陈嘉琪,魏婷婷,吴志坚.基于颗粒流模拟的黄土震陷变形特性研究[J].地震工程学报,2026,48(5):1136-1145.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250207001
CHEN Jiaqi, WEI Tingting, WU Zhijian. Particle flow simulation of seismic subsidence deformation characteristics in loess[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2026, 48(5): 1136-1145. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20250207001

基于颗粒流模拟的黄土震陷变形特性研究

陈嘉琪[1], 魏婷婷[1,2], 吴志坚[1,2]
(1. 南京工业大学 交通运输工程学院,江苏 南京 211816;
2. 江苏省交通基础设施安全保障技术工程研究中心,江苏 南京 211816)

摘要:利用PFC3D颗粒流模拟方法,结合室内动三轴试验,建立黄土动三轴试验模型。基于接触黏结强度、刚度比及摩擦系数的敏感性分析,确定数值试样的细观参数,并通过对比室内试验与数值模拟的震陷曲线,验证黄土数值模型的有效性。从应力场、位移场和旋转场三个角度,研究黄土在动力加载条件下的震陷变形特性。结果表明:黄土试样的抗震变形能力与接触黏结强度、摩擦系数呈正相关,与刚度比呈负相关;随着围压增加,试样的震陷系数减小,轴向累积应变的收敛趋势更稳定,细观上表现为颗粒间接触力增大,颗粒位移量及旋转量减小;随着动应力幅值增加,试样的轴向累积应变增大,颗粒间弱胶结发生破坏,导致接触力先增后减,颗粒位移量及旋转量相应增加。

关键词:黄土;颗粒流模拟;震陷系数;动三轴试验;敏感性分析
中图分类号:TU444 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)05-1136-10
DOI:10.20000/j.1000-0844.20250207001

Particle flow simulation of seismic subsidence deformation characteristics in loess

CHEN Jiaqi[1], WEI Tingting[1,2], WU Zhijian[1,2]
(*1.College of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu, China;*
2.Jiangsu Province Engineering Research Center of Transportation Infrastructure Security Technology, Nanjing 211816, Jiangsu, China)

Abstract: This study developed a dynamic triaxial test model for loess using the PFC3D particle flow simulation method in conjunction with laboratory dynamic triaxial tests. Through sensitivity analysis of contact bond strength, stiffness ratio, and friction coefficient, the mesoscopic parameters of the numerical specimen were calibrated. The validity of the numerical model was verified by comparing seismic subsidence curves from laboratory tests and numerical simulations. The seismic subsidence characteristics of loess under dynamic loading were then investigated from three perspectives: stress

收稿日期:2025-02-07
基金项目:国家自然科学基金(42330704,42102305)
第一作者简介:陈嘉琪(2000-),女,硕士研究生,主要从事工程地质与颗粒流模拟领域研究。Email:19883114213@163.com。
通信作者:吴志坚(1974-),男,教授,博士生导师,主要从事工程地质与岩土工程防灾减灾领域研究。Email:zhijian@njtech edu.cn。

field, displacement field, and rotation field. The results indicate that seismic deformation resistance of loess specimens is positively correlated with contact bond strength and friction coefficient, and negatively correlated with stiffness ratio. With increasing confining pressure, the seismic subsidence coefficient decreases, and the convergence of axial cumulative strain becomes more stable, which is microscopically manifested as increased interparticle contact forces accompanied by decreased particle displacement and rotation. With increasing dynamic stress amplitude, the axial cumulative strain increases and weak interparticle bonds sustain damage, causing the contact force to first increase and then decrease, while particle displacement and rotation increase correspondingly.

Keywords: loess; particle flow simulation; seismic subsidence coefficient; dynamic triaxial test; sensitivity analysis

0　引言

黄土作为一种大孔隙、弱胶结的第四纪松散堆积物，广泛分布于中国的陕甘宁等地区，震陷性是其最典型的灾害特征之一[1-2]。目前，黄土震陷变形特性的研究主要集中在室内试验方面，但其可重复性较差，难以进行大量系统性试验，制约了黄土宏微观力学性质研究的深入。近年来，随着数值模拟技术的迅速发展，离散元模拟法具备了良好的可重复性，且可在任意时刻直观地观察到任意位置土体颗粒在加载过程中的力学状态和运动变化，在揭示土体颗粒细观作用机理方面具有独特优势[3]。因此，离散元模拟法为探究黄土震陷变形过程中的微观结构变化、揭示其动力变形的细观机理提供了有效途径。

