

颗粒形状对砂土蠕变的内部结构与颗粒运动的影响*

高燕¹, 陈庆¹, 柏文锋², 孙乐¹, 江雨潮¹, 唐旭东¹

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082

2. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010

摘要: 砂土的颗粒形状会影响其物理力学性质, 从而影响其工程特性。为探究蠕变过程中砂土颗粒形状对其内部结构与颗粒运动特征的影响, 建立微观颗粒运动与宏观变形的联系, 本研究基于离散元数值模拟方法, 模拟不同颗粒形状的砂土在不同应力下的蠕变过程。研究表明, 非圆形颗粒与圆形颗粒对蠕变的微观响应有较大差异。颗粒形状越扁平, 砂土强度越高, 蠕变变形越趋向于体积减小。蠕变过程中, 不同的颗粒形状会影响颗粒间接触力分布, 使其与砂土剪切过程中颗粒间接触力的分布规律更为相似; 在颗粒排列方向上, 越扁平的颗粒越趋于朝着垂直于主应力方向 (水平方向) 分布。剪切过程中, 颗粒形状使得颗粒间接触运动对整体试样的变形贡献发生改变, 非圆形颗粒的法向接触滑移引起剪胀, 而切向接触滑移引起剪缩, 与圆形颗粒运动的贡献相反。蠕变过程中, 颗粒间接触运动对宏观体应变的贡献与蠕变起始点的应变特征密切相关, 即颗粒间接触运动的贡献取决于蠕变的初始状态, 是初始状态的变形延续。本研究可为地基的长期稳定性与变形预测提供一定的理论基础。

关键词: 颗粒形状; 蠕变变形; 砂土内部结构; 颗粒运动特征

中图分类号: P64 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2026)04-0113-10

Influence of particle shape on the internal structure and particle movement in sand creep

Gao Yan¹, Chen Qing¹, Bai Wenfeng², Sun Le¹, Jiang Yuchao¹, Tang Xudong¹

1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

2. Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China

Abstract: The shape of sand particles affects the physical and mechanical properties of sand, thereby influencing its engineering behavior. To investigate the influence of soil particle shape on its internal structure and particle motion characteristics, the creep process of sands with different particle shapes under varying stresses was simulated based on the discrete element method in the study. The results reveal that the micro-scopic of non-spherical particles to creep is quite different from that of spherical particles. The flatter particle shape leads to higher sample strength and more volumetric contraction. The particle shape affects the distribution of contact force during creep, which makes it more comparable to the distribution of contact force in the shearing process. In terms of particle alignment, the flatter the particles, the more they tend to be distributed in the direction perpendicular to the major external loading (i.e., the horizontal direction) during creep. During shearing, particle shape changes the contribution of internal particle contact motion to overall specimen deformation normal contact deformation produces dilatancy while tangential contact deformation generates contraction, contrary to

* 收稿日期: 2025-10-17

录用日期: 2026-01-05

网络首发日期: 2026-04-08

基金项目: 国家自然科学基金 (42072295)

作者简介: 高燕 (1984 年生), 女; 研究方向: 地质灾害、土的宏微观; E-mail: gaoyan25@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20250223

its contribution in spherical particle motion. The contribution of inter-particle contact motion to the volumetric strain during creep is closely related to the strain characteristics at the onset of creep. In other words, the contribution of the interparticle contact motion in creep depends on the initial state of creep and is a continuation of the deformation from that state. This study provides a theoretical basis for predicting long-term stability and deformation in geotechnical foundations.

Key words: particle shape; creep deformation; internal structure of soil; particle motion characteristic

砂土具有良好的工程特性,被广泛应用于各类工程建设中。砂土自身物理特性对其力学性质有较大影响,颗粒形状是影响砂土工程特性的一个重要因素。砂土的颗粒形状通过影响颗粒间接触关系等内部结构,从而影响其强度、变形等宏观力学性质。目前通过室内试验与数值模拟,已在颗粒形状对砂土力学特性的影响方面积累了一定研究成果(康馨等,2020;刘鑫等,2024;王志兵等,2024;吴杨等,2023)。已有研究指出,颗粒形状决定了颗粒材料的填充排列方式和相互作用关系,特定的颗粒形状意味着特定的力学响应机制(Necochea et al., 2024);并且,颗粒形状对堆积密度、剪切特性等均有影响(黄良等,2025;王蕴嘉等,2019),圆形颗粒的强度比椭圆形颗粒低(Rothenburg et al., 1991)。颗粒形状对孔隙比、临界状态参数的影响显著,颗粒的棱角越突出,形状越不规则,其压缩系数和极限孔隙比越大,临界状态的摩擦角也越大(Wu et al., 2021)。不同学者采用不同参数对砂土颗粒形状特征进行了量化。张宇等(2022)引入整体颗粒形状参数 O_r 从球度、长宽比和凸度3个角度描述砂土颗粒的形状特征,研究表明砂土内摩擦角随 O_r 的增大不断减小。罗岚等(2018)定义了综合表征颗粒形状粗糙程度的形状因子,并通过弯曲元试验,研究了砂土颗粒形状特征对砂土剪切模量的影响。

颗粒形状对蠕变变形的影响明显,蠕变过程中颗粒形状不规则试样的蠕变位移大于圆形试样(Wang et al., 2018)。随着工程建设持续推进,人们愈发认识到研究蠕变机制的重要性。目前,对砂土蠕变的研究主要集中于对蠕变变形现象与规律的描述,对蠕变机制的认识主要为颗粒接触点变形、颗粒重排列(相互滚动、滑动等)和颗粒破碎等。对于砂土颗粒形状对砂土蠕变过程中的内部结构与颗粒运动特征的影响,尚缺乏系统性研究。鉴于此,本研究采用离散元方法,模拟不同形状的砂土颗粒,分析了砂土颗粒形状对蠕变过程中内部结构

