

doi: 10.3969/j.issn.1003-2029.2026.01.013

基于 DEM 的钙质砂直剪试验：粒径范围与破碎率的率效应研究

杨晓飞^{1,2,3}, 易开⁴, 雷宇恒⁴, 徐仕霖⁵

(1. 山东省物化探勘查院, 山东 济南 250013; 2. 山东省地质勘查工程技术研究中心, 山东 济南 250013;
3. 地下资源环境高精度探测山东省工程研究中心, 山东 济南 250013; 4. 中国海洋大学工程学院, 山东
青岛 266404; 5. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 钙质砂的力学行为显著受控于其复杂颗粒形态与破碎特性, 而传统球形颗粒模型难以准确模拟此类效应。为克服此局限, 本文创新性地建立了基于多球聚合算法与平行黏结模型的可破碎钙质砂三维离散元直剪模型, 实现了对真实颗粒形态与破碎行为的精细模拟。系统研究了粒径范围与剪切速率对宏观力学特性的影响, 发现高应力下率敏感性随粒径增大呈先降后增趋势, 临界速率由 0.005 m/s 增至 0.04 m/s; 微观层面揭示了颗粒破碎率与粒径的正相关性, 以及高应力下破碎行为对速率的非单调响应机制。本文系统地揭示了粒径对钙质砂率效应的影响规律, 所揭示的微观机理为构建更为完善的钙质砂率效应理论体系提供了重要数值依据。

关键词: 钙质砂; 离散元; 颗粒破碎; 直剪试验; 力链

中图分类号: TU411; TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2026) 01-0114-09

我国南海岛礁地基主要由钙质砂吹填形成, 而钙质砂是由海洋生物遗骸经过数十年沉积形成, 主要成分是碳酸钙和其他难溶性碳酸盐类物质, 其外形较复杂且不规则, 具有高孔隙率、高压缩性及易发生颗粒破碎等特殊力学性质^[1-4]。

国内学者已开展了一系列钙质砂特性研究, 在颗粒形态研究方面, 通过图像分析技术揭示了钙质砂粒径与分形特征的关系^[5], 并建立了不同形貌颗粒的识别方法^[6]。力学特性研究表明, 钙质砂具有独特的压缩和剪切特性, 其黏聚力和内摩擦角普遍大于石英砂^[7], 且表现出显著的应力-应变路径依赖性^[8]; 试验还发现了临界剪切速率现象, 证实了高围压下颗粒破碎对材料率敏感性的重要影响^[9-10]。这些研究为深入理解钙质砂的工程特性奠定了重要

基础。

目前, 国内外学者对钙质砂力学作用机理的研究主要集中在围压、应力路径及胶结度等领域, 但对加载速率影响下的钙质砂力学行为研究较为不足。此外, 室内试验受试样尺寸的限制, 无法准确地分析钙质砂的真实力学性质, 也无法对力链和配位数等微观层面的力学参数演化过程进行分析, 且无法控制试验过程中颗粒破碎状态。离散单元法 (Discrete Element Method, DEM) 数值模拟作为一种新型试验方法, 成为研究钙质砂微观力学机制的关键手段。

离散元方法在岩土工程领域发展已经取得一定的成果。在二维模拟方面, 研究通过建立可破碎胶结颗粒模型, 揭示了颗粒形状、粒径分布和强度参

收稿日期: 2025-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42477194); 中国海洋大学优秀青年科技人才培养计划项目 (202441008); 山东省高等学校青创科技支持计划项目 (2024KJH119); 中国海洋大学海洋油气勘探国家工程研究中心数据采集技术分中心资助项目 (2025SDAT02)

作者简介: 杨晓飞 (1981—), 男, 学士, 正高级工程师, 主要从事水工环地质研究。E-mail: 9581321@qq.com

通信作者: 易开 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事钙质砂岩土工程研究。E-mail: 2023275375@qq.com

数对材料力学行为的影响机制^[11], 在土石混合料方面, 发现开缝程度显著影响峰值强度和颗粒骨架结构^[12], 同时证实了大粒径和高接触力颗粒优先发生剪切破坏的特性^[13]。三维模拟研究则着重于研究边界条件, 发现摩擦系数是决定最大偏应力的关键因素^[14-15], 并建立了适用于非饱和土多轴试验的分析方法^[16]。在钙质砂研究领域中, 学者们通过建立考虑颗粒破碎的离散元模型, 深入分析了级配演化对材料临界状态的影响^[17-19]。

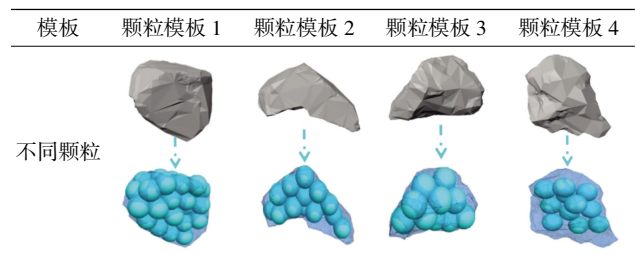
国内外学者在钙质砂基本物理特性和颗粒破碎特征方面已取得重要进展, 但仍存在几个关键问题需要解决: 现有数值模型多采用简化圆形颗粒, 未能准确反映真实不规则形态的力学效应; 细观参数体系不完善, 缺乏对破碎能量耗散机制的系统考量; 且直剪条件下加载速率效应的研究尚未结合粒径分布等关键因素。直剪工况作为岩土材料力学特性分析的经典基础场景, 能有效捕捉钙质砂颗粒破碎、咬合滑移等核心行为, 是验证模型合理性与探究上述问题的可靠载体。为此, 本文基于 PFC^{3D} 建立真实形状的可破碎钙质砂直剪模型, 系统研究粒径范围对材料率效应的影响机制。

