意义。

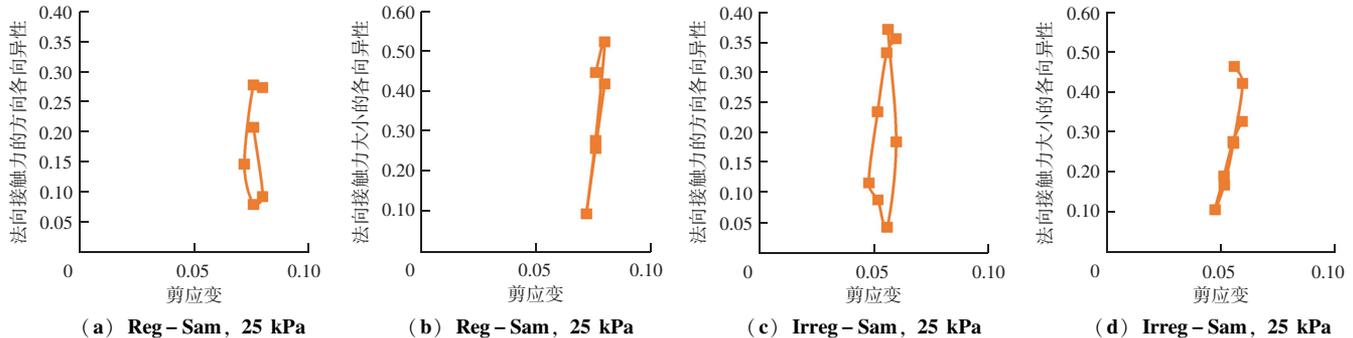


图 10 在一个完整的循环剪切过程中 Reg-Sam 和 Irreg-Sam 中法向接触力方向及大小的各向异性变化

Fig. 10 Anisotropic changes in the direction and magnitude of normal contact forces in Reg-Sam and Irreg-Sam during a complete cyclic shear process

3 结论

为揭示颗粒形状对循环荷载作用下砂砾石土力学性质影响规律和机理,采用颗粒流离散元方法对砂砾石土循环剪切试验进行仿真,得到以下结论:

(1) 在给定的循环荷载作用下,颗粒形状对平均动模量基本无影响,峰值摩擦角会因颗粒形状的不规则性而降低,临界摩擦角几乎不受颗粒形状的影响。

(2) 颗粒形状对循环荷载作用下的剪切模量基本无影响,但不规则的颗粒形状会使最大剪胀角有一定程度的降低。

(3) 不规则的颗粒形状会使循环荷载作用下 $e-p$ 临界状态线的斜率变大、截距变小。

(4) 均一化后的接触密度、接触力分布、接触力异向性不受颗粒形状的影响。

参 考 文 献

[1] 薛明华, 陈圣仟, 杨世文. 颗粒形状对砂性土宏细观力学性质的影响 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (33): 14318 - 14326.

[2] 刘贤才, 李波, 沈立群, 等. 基于离心试验的单级立堵水下抛填砂砾石相对密度研究 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46 (增刊 1): 239 - 243.

[3] 鲁志春. 基于颗粒离散元法的三峡花岗岩风化砂宏细观力学性质研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2021.

[4] 王蕴嘉, 宋二祥. 堆积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.

[5] 周光军, 徐慧, 何先宇, 等. 考虑砾石颗粒形状及含量影响的

砂-砾石混合物离散元模拟直剪试验 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (27): 12084 - 12093.

[6] 赵仕威, 周小文, 刘文辉, 等. 考虑颗粒棱角影响的直剪试验的离散元模拟 [J]. 岩土力学, 2015, 36 (增刊 1): 602 - 608.

[7] 叶加兵. 碎石颗粒形状评定及其对碎石料渗透性影响的初步研究 [D]. 武汉: 长江科学院, 2015.

[8] LU Z, YAO A, SU A, et al. Re-recognizing the impact of particle shape on physical and mechanical properties of sandy soils: A numerical study [J]. Engineering Geology, 2019, 253: 36 - 46.

[9] 蒋晓娟, 龚福洪. 三峡库区秭归县城新址回填风化砂工程性状研究 [J]. 人民长江, 2017, 48 (5): 48 - 52, 82.

[10] 刘清秉, 项伟, BUDHU M, 等. 砂土颗粒形状量化及其对力学指标的影响分析 [J]. 岩土力学, 2011, 32 (增刊 1): 190 - 197.

[11] 邓敏维, 陈天翼, 廖镇华, 等. 砂砾石加高软基路堤变形特性的离心模型试验研究 [J]. 土木工程学报, 2023, 56 (增刊 2): 115 - 121.

[12] 王明洋, 赵跃堂, 钱七虎. 饱和砂土动力特性及数值方法研究 [J]. 岩土工程学报, 2002 (6): 737 - 742.

[13] 杨莹. 覆盖层地基不良砂砾石材料力学特性三轴试验研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2022.

[14] 崔熙灿. 缩尺效应对砂砾石料的力学特性及其本构模型参数的影响规律研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2023.

[15] 周文权, 冷伍明, 蔡德钧, 等. 循环荷载作用下路基粗粒土填料临界动应力和累积变形特性分析 [J]. 铁道学报, 2014, 36 (12): 84 - 89.

[16] 黄虎, 邱庆明, 曹克磊, 等. 胶凝砂砾石细观滞回模型敏感性分析 [J]. 混凝土, 2023 (11): 139 - 147.

[17] 梁立峰, 赖仁桂, 刘顺凯. 基于离散元的砂砾石填料压实特性研究 [J]. 路基工程, 2023 (6): 37 - 45.