与颗粒运动特征的影响。

1 考虑颗粒形状的蠕变离散元模拟

1.1 砂土形状模拟

为了实现不同颗粒形状的构建,本研究通过离散元数值模拟软件(PFC^{2D} Itasca Company, USA, version 4.0)的clump功能进行模拟。clump基于面积守恒原则将原本的圆形颗粒替换为1个clump颗粒,本研究采用1个大颗粒和2个半径相等的小颗粒组成的类椭圆颗粒(图1)。新生成的非圆形颗粒的方向排列随机,即颗粒生成时无定向性,试样内部结构为各向同性,以避免考虑颗粒形状后由于颗粒定向排列而产生的初始结构各向异性影响。本研究通过将clump近似看作1个椭圆,通过离心率(e)来衡量其形状的扁平程度,即 e 越趋于0,越圆,而越趋于1,越扁平。本研究考虑 e 分别为0.75、0.6、0.33这3种情况。

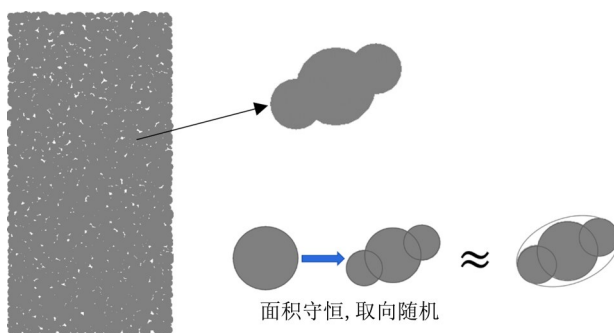


图1 PFC软件中用clump代替初始颗粒

Fig. 1 Replacing initial particles with clumps in PFC

1.2 蠕变数值模拟

砂土蠕变的数值模拟分为试样制备、各向同性压缩、双轴剪切和在恒定偏应力下的蠕变4个阶段。在长7 m、高14 m的长方形区域内,生成半径分布为0.25~0.755 dm的clump颗粒。密砂和松砂试样的初始孔隙比分别为0.15和0.30,对应的颗粒数目分别为13 262和10 921个。试样的围压设置为400 kPa,采用应变控制式,即顶部和底部的墙体以恒定速率运

动,实现试样剪切。保持轴向偏应力和围压为某一固定值,开始蠕变模拟。为了探讨不同外力大小对蠕变变形的影响,选择不同大小的偏应力作为初始蠕变压力。颗粒间的接触模型为 Hertz-Mindlin 接触模型,在蠕变开始时,颗粒间的切向接触模型被替换为 Burgers 模型,具体参数如表 1 所示。

表1 双轴蠕变离散元模拟中参数取值

Table 1 Parameters used in biaxial creep in discrete element simulations

参数	取值
颗粒密度 $\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 650
颗粒半径/cm	0.250~0.755
密砂	
颗粒数目	13 262
孔隙率	0.15
松砂	
颗粒数目	10 921
孔隙率	0.30
颗粒间摩擦	
初始试样生成阶段	0.00
剪切阶段 f_s	0.50
颗粒与墙体摩擦	0.00
Hertz-Mindlin 接触模型	
剪切模量 G/GPa	3.00
泊松比 ν	0.20
滚动阻力接触模型	
滚动摩擦系数 J_n	0.50
最大滚动摩擦系数 η	0.50
Burgers 接触模型	
Maxwell 模型黏性系数 $C_M/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	3.8×10^8
Kelvin 模型黏性系数 $C_K/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	3.8×10^7

1.3 内部结构表征

本研究采用颗粒长轴方向、颗粒间的接触方向、接触力大小、孔隙方向来表征砂土的内部结构特征。为定量衡量孔隙的不规则形状、大小以及各向异性等,本研究基于 Kang et al. (2012) 和 Li et al. (2009) 对孔隙的定义,将颗粒介质分为多个互不重叠且无间隙的多边形,通过图像处理技术将单个孔隙(孔隙空间)按区域等效方法,等效为 1 个最适拟合椭圆,取椭圆长轴方向的单位向量作为孔隙方向。颗粒、孔隙及颗粒间接触的方向性通过组构张

量 $\mathbf{F}_{ij}$ 定量描述 (Yang et al., 2022):

$$\mathbf{F}_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{n}_i^k \mathbf{n}_j^k, \quad (1)$$

式中 N 为组分个数(如颗粒数目等), k 为组分中第 k 个量, $\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j$ 为代表组分优势方位的单位向量(如颗粒长轴方向、颗粒间接触法向、孔隙长轴方向等), i, j 代表空间中单位向量组成数量在二维空间中取值为 1, 2。进而通过偏组构张量的差值 $(\Phi_1 - \Phi_2)$ 和主方向角度 θ_{major} 来衡量结构性的各向异性程度和其优势排列的主方向。在二维空间中,偏组构张量 Φ_1 和 Φ_2 , 以及分布的优势主方向角度 θ_{major} 分别为:

$$\begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} (F_{11} + F_{22}) \pm \sqrt{\left(\frac{F_{11} - F_{22}}{2} \right)^2 + F_{12}^2}, \quad (2)$$

$$\theta_{\text{major}} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2F_{12}}{F_{11} - F_{22}} \right), \quad (3)$$

式中 F_{11} 与 F_{22} 分别为组构张量 $\mathbf{F}_{ij}$ 的对角线分量。 $\Phi_1 - \Phi_2$ 越大,表示各向异性程度越强。主方向角度以水平向右的射线作为始边,逆时针方向为正值。

颗粒间的接触力根据大小可分为强力链和弱力链。强力链指大于平均法向接触力的接触力,反之为弱力链。颗粒介质的许多微观力学特性在强弱力链上有不同表现。颗粒间的接触力根据方向,可分为法向力和切向力,其对试样剪切强度的贡献为 (Yang et al., 2023):

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^{N_c} \mathbf{R}^k \mathbf{N}^k \mathbf{n}_i^k \mathbf{n}_j^k + \frac{1}{V} \sum_{k=1}^{N_c} \mathbf{R}^k \mathbf{T}^k \mathbf{n}_i^k \mathbf{t}_j^k, \quad (4)$$