1 直剪数值模型建立

1.1 钙质砂的颗粒形状

钙质砂的不规则颗粒形貌是影响其力学行为的关键因素。本文所采用的钙质砂试样均处于干燥状态, 通过激光扫描获取真实颗粒计算机断层扫描 (Computed Tomography, CT) 数据, 还原得到真实颗粒的三维形貌模型, 并采用多球聚合算法构建了 4 类代表性颗粒模板 (表 1)。在模型构建中, 通过迭代优化确定聚合球的数量与尺寸, 以确保聚合体与原始颗粒在体积和轮廓上的拟合误差均低于 2%。为定量评定模型保真度, 选取了长宽比、球形度与棱角性指数作为关键形貌参数进行一致性验证, 结果表明所建模型与原始颗粒在上述参数上的平均误差小于 3%。该方法有效复现了真实颗粒的几何特征, 为后续分析颗粒形状对直剪试验中破碎率及率相关特性的影响提供了可靠基础。

表 1 颗粒模板图



1.2 钙质砂模型建立与数值模拟方案

本文基于室内直剪试验结果^[20], 建立了考虑颗粒破碎效应的钙质砂三维离散元模型。模型几何尺寸与实际试样一致 (直径 61.8 mm、高度 20 mm)。为平衡计算效率与宏观力学表征精度, 将室内试验中 0.5—1 mm 粒径按相似比放大至 1—2 mm, 同时设置 1.5—2.5 mm、2—3 mm 两组粒径范围用于参数影响分析。颗粒生成采用四类真实钙质砂形态模板, 通过 PFC^{3D} 内置 Fish 语言编程, 调用 clump distribute 命令按实际颗粒级配生成刚性颗粒簇 (clump); 为实现破碎功能, 通过遍历刚性簇内各 pebble 的空间坐标、半径等关键参数, 采用 ball 单元替换 pebble 并转化为柔性簇 (cluster), 簇内颗粒间赋予平行黏结模型, 簇间颗粒采用线性接触模型。

围压加载通过定制化 Fish 函数与伺服控制系统协同实现: 先利用 wall_wp 函数定义顶面及侧面墙体指针, 通过 get_wAreas 程序实时获取墙体几何参数, 借助 get_gain 函数计算顶面底面的加载增益 G 值 (gz), 引入松弛因子 α 调控墙体速度, 确保应力变化量小于实时值与目标值差值, 再通过 servo 程序实现每一时步的精准加载, 最终由 stop_me 程序判定围压达到设定值 (200 kPa、400 kPa、800 kPa、1 000 kPa) 且稳定后终止固结。直剪过程采用“上盒固定、下盒移动”模式, 下剪切盒按设定速率 (0.002 5—0.16 m/s) 水平移动, 通过应力伺服机制维持法向应力恒定, 剪切位移达 4 mm 时终止计算, 模型的具体结构如图 1 所示。

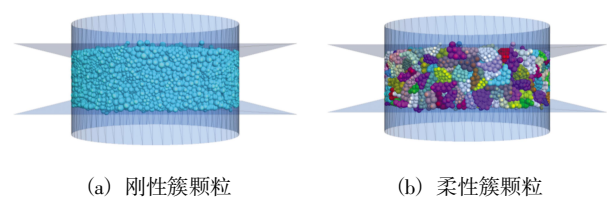


图 1 真实外形的可破碎钙质砂颗粒

2 直剪数值试验合理性验证

本文采用平行黏结模型来模拟颗粒间的胶结作用。该模型允许颗粒通过黏结键连接为颗粒簇,并能传递力与力矩。其力学行为由线性接触与平行黏结两部分共同描述,决定了颗粒体系的宏观力学响应。

确定合理的细观参数是颗粒流数值模拟的关键环节,直接影响模拟结果的可靠性。本文以王青^[20]的室内直剪试验数据为校验标准,通过参数敏感性分析识别关键影响参数后,采用试错法逐步优化,最终确定了如表2所示的一组细观参数。其中,平行黏结参数基于等效表征钙质砂颗粒因棱角互锁、表面凹凸形成的“拟黏结”咬合作用进行设置;颗粒破碎模型基于平行黏结失效机制,其破坏判据为颗粒间黏结力超过标定强度,这与钙质砂颗粒因受力超过“形貌互锁极限”而破碎的物理过程相吻合。

表2 直剪离散元参数模型

参数类别	参数名称	数值
基本颗粒体系参数	球密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 600
	孔隙率	0.4
	阻尼系数	0.5
	平行黏结法向强度($\bar{\sigma}_c$)/kPa	600
	平行黏结切向强度(\bar{c})/kPa	900
平行黏结模型参数	摩擦角($\bar{\varphi}$)/($^\circ$)	30
	摩擦系数(μ)	0.25
	线性刚度比(k^*)	1.0
	平行黏结刚度比(\bar{k}^*)	1.0
	有效模量(E^*)/MPa	20
	黏结模量(\bar{E}^*)/MPa	20