目前，已有学者基于离散元模拟软件对不同类型土体的细观结构变化进行研究，验证了离散元法模拟土体工程特性的可靠性[4]。在黏性土宏细观特性研究方面，李识博等[5]建立了黄土三轴剪切数值模型，发现模拟结果与室内试验具有相似性，且随着围压增大，试样剪切破坏所需应变能增大，试样更不易发生剪切破坏；赵州等[6]通过离散元方法对不同形态的软黏土试样进行三轴压缩模拟试验，揭示了不同形态颗粒对软黏土宏观力学性质和微观特性的影响。除常规的三轴压缩试验外，有学者通过双轴压缩模拟试验，从颗粒层面研究黏性土的力学性质，探讨刚度比、摩擦系数、粒径分布、孔隙度、配位数及颗粒间力链分布对土体黏结强度和变形规律的影响[7-8]。在无黏性土研究方面，有学者通过室内三轴颗粒流模拟试验，探究颗粒形状、颗粒级配、密实度及孔隙率等微观参数对土体压缩与剪切特性的影响，结果显示：颗粒形状和密实度影响剪切带的形成与发展[9]；颗粒级配对粗粒土力学特性影响显著[10]；孔隙和配位数对体积变形有显著影响[11]。在土石混合体力学特性研究方面，赵金凤等[12]通过建立土石混合体直剪模型，发现土体抗剪强度随接触黏结强度的增加而增大；丁秀丽等[13]利用均质土体和土石混合体的双轴压缩数值模型，发现土石混合体的应力-应变曲线呈阶梯状分布，破坏面多出现在大块石表面且形态不规则；金磊等[14]对不同含石量土石混合体模型的研究表明，随着含石量增加，剪切带内土颗粒旋转量增大，而块石颗粒旋转量相对较小。

目前，PFC3D 软件已应用于黄土压缩试验、直剪试验和三轴剪切试验等数值模拟中。通过对比数值模拟结果与室内试验数据，数值模型的可行性得到验证，黄土细观层面的变化规律也得到进一步研究。然而，针对黄土动三轴试验的数值模拟研究仍较少，从颗粒层面系统分析黄土震陷变形特性的研究尚显不足。为此，本文根据室内动三轴试验，选取合理的细观参数建立黄土数值计算模型，将细观参数与数值试样的震陷变形特性相结合，从细观层面探讨黄土的震陷变形特性。

1　试验材料与模拟方案

1.1　试验材料

兰州新区地处黄土高原的西北部，是青藏高原、蒙古高原和黄土高原的交汇点，亦是南北地震带与祁连山地震带的复合区域，属典型的黄土高原丘陵地貌，区内发育平川、梁峁、沟壑及河谷等多种地貌特征。该区为Ⅷ度高烈度设防区，设计基本地震加速度值为 0.20g。覆盖层土体主要由晚更新世(Q_3)黄土构成[15]。试验所用土样为Q_3黄土，取自区内黄土剖面，取样深度为 5 m。试样为边长 20 cm 的

立方体，其天然含水量为2.2%，干密度为1.33 g/cm³，天然密度为2.71 g/cm³，孔隙度为0.51，液限为29%，塑限为20.73%。采用筛分法和密度计法，测得黄土颗粒级配曲线如图1所示。

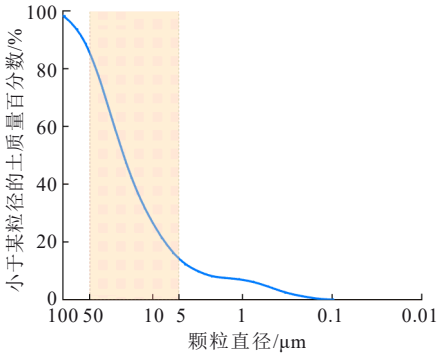


图1 兰州Q_3黄土颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of Lanzhou Q_3 loess

1.2 数值模拟方案

参照已有研究[16-19]，本文采用平行黏结模型进行数值模拟。该模型基于力-位移法，通过接触刚度建立接触力与相对位移的关系。颗粒间接触力可以表示为：

$$F_i = F_n + F_s \tag{1}$$

式中：F_i为作用在第i个接触点的合力；F_n为法向接触力；F_s为切向接触力。其中，F_n和F_s分别表示为：

$$F_n = K_n U_n \tag{2}$$

$$F_s = K_s U_s \tag{3}$$

式中：K_n、K_s分别为颗粒的法向接触刚度和切向接触刚度；U_n为瞬时状态下颗粒间法向相对嵌入量（重叠量）；U_s为切向位移增量。

计算过程中，在PFC3D软件中基于牛顿第二