式中 σ_{ij} 为平均应力张量, V 为试样体积, N_c 为总接触数量, $\mathbf{N}^k$ 与 $\mathbf{T}^k$ 分别为第 k 个接触上的法向分量与切向分量, $\mathbf{R}^k$ 是第 k 个接触上 2 个颗粒中心联结的位置矢量; $\mathbf{n}_i^k$ 与 $\mathbf{t}_j^k$ 分别为垂直和平行于接触平面的单位向量。其中,平均应力张量的分量 σ_{11} 代表竖直方向应力,即最大主应力 σ_1 ; 而分量 σ_{22} 表示水平方向应力,即围压 σ_3 。因此,这 2 个分量的差值即为偏应力,可用于表征试样的剪切强度。

2 结 果

考虑颗粒形状后的数值模拟结果,能够较好地反映砂土剪切与蠕变过程中的宏观应力应变关系和体应变响应,并且当离心率达到某一程度后和圆形颗粒考虑滚动阻力的结果相当。

2.1 剪切过程中的宏观应力应变特征

图 2 和图 3 展示了不同形状颗粒试样的双轴剪切试验结果。由图 2 可知,随着离心率(e)的增加,

密砂与松砂试样的剪切强度均不断增加。当 e 为 0.75 时,密砂试样和松砂试样的强度均与考虑滚动摩擦的圆形颗粒试样的强度基本一致。因此,后续分析中以 e 为 0.75 的颗粒情况为代表,以更好地探究颗粒形状对试样变形与微观颗粒运动的影响。

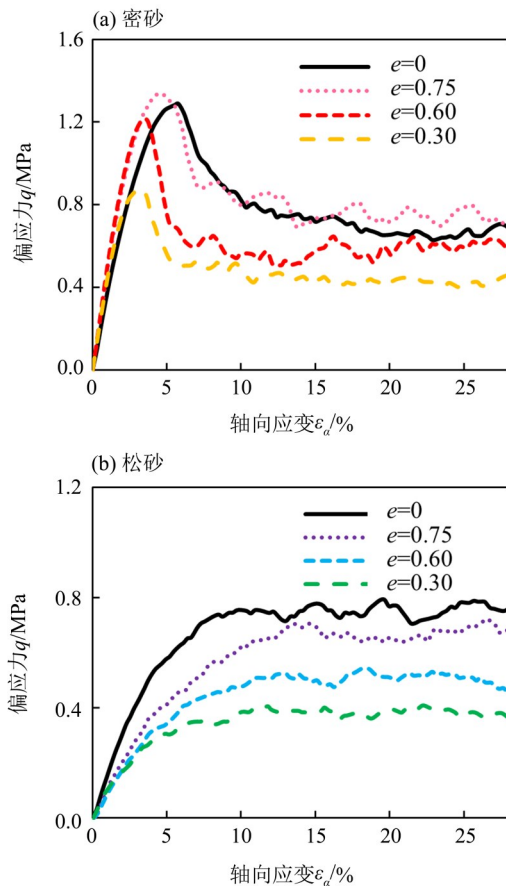


图2 不同形状砂土的偏应力随轴向应变的变化趋势
Fig. 2 Variation trend of deviatoric stress with axial strain for sands with different particle shapes

图3为砂土体应变随离心率的变化情况,在密砂试样中,离心率增加会使初始剪缩量增加,但在剪切过程后期,由试样剪胀引起的体应变几乎一致;而在松砂试样中,颗粒离心率越大,颗粒越趋于扁平,其剪缩量越大,但在 e 为 0.30 时(此时非圆形颗粒接近于圆形),非圆形颗粒试样的剪缩量与考虑滚动摩擦情况下圆形颗粒试样的剪缩量相当;即松砂试样中 e 增加会使剪切强度和剪缩量增加,但滚动摩擦的圆形颗粒虽可以增加试样的剪切强度,但并不会使试样的剪缩量有太大变化。因此,从宏观角度看,颗粒形状和滚动摩擦对砂土强度的贡献一致,但对砂土变形的贡献却有所差别。

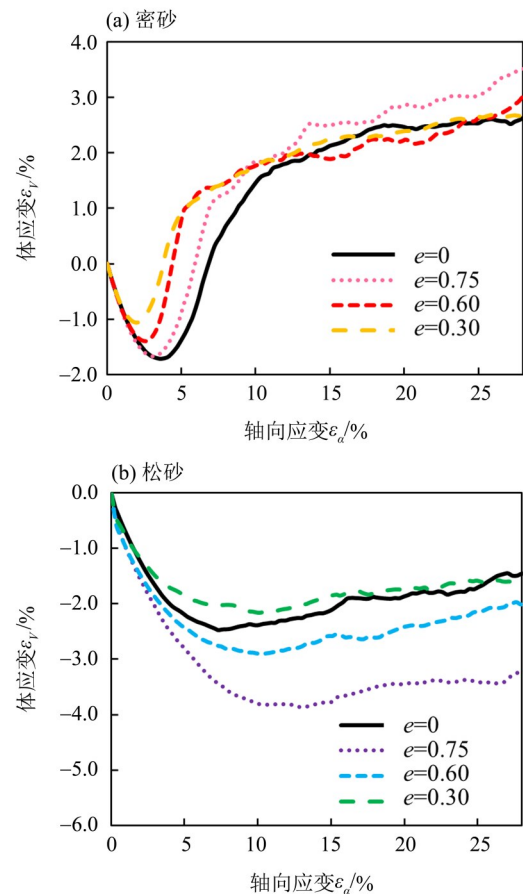


图3 不同形状砂土的体应变随轴向应变的变化趋势
Fig. 3 The variations of volumetric strain with axial strain for sands with different particle shapes