结果表明,在200 kPa、300 kPa和400 kPa法向应力下,模拟获得的峰值强度分别为169 kPa、215 kPa和272 kPa,与试验值(153 kPa、200 kPa和269 kPa)的偏差分别为10.4%、7.5%和1.1%;且不同应力水平下模拟与试验的应力-应变曲线形态吻合程度高,均呈现典型的软化特性,峰值强度、残余强度随法向应力的变化趋势趋于一致。为验证模型的准确性,将数值模拟结果与文献^[20]的室内直剪试验数据进行对比分析如图2所示。

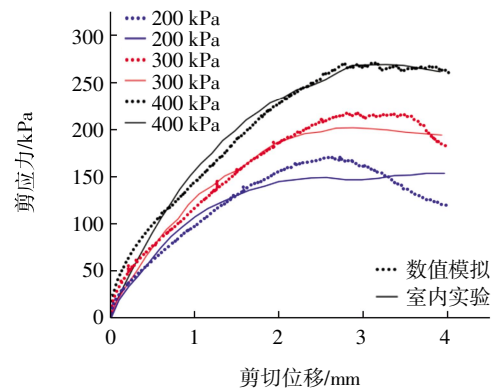


图2 直接剪切试验数值模拟值与试验值对比

3 粒径与剪切速率的交互作用对钙质砂宏观特性的影响

3.1 应力位移曲线率相关性分析

不同粒径范围下各剪切速率(v ,单位:m/s)对应的强度曲线如图3所示。试验结果表明,试样的偏应力随轴向位移和法向应力(σ_3 ,单位:kPa)的增加而增大,但表现出不同的变形特征:较低法向应力条件下呈现软化特征,且软化程度随法向应力增大而减弱;而高法向应力条件下则出现硬化现象。这种差异源于应力水平对颗粒运动的约束作用,低应力下颗粒更易发生换位、旋转等运动,而高应力增强了颗粒间的约束作用。

3.2 颗粒破碎曲线率相关性分析

数值模型在剪切过程中可定时输出颗粒簇的黏结破碎情况。为了反映试验过程中的颗粒破碎状况并提高计算效率,引入颗粒破碎率(Crushing Ratio, CR)对试样的破碎程度进行描述,本文用 B 来代表颗粒破碎率,其定义如下。

$$B = \frac{N_{\text{broken-bond}}}{N_{\text{total-bond}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $N_{\text{broken-bond}}$ 为破碎的黏结键数目; $N_{\text{total-bond}}$ 为总黏结数目。

颗粒破碎行为随粒径范围的变化规律如图4所示。由试验结果可知,在200 kPa与1 000 kPa法向应力组别中,低法向应力时破碎率受剪切速率影响较小;而当法向应力较大时,破碎率随剪切速率呈现先增大后减小的非线性变化规律。此外,颗粒破碎率随剪切位移增加而增大,小粒径试样破碎发展较为平缓,而大粒径试样呈现更陡峭的增长趋势。