2.2 蠕变过程中的宏观变形特征

图4为颗粒形状最扁平的试样($e=0.75$)蠕变过程中的应力应变、体应变以及蠕变速率变化,以 e_1 标识颗粒形状最扁平的非圆形颗粒试样。为便于讨论,将不同初始应力和不同密度下发生蠕变的试样标记如下:密砂(D),采用 $D1-e_1$ 、 $D2-e_1$ 表示非圆形颗粒密砂在偏应力 1 100 kPa(高偏应力)和 600 kPa(低偏应力)下发生蠕变的试样(图4a), $D1$ 、 $D2$ 分别为对应的圆形颗粒情况;松砂(L),采用 $L1-e_1$ 表示非圆形颗粒松砂在偏应力 500 kPa 下发生蠕变的试样, $L1$ 为对应的圆形颗粒情况;而 $D0-e_1$ 及 $L0-e_1$ 表示非圆颗粒剪切过程的应力应变曲线, $D0$ 和 $L0$ 分别为对应的圆形颗粒情况。由图4b可知,考虑砂土的颗粒形状后,蠕变的响应规律与圆形颗粒相似。对密砂而言,当蠕变初始应力大于临界偏应力时会发生蠕变断裂,而在蠕变初始应力小于临界偏应力的密砂和松砂中,则不会发生蠕变断裂。从应变上看,密砂仍发生剪胀但剪胀量变小,且蠕变的初始

压力越大,剪胀性越大;而松砂仍发生剪缩且剪缩量增加。综上所述,考虑形状后砂土蠕变的变形特性未发生质变,仍沿着原剪切过程的变形趋势发生变形,这与真实砂土的蠕变规律一致。

由图4c可知,蠕变速率呈现砂土蠕变的一般规律,包含减速蠕变、匀速蠕变与加速蠕变阶段。双对

数坐标中,减速蠕变阶段的蠕变速率呈线性减小,而对密砂试样而言,匀速蠕变阶段不明显,当蠕变初始应力大于临界偏应力时出现加速蠕变阶段,即蠕变速率快速上升。这一结果也与圆形颗粒的蠕变结果一致。颗粒形状越扁平,减速蠕变阶段的蠕变速率越小,但由于应力更集中,其蠕变断裂发生更早。

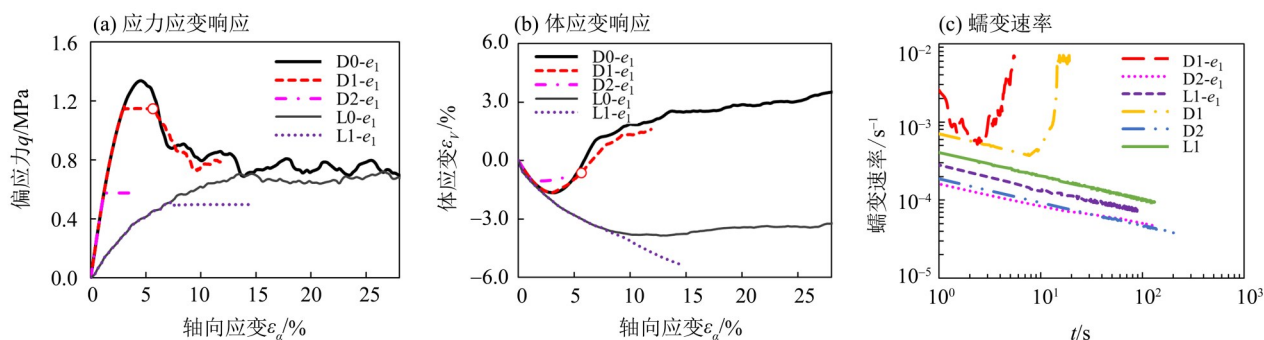


图4 扁平颗粒砂土的蠕变宏观力学响应

Fig. 4 Macroscopic mechanical response of flat granular sand during creep process

3 讨论

3.1 蠕变过程中颗粒形状对砂土内部结构演化的影响

3.1.1 颗粒形状对颗粒排列的影响 本研究发现,颗粒的长轴主要排列在水平方向(180°),颗粒排列方向的各向异性随着变形程度的增加逐渐增加,即越来越多的颗粒趋向于水平方向排列,且颗粒排列的优势方向与各向异性的变化也与剪切过程重合(图5)。上述结果表明,颗粒排列无法从微观角度反映蠕变和剪切过程的不同。

3.1.2 颗粒形状对接触方向的影响 由图6可知,非圆颗粒在强力链和弱力链中接触法向各向异性在蠕变过程中的发展都依赖于初始状态。蠕变初始阶段,密砂与松砂在强力链中颗粒间接触法向的各向异性均增加,但增幅较原本的剪切过程小。对会发生蠕变断裂的密砂试样(D1- e_1)而言,其各向异性在蠕变后期的降低同样较好地揭示了蠕变断裂发生的原因,即强力链中接触法向的各向异性程度下降,预示着试样的抗剪强度下降。同时,弱力链中接触法向的各向异性变化与对应的原本剪切过程差异不大,有很强的路径依赖性。与圆形颗粒试样相比,非圆形颗粒蠕变过程中的强弱点接触方向各向异性程度下降较大(Gao et al., 2023)。