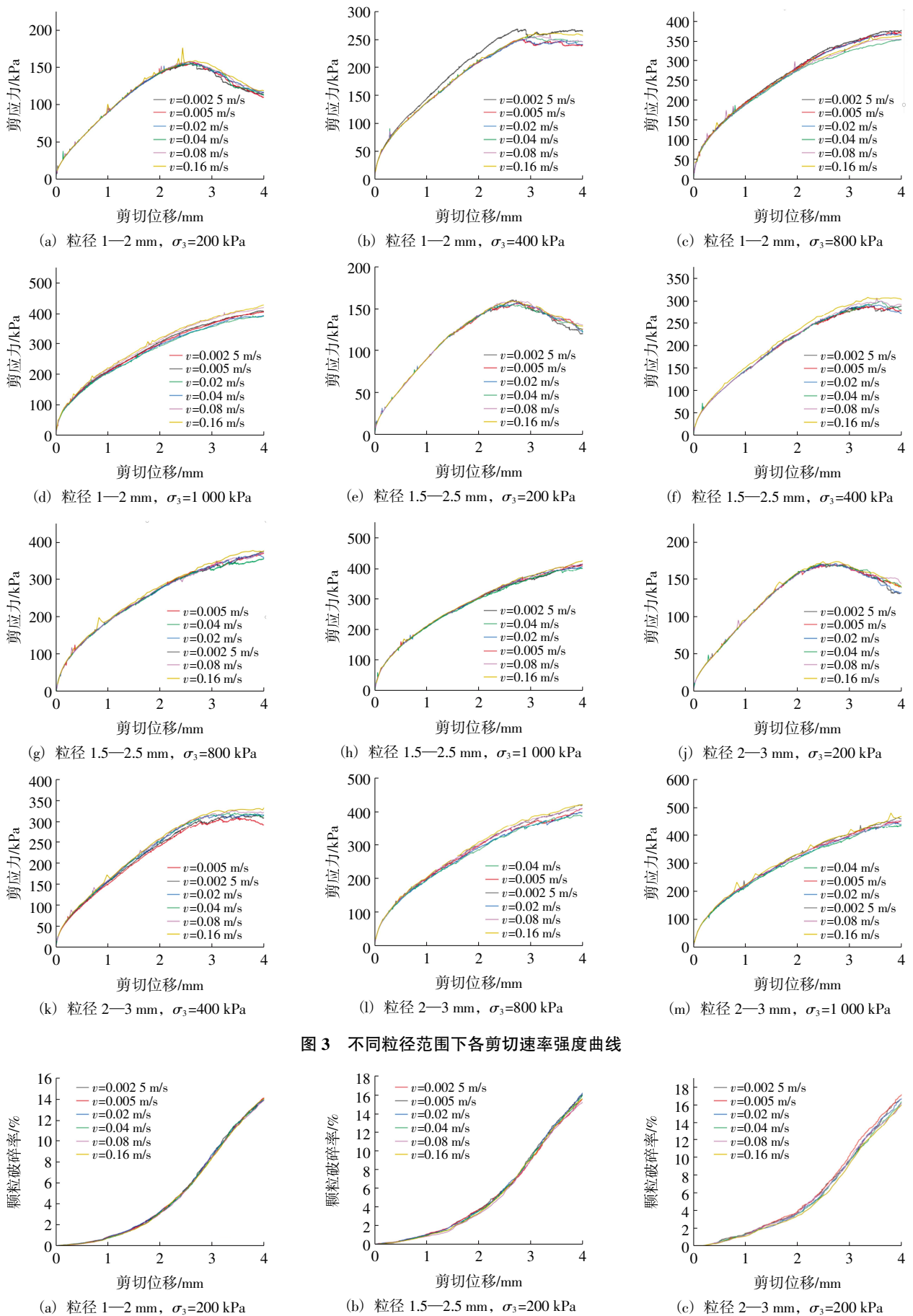


图 3 不同粒径范围下各剪切速率强度曲线

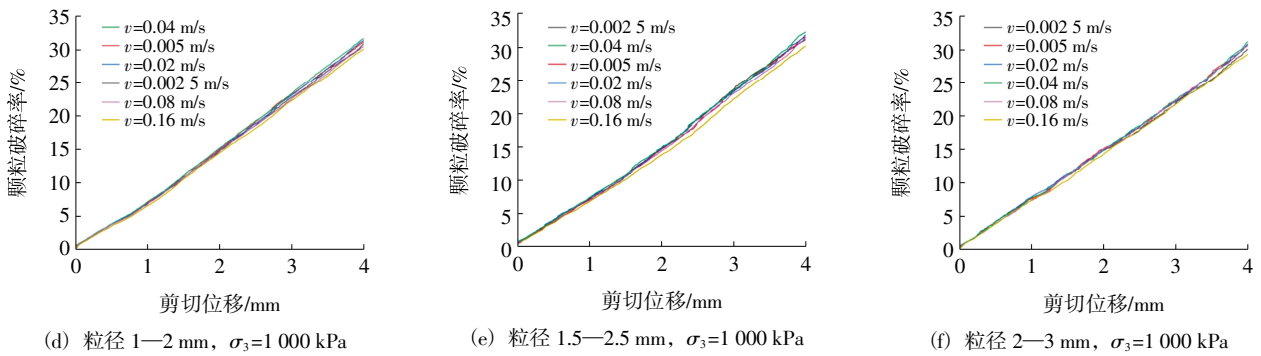


图4 不同粒径范围条件下各剪切速率颗粒破碎率曲线

这种差异源于小粒径颗粒分布均匀且接触紧密，而大粒径颗粒形态复杂且分布不均。结果表明，粒径范围会显著影响破碎发展过程，其中增大粒径范围会加剧颗粒破碎，这是因为大颗粒间接触应力集中所导致的局部破碎效应。

不同粒径范围下各剪切速率曲线如图5所示。

在固定法向应力条件下，破碎率随粒径增大而升高，这主要源于大颗粒更易发生破碎的特性。需要注意的是，破碎行为的速率敏感性表现出明显差异：小粒径试样在所有应力水平下均表现出明显的速率效应，而大粒径试样仅在高应力下才对速率变化敏感。

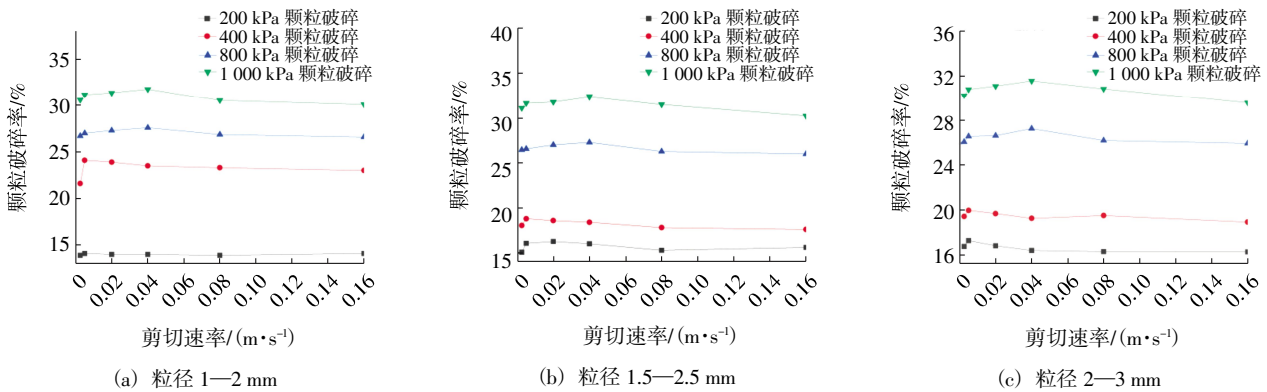


图5 不同粒径范围下各剪切速率曲线

4 粒径与剪切速率的交互作用对钙质砂微观特性的影响

4.1 力链率特征

力链是离散元模拟中颗粒间接触力的传递路径，由一系列接触颗粒通过接触力连接形成的链式结构，反映颗粒体系的应力传递与承载机制。

400 kPa 和 1 000 kPa 法向应力条件下不同粒径范围的力链数目如图6所示。对于1—2 mm 粒径组，当剪切速率为0.02 m/s 时，力链总数从400 kPa 时的162 489 显著增至1 000 kPa 时的171 608，增幅达5.6%；而2—3 mm 粒径组在相同围压范围内的力链数增幅为5.0%。这种粒径依赖性特征与颗粒接触概率直接相关，小粒径组单位体积接触点数可达大粒径组的4.27 倍，导致其力链网络更为致

密。力链数目总体随法向应力增加而显著增多；而在相同法向应力下，较大粒径试样中的力链数目则明显减少。

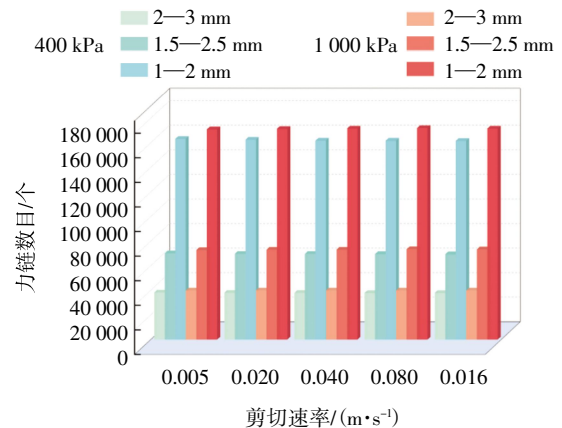


图6 不同粒径范围下力链数目

剪切速率对力链数目的影响以1—2 mm 粒径组

为例, 在 400 kPa 与 1 000 kPa 围压下, 在剪切速率从 0.02 m/s 增至 0.16 m/s 时, 力链总数分别减少 0.55% 和 0.03%; 类似地, 2—3 mm 粒径组在 400 kPa 与 1 000 kPa 时速率变化引起的力链数波动为 -0.64% 与 -0.39%。数据表明剪切速率变化导致的力链总数变化始终小于 1%, 远小于围压改变产生的增幅。

图 7 为不同粒径范围下试样力链分布图, 图中深蓝色代表强力链 (承担主要荷载), 浅绿色代表弱力链 (荷载传递贡献较小)。法向应力为 400 kPa 时, 试样内部力链网络呈现疏松分布特征, 尤其在

左上至右下区域存在显著空白区; 当法向应力增至 1 000 kPa 后, 力链密度明显提高, 空白区域被完全填充, 同时强力链 (深蓝色) 和弱力链 (浅绿色) 数量同步增加。粒径效应表现为: 较小粒径试样中强力链占主导地位, 力链网络更加致密。不同剪切速率下的力链网络均表现出相似的空间分布特征: 右上至左下区域形成密集的力链网络, 承担主要荷载传递功能; 而左上至右下区域的力链分布则相对稀疏, 荷载传递贡献较小。

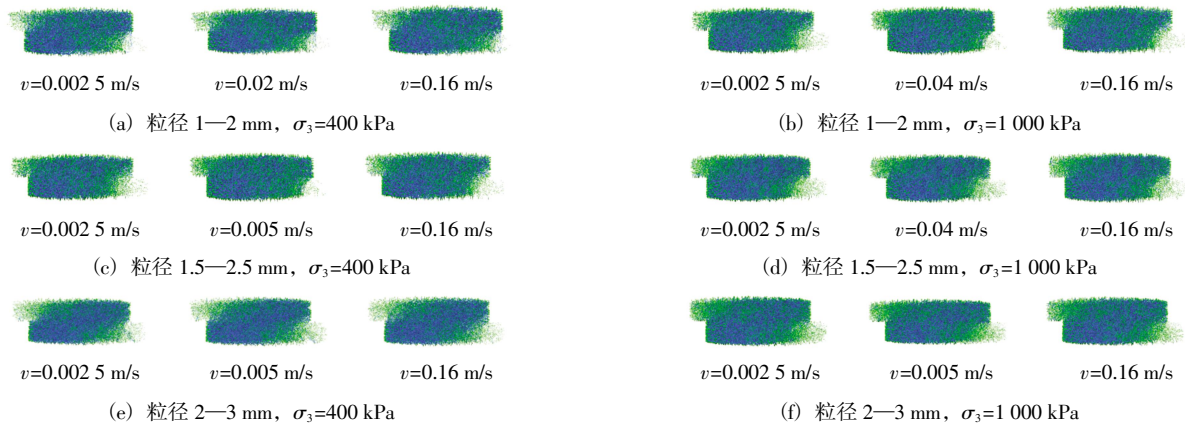


图 7 不同粒径范围下试样力链分布

4.2 颗粒破碎分布与破碎数目的率特征

不同粒径范围的黏结数目如图 8 所示。对于 1—2 mm 粒径组, 当剪切速率为 0.02 m/s 时, 黏结数目从 400 kPa 时的 30 308 显著增至 1 000 kPa 时的 38 839, 增幅达 28.1%; 而 2—3 mm 粒径组在相同法向应力范围内的黏结数增幅为 54.1%。这种粒径依赖性特征与颗粒接触应力分布直接相关, 小粒径组单位体积接触应力集中度可达大粒径组的 3.2