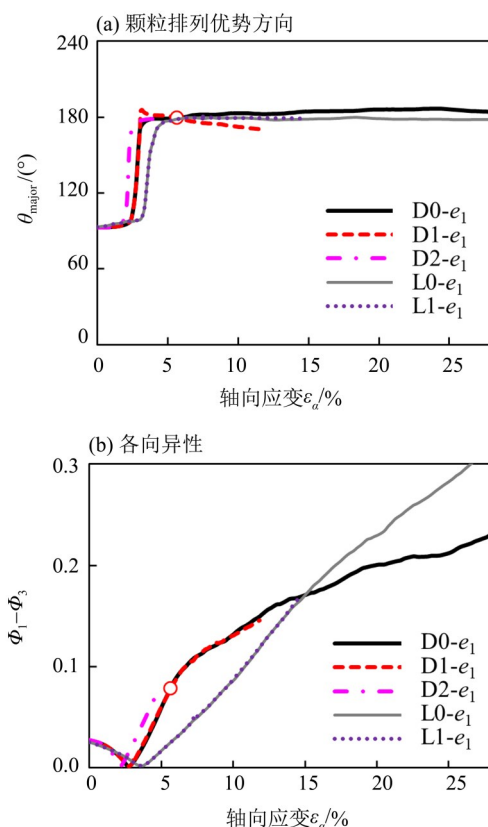


图5 砂土蠕变过程中颗粒排列特征变化趋势

Fig. 5 Variation of particle arrangements during creep process

3.1.3 颗粒形状对接触力大小的影响 蠕变后(D1、D2、L1)与其对应相同轴向变形的剪切时刻(D0、L0)的接触力频率分布如图7所示,可以

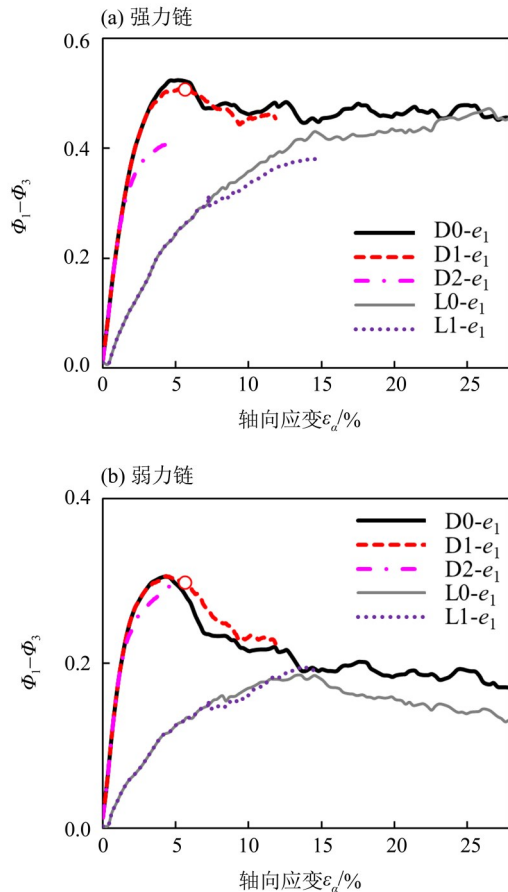


图6 非圆颗粒形状砂土蠕变过程中接触法向各向异性变化
Fig. 6 Variation of contact normal anisotropy during creep in sands with irregular particle shapes

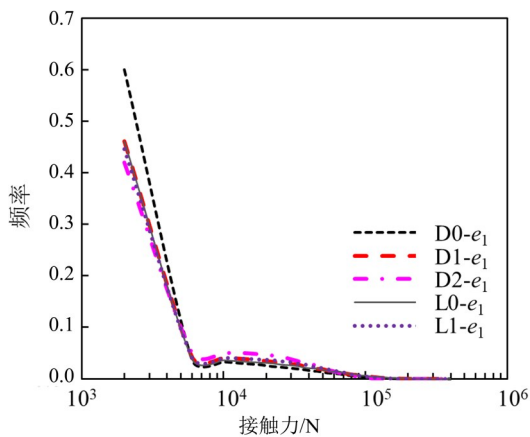


图7 不同颗粒形状下砂土蠕变过程中接触力频率分布
Fig. 7 Contact force frequency distribution in sand creep process with different particle shapes

看出蠕变后接触力大小的变化与剪切过程中的略有不同,蠕变后弱力有所减少,强力增加,但接触力频率分布与砂土剪切过程中的分布规律几乎一致,这和圆形颗粒试样中,蠕变过程极大地改变了接

触法向力的分布规律不同(Gao et al., 2023)。

3.1.4 颗粒形状对孔隙各向异性的影响 由图8可见,密砂和松砂试样中孔隙的各向异性均随剪切过程(D0、L0)的进行逐渐降低,孔隙排列(长轴方向)的优势方向为水平方向。在蠕变过程中,孔隙各向异性会沿着原剪切过程发展;对于发生蠕变断裂的试样D1-\$e_1\$,并未在峰值应力后展现出孔隙分布各向异性下降的特征,其可能原因为非圆颗粒长轴趋向于水平方向时,其形成的孔隙长轴也会趋向于水平方向排布。

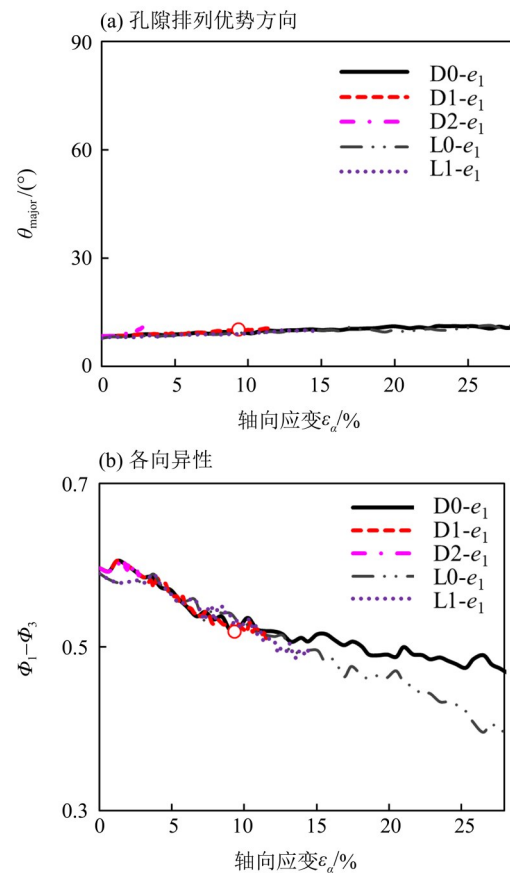


图8 砂土蠕变过程中孔隙特征的变化
Fig. 8 Variations in pore characteristics of sands during creep process

3.2 颗粒形状对颗粒接触运动及宏观变形的影响

3.2.1 颗粒接触运动类型与宏观贡献 根据已有研究,颗粒接触运动可分为接触滑移、接触滚动及接触刚体运动(刚体转动、刚体滑动)3种相互独立的运动类型(Goryacheva et al., 2022; Kildashti et al., 2023)。接触滑移可分为法向分量和切