倍, 导致其黏结破碎更为显著。黏结数目总体随法向应力增加而呈指数增长; 而在相同法向应力下, 较大粒径试样中的黏结数目则明显减少, 2—3 mm 组在 1 000 kPa 时的黏结数仅为 1—2 mm 组的 22.8%。

剪切速率对黏结数目的影响表现为: 以 1—2 mm 粒径组为例, 在 400 kPa 围压下, 剪切速率从 0.02 m/s 增至 0.16 m/s 时, 黏结数目减少 2.0%; 1 000 kPa 时降幅为 1.2%。类似地, 2—3 mm 粒径组在相同速率变化下, 400 kPa 与 1 000 kPa 围压时的黏结数波动分别为 -2.8% 与 -4.0%。当剪切速率超过 0.04 m/s 后, 各粒径组的黏结数变化率均趋于稳定 (小于 3%), 存在明显的临界速率效应。

颗粒破碎的空间分布通过单位体积内黏结键破碎的数目 (即破碎键的空间密度) 来量化, 该物理量能够直观反映试样内部损伤与能量耗散的分布, 其分布特征如图 9 所示。分析可知, 在低法向应力条件下, 破碎区域表现出明显的空间选择性, 高破碎密度区主要集中于试样中部及右上-左下对角线区域, 而左上-右下边缘区域则保持相对完整的低

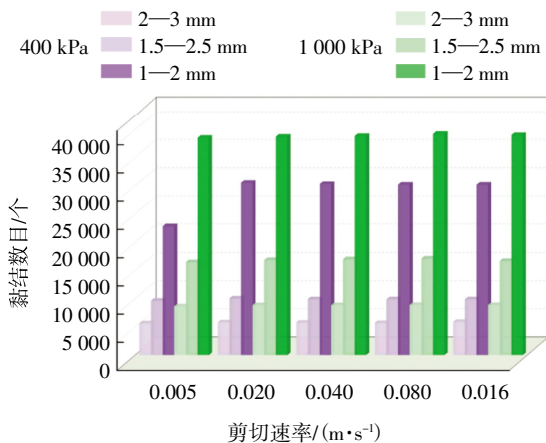


图 8 不同粒径范围下黏结数目

密度状态。随着法向应力增至 1 000 kPa 以上，高破碎密度区域呈现明显的扩展趋势，最终均匀分布于整个试样范围，其分布均匀性得到显著提升。通

过高破碎密度区域（图 9 中深蓝色区域）占比的显著增加可知，较小粒径组具有更强的破碎程度，进一步验证了粒径对破碎行为的调控作用。

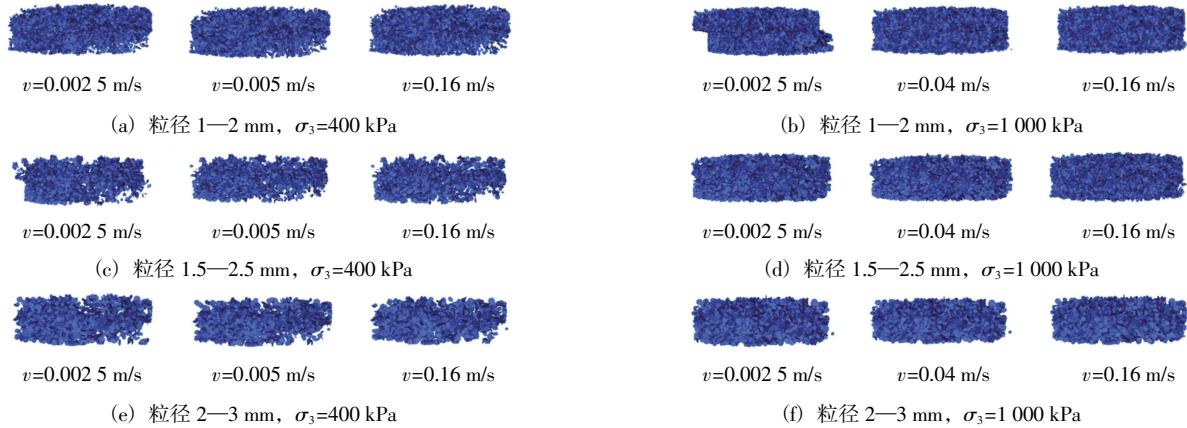


图 9 不同粒径范围下试样颗粒破碎分布

4.2 配位数率特征

配位数作为表征颗粒材料微观结构的重要参数，反映了试样内部颗粒接触状态的空间分布特征，对于揭示剪切过程中的力学响应机制具有关键作用。本文主要分析 400 kPa 和 1 000 kPa 两种典型工况下试样整体平均配位数的演变规律。配位数的计算公式如下。

$$C_N = \frac{\sum N_{ci}}{n} \quad (2)$$

式中， C_N 为颗粒配位数； $\sum N_{ci}$ 为每个颗粒的接触数量总和； n 为颗粒的总数。

图 10 展示了不同条件下试样的配位数演化规律。结果表明，配位数受法向应力、粒径及剪切速率的共同影响。在给定粒径范围内，低法向应力下的配位数始终低于高法向应力条件，且前者在剪切过程中呈现先增后减的趋势，反映颗粒接触由紧密转向松弛。