向分量(Kildashti et al., 2023),即法向接触滑移和切向接触滑移。法向接触滑移使颗粒在接触处产生“磨损”或“分离”。本研究中,由于模拟采用刚体颗粒,因此不会产生“磨损”,而“分离”通常来自颗粒间的转动,故将法向接触滑移称为转动型滑移;切向接触滑移来自颗粒间的位移或移动,故将其称为位移型滑移。接触滚动描述了颗粒间的相对转动。刚体运动为相互接触的颗粒对中的刚体运动部分,可分为刚体转动和刚体位移2种运动模式,刚体位移对局部应变无贡献;因此,宏观变形只受接触滑移、接触滚动和刚体转动的作用(Goryacheva et al., 2022; Kildashti et al., 2023; Xiao et al., 2021; Yuan, 2016)。颗粒运动分类与计算细节可参考Chen et al.(2022)。

3.2.2 颗粒形状影响 剪切过程中考虑颗粒形状的不同类型接触运动,对试样体应变的贡献见图9。对于非圆颗粒,不同类型接触运动对体应变的贡献与圆形颗粒相同,即法向接触滑移和切向接触滑移

对体应变的变化起主要作用,而接触滚动和刚体转动的贡献较小,接近0。对于密砂试样,在剪切初始阶段,法向接触滑移仍起控制作用,即初始剪缩几乎均由法向接触滑移引起,但在剪切过程进入较大轴应变后,接触滑移的贡献作用则完全不同。在非圆形颗粒的密砂试样中,法向接触滑移引起较大的剪胀,与圆形颗粒形成了显著对比。对于松砂试样,在非圆形颗粒试样中,法向接触滑移也引起试样剪胀,与圆形颗粒的情况相反。同样,在非圆形颗粒的密砂试样中,切向接触滑移总是趋向于引起剪缩,在松砂中引起的剪缩更大,这也与其在圆形颗粒试样中主要引起为剪胀作用的情况相反。

上述结果定量复现了已有研究结果(Yuan, 2016)。数值结果和试验结果均表明,接触滑移是引起试样变形的主要接触运动,尽管其法向分量和切向分量的作用可能不同,但试样变形依然主要由这2种运动类型引起。这也验证了已有研究应用接触滑移来分析颗粒运动和试样变形关系的正确性。

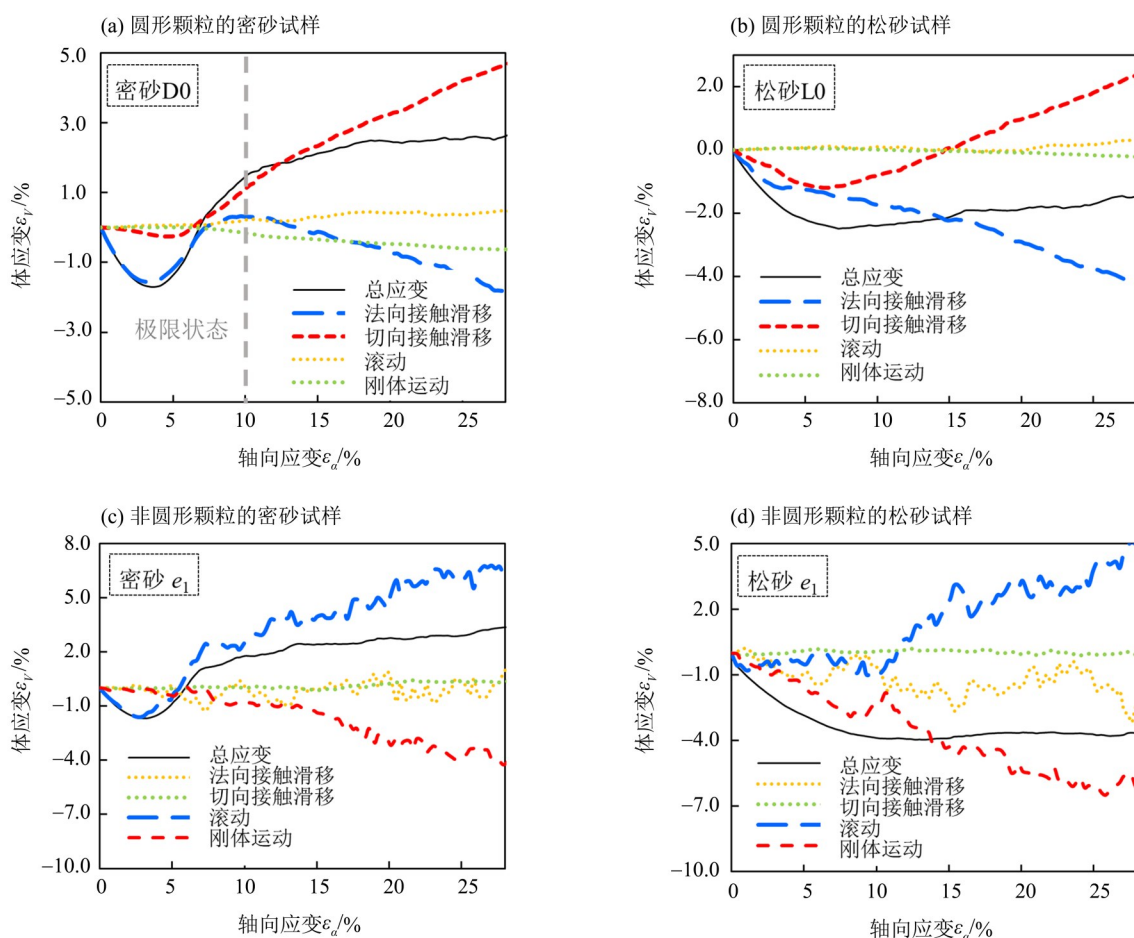


图9 剪切过程中不同类型接触变形对于试样体应变的贡献

Fig. 9 Contribution of different types of contact motions to the overall strain of the specimen during shearing

在蠕变过程中,各类型的接触运动与原剪切过程的联系非常紧密(图 10)。其中,接触法向滑移在密砂中依然起体积增加作用,且比剪切过程更显著,而在松砂中法向接触滑移起体积缩小作用,与原剪切过程中的作用相反,但与圆形颗粒中接触运动的作用一致。对于切向接触滑移而言,在密砂和

松砂试样中依然起体积缩小作用,并且变形路径依赖性依然存在,这与在圆形颗粒试样蠕变中得到的结论一致。而接触滚动和刚体转动在蠕变过程中起到的作用依然较小。因此,总体上,考虑颗粒形状后,蠕变变形发展受初始状态控制,接触运动对其内在机制无本质影响。

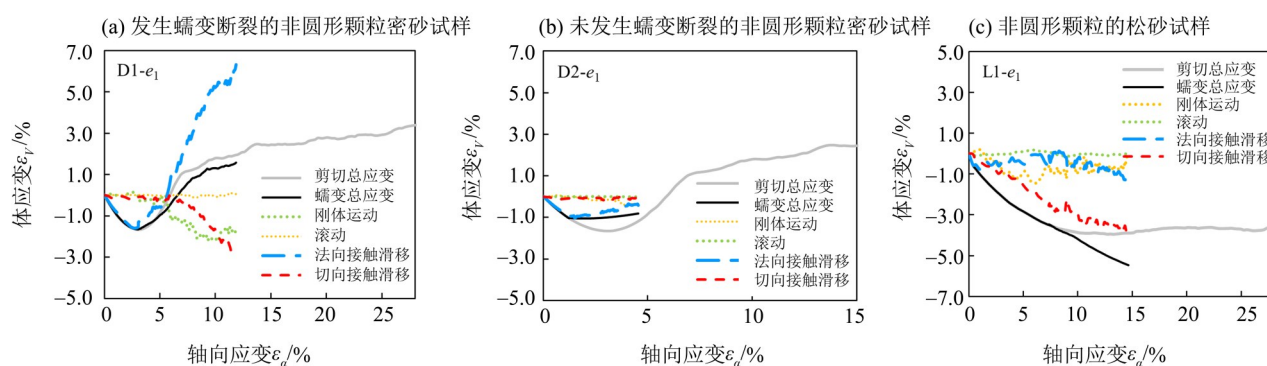


图 10 蠕变过程中各接触运动类型对于蠕变变形的贡献

Fig. 10 Contributions of various contact motion types to creep strain during creep process

综上所述,颗粒形状使得内部颗粒的接触运动对整体试样的变形贡献机制发生了变化。主要体现为,在剪切大变形阶段,法向接触滑移和切向接触滑移的作用与圆形颗粒相反,即法向接触滑移引起剪胀,而切向接触滑移引起剪缩;而蠕变过程仍与圆形颗粒规律相似。

3.2.3 强弱力链中颗粒形状对颗粒接触运动的影响 上述研究表明,对于非圆形颗粒,颗粒接触滑移对试样体应变的贡献最大。进一步分析试样强、弱力链中接触滑移的贡献可见(图 11),弱力链中法向接触滑移的贡献无论在剪切还是蠕变过程中,始终引起体积膨胀。而在强力链中,剪切过程中法向接触滑移趋向于引起剪胀;而在蠕变过程中,其在密砂中引起体积增加,在松砂中引起体积减小,这与蠕变的起始状态相关。

剪切过程中强力链和弱力链中切向接触滑移均引起了试样的体积减小;蠕变过程中,其在弱力链中引起体积减小,沿着原剪切过程的路径发展,在强力链中仍引起体积减小且略大于原剪切过程(图 12)。在考虑颗粒形状后,弱力链产生的变形依然大于强力链。

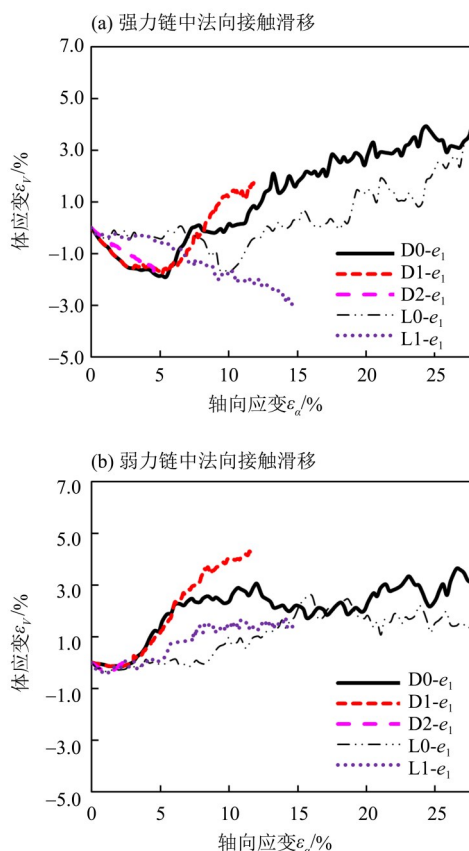


图 11 强、弱力链中法向接触滑移对体应变的贡献

Fig. 11 Contribution of normal contact deformation to volumetric strain in strong and weak force chains

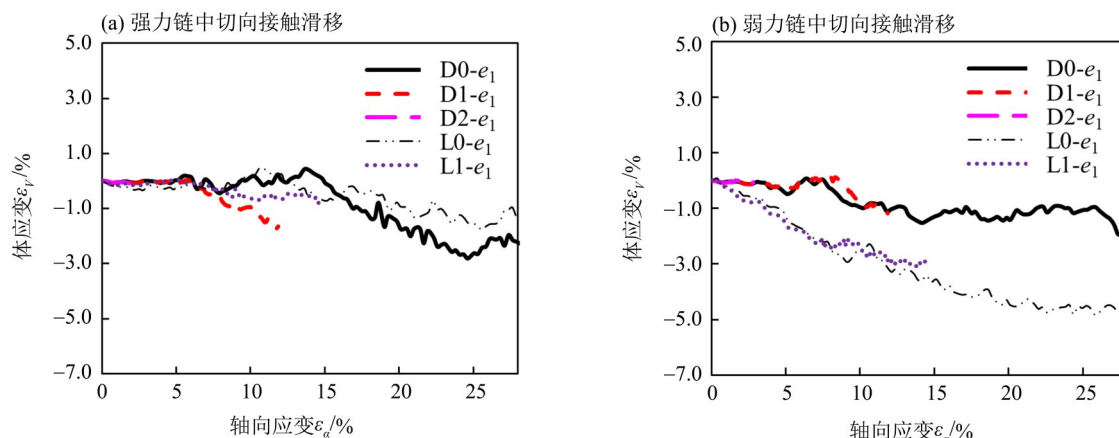


图12 强、弱力链中切向接触滑移对体应变的贡献

Fig. 12 Contribution of tangential contact deformation to volumetric strain in strong and weak force chains