随着粒径范围扩大，配位数系统性增加，表明

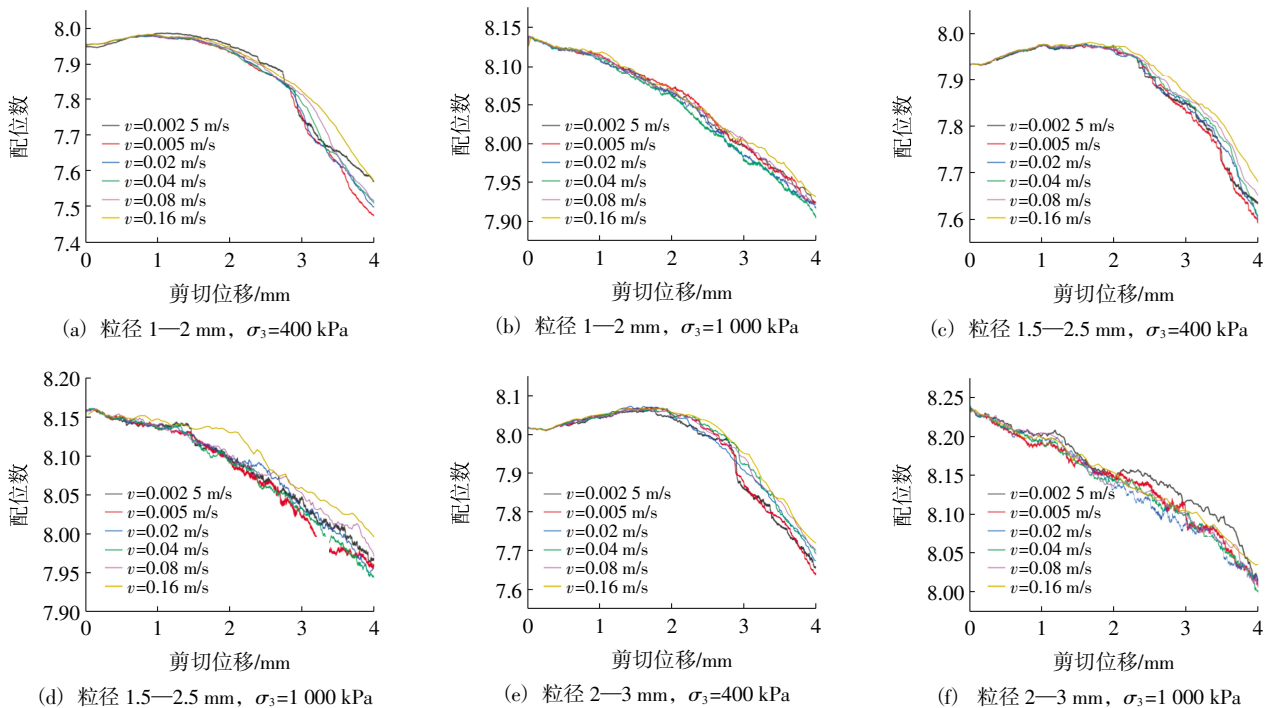


图 10 不同粒径范围下各个剪切速率配位数变化曲线

大粒径颗粒体系形成的接触网络更为稳定。剪切速率的影响则呈现非线性特征:配位数随速率增加先减后增,临界速率在低、高法向应力下分别为0.005 m/s与0.04 m/s。该现象与峰值强度变化一致,其机理可解释为:速率适度增大促使颗粒分离、接触减少;而速率进一步显著提高则强制颗粒重组,形成更紧密结构。

5 结 论

本文基于所建立的钙质砂直接剪切数值模型,系统分析了粒径范围与剪切速率对钙质砂宏观力学特性的影响,深化了对钙质砂率效应机理的认识。研究意义在于,从细观层面揭示了粒径与应力水平对临界剪切速率的调控作用,弥补了现有钙质砂率效应理论在考虑复杂粒组影响方面的不足,为构建更完善的理论体系提供了重要数值依据,对岛礁地基动力稳定性评估具有参考价值。主要研究结论如下。

(1) 钙质砂的峰值强度随粒径范围的增大而提高。低法向应力下,剪切速率对峰值强度的影响较弱;而高法向应力下,峰值强度对剪切速率的敏感性增强,呈现先降低后增加的趋势,其中400 kPa下的临界剪切速率为0.005 m/s,800 kPa和1 000 kPa

下则为0.04 m/s。

(2) 随着粒径范围的增加,颗粒破碎曲线的陡峭程度增大,破碎率在高法向应力下对剪切速率的敏感性更强,呈现先增加后降低的趋势。此外,颗粒破碎的密集程度随剪切速率的增加先增大后减小。

(3) 力链数目随着粒径减小显著增长,1—2 mm粒径组的力链数目达到2—3 mm组的4.27倍,同时高法向应力1 000 kPa工况下力链网络数目提升5.0%—5.6%。细观分析表明,颗粒黏结破碎程度与粒径范围呈正相关关系,当剪切速率超过0.04 m/s后,各粒径组的黏结数变化率均趋于稳定(小于3%)。

(4) 不同剪切速率下的力链分布模式相似,均表现为右上至左下方向密集、左上至右下方向稀疏,且力链数目变化始终小于1%。颗粒配位数与粒径范围成正比,并随剪切速率的增加呈现先减小后增大的趋势,反映剪切过程中颗粒接触结构的动态调整。

本文主要聚焦于单调直剪工况,未考虑循环荷载等复杂路径下的力学行为;同时,模型对颗粒形状的模拟虽优于球体,但与真实形态仍存在差异。后续研究可进一步引入真实三维形态重建技术,并拓展至循环剪切、动静组合加载等更广泛的应力路径,以更全面地揭示钙质砂的动力演化机理。

参考文献:

- [1] 陈庆,高燕,袁泉,等.密实砂土剪切过程中的微观结构响应[J].水利水电技术(中英文),2021,52(6):178-187.
- [2] 朱长歧,陈海洋,孟庆山,等.钙质砂颗粒内孔隙的结构特征分析[J].岩土力学,2014,35(7):1831-1836.
- [3] 何建乔,魏厚振,孟庆山,等.大位移剪切下钙质砂破碎演化特性[J].岩土力学,2018,39(1):165-172.
- [4] 袁征,余克服,王英辉,等.珊瑚礁岩土的工程地质特性研究进展[J].热带地理,2016,36(1):87-93.
- [5] 陈海洋,汪稔,李建国,等.钙质砂颗粒的形状分析[J].岩土力学,2005,26(9):1389-1392.
- [6] 王步雪岩,孟庆山,韦昌富,等.多投影面下珊瑚砂砾颗粒形貌量化试验研究[J].岩土力学,2019,40(10):3871-3878.
- [7] 马林.钙质土的剪切特性试验研究[J].岩土力学,2016,37(S1):309-316.
- [8] 黄宏翔,陈育民,王建平,等.钙质砂抗剪强度特性的环剪试验[J].岩土力学,2018,39(6):2082-2088.
- [9] 柴维.直剪剪切速率对钙质砂强度及变形特征的影响试验研究[D].湘潭:湘潭大学,2019.
- [10] 张家铭,汪稔,石祥锋,等.侧限条件下钙质砂压缩和破碎特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(18):3327-3331.
- [11] 程壮,侯敏,王剑锋.考虑颗粒形状和破碎的胶结钙质砂力学行为离散元模拟研究[J].计算力学学报,2022,39(3):315-323.
- [12] 肖建章,马妍祎,周杰,等.基于PFC^{2D}的土石混合料剪切强度数值模拟分析[J].岩土工程学报,2020,42(S2):123-128.
- [13] 韩洪兴,陈伟,邱子锋,等.考虑破碎的堆石料二维颗粒流数值模拟[J].岩土工程学报,2016,38(S2):234-239.

- [14] 黄世涛. 基于 PFC3D 的砂土线性模型细观参数敏感性研究[J]. 四川水泥, 2023, 3: 30–32.
- [15] 程威顺, 余方威, 雷震. 基于离散元法的岩石颗粒破碎宏观力学行为研究[J]. 工程地质学报, 2024, 32(6): 2130–2142.
- [16] 胡小荣, 路祥, 王攀, 等. 基于 PFC3D 的超固结非饱和黏性土力学特性分析[J]. 应用力学学报, 2025, 42(3): 566–579.
- [17] 王刚, 查京京, 魏星. 循环三轴应力路径下钙质砂颗粒破碎演化规律[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 755–760.
- [18] 王刚, 杨俊杰, 王兆南. 钙质砂临界状态随颗粒破碎演化规律分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(8): 1511–1517.
- [19] 高雪, 高燕, 孙可天, 等. 剪切过程中钙质砂的颗粒破碎与能量演化[J]. 中山大学学报 (自然科学版) (中英文), 2023, 62(6): 11–21.
- [20] 王青, 侯贺营, 康鑫睿, 等. 直剪条件下钙质砂强度及颗粒破碎[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(15): 6240–6247.

DEM-Based Direct Shear Test on Calcareous Sand: Study on Rate Effects of Particle Size Range and Breakage Ratio

YANG Xiaofei^{1,2,3}, YI Kai⁴, LEI Yuheng⁴, XU Shilin⁵

(1. Shandong Geophysical and Geochemical Exploration Institute, Jinan 250013, China; 2. Shandong Provincial Engineering Research Center for Geological Prospecting, Jinan 250013, China; 3. Shandong Engineering Research Center for High Precision Detection of Underground Resources and Environment, Jinan 250013, China; 4. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266404, China; 5. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The mechanical behavior of calcareous sand is significantly governed by its complex particle morphology and fragmentation characteristics, which traditional spherical particle models struggle to accurately simulate. To address this limitation, this study innovatively establishes a 3D discrete element direct shear model for crushable calcareous sand based on a multi-sphere aggregation algorithm and a parallel bond model, enabling high-fidelity simulation of realistic particle morphology and crushing behavior. The influence of particle size range and shear rate on macro- and meso-mechanical properties was systematically investigated. Results show that under high normal stress, rate dependence exhibits a decreasing-then-increasing trend with increasing particle size, while the critical shear rate rises from 0.005 m/s to 0.04 m/s. At the meso-level, the study reveals a positive correlation between particle breakage ratio and particle size, along with a non-monotonic response of fragmentation behavior to shear rate under high stress conditions. This work systematically elucidates the influence of particle size on the rate-dependent behavior of calcareous sand, addressing a gap in current research under these specific conditions. The revealed meso-mechanisms provide crucial numerical evidence for constructing a more comprehensive theoretical framework for the rate effects in calcareous sand.

Keywords: calcareous sand; Discrete Element Method; particle breakage; direct shear test; force chain