4 结 论

本研究通过离散元数值模拟,探索了颗粒形状对剪切与蠕变过程中砂土的宏观行为以及微观响应的影响。主要结论如下。

1)颗粒形状越扁平,试样强度越大,蠕变变形越趋于体积减小。微观分析表明,颗粒形状增加了颗粒间接触的各向异性程度,竖直方向接触的增加,使得强度提高;对于接触力,颗粒形状的改变影响了接触力频率分布,使其与砂土剪切过程接触力频率的分布规律更为相似,非圆颗粒的接触力有更多的弱力链;在颗粒排列方向上,越扁平的颗粒在蠕变过程中越趋向于朝垂直于主应力方向(水平方向)分布,这是由于垂直于主应力方向颗粒的状态最稳定;对于孔隙的结构性,非圆颗粒试样的表现与圆形颗粒差异大,颗粒形状使孔隙的主方向由主应力方向向近水平方向旋转。蠕变过

程中,颗粒形状使蠕变的结构响应趋于沿着原剪切过程发展,减小了剪切过程与蠕变过程之间的微观力学响应。

2)剪切过程中,颗粒形状使各类型接触运动对体应变的贡献作用不同于其在圆形颗粒试样中的贡献。其中,法向接触滑移在密砂剪切的小变形阶段仍引起体积减小,但在大变形阶段,引起体积增加,与松砂中的结果类似。对于切向接触滑移,其在非圆形颗粒中起剪缩作用,与其在圆形颗粒试样中起剪胀作用的情况相反;接触滚动和刚体转动在剪切过程中对试样变形起到的贡献仍较小,其中接触滚动较圆形颗粒中要大,这可能因为非圆颗粒的形状破坏了微观上的某种对称性。蠕变过程中,各组分的各向异性变化及各类型接触运动依然倾向于沿原作用模式发展,路径依赖性加强,且蠕变过程中接触运动对体应变的作用也与剪切过程联系更加紧密。

参考文献:

黄良,曹杰,邓清禄,等,2025.颗粒形状对砂土剪切特性影响的试验和数值分析[J].安全与环境工程,32(3):90-100.
康馨,陈植欣,雷航,等,2020.基于3D打印研究颗粒形状对砂土宏观力学性质的影响[J].岩土工程学报,42(9):1765-1772.
刘鑫,徐新钰,黄良,等,2024.考虑颗粒形状影响的砂土剪切波速研究[J].岩石力学与工程学报,43(5):1291-1300.
罗岚,夏唐代,仇浩森,2018. K_0 条件下颗粒形状特征对砂土剪切模量的影响[J].岩土力学,39(10):3695-3702.

王蕴嘉,宋二祥,2019.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,40(6):2416-2426.
王志兵,宁泽华,王晨,等,2024.基于CT扫描研究颗粒形状对砂土力学性质的影响[J].科学技术与工程,24(21):9077-9086.
吴杨,容浩俊,王金莲,等,2023.颗粒形状和中主应力对砂土力学特性耦合影响的真三轴试验研究[J].岩石力学与工程学报,42(2):497-507.
张宇,王晖,张家生,等,2022.颗粒形状对砂土力学特性的影响研究[J].铁道科学与工程学报,19(11):3256-3265.

- Chen Q, Gao Y, Yuan Q, et al, 2022. The correlation of macro deformation and micro kinematics for dense granular material subjected to shearing[J]. *Comput Geotech*, 141: 104523.
- Gao Y, Chen Q, Yuan Q, et al, 2023. The kinematics and micro mechanism of creep in sand based on DEM simulations[J]. *Comput Geotech*, 153: 105082.
- Goryacheva I G, Zobova A A, 2022. Dynamics of deformable contacting bodies with sliding, rolling, and spinning[J]. *Int J Mech Sci*, 216: 106981.
- Kang D H, Yun T S, Lau Y M, et al, 2012. DEM simulation on soil creep and associated evolution of pore characteristics[J]. *Comput Geotech*, 39: 98–106.
- Kildashti K, Dong K, Yu A, 2023. Contact force models for non-spherical particles with different surface properties: A review[J]. *Powder Technol*, 418: 118323.
- Li X, Li X S, 2009. Micro-macro quantification of the internal structure of granular materials[J]. *J Eng Mech*, 135(7): 641–656.
- Necochea J E, SáEz E, Hanley K J, 2024. Effect of sand particle shape on micromechanical modeling in direct shear testing[J]. *Comput Geotech*, 169: 106222.
- Rothenburg L, Bathurst R J, 1991. Numerical simulation of idealized granular assemblies with plane elliptical particles [J]. *Comput Geotech*, 11(4): 315–329.
- Wang Y, Song E, Zhao Z, 2018. Particle mechanics modeling of the effect of aggregate shape on creep of durable rockfills[J]. *Comput Geotech*, 98: 114–131.
- Wu Y, Cui J, Huang J, et al, 2021. Correlation of critical state strength properties with particle shape and surface fractal dimension of clinker ash[J]. *Int J Geomech*, 21(6): 04021071.
- Xiao M, Ding Y, 2021. Contact kinematics between three-dimensional rigid bodies with general surface parameterization[J]. *J Mech Robot*, 3(2): 021006.
- Yang S, Huang D, 2023. Understanding fabric evolution and multiple liquefaction resistance of sands in the presence of initial static shear stress[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, 171: 107962.
- Yang S, Huang D, Wang G, et al, 2022. Probing fabric evolution and liquefaction resistance of sands using discrete-element modeling [J]. *J Eng Mech*, 148(6): 04022023.
- Yuan Q, 2016. Experimental characterizations of structural kinematics at micro- and meso-scales in a 2D rod assembly subjected to shearing[D]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology.

(责任编辑 江 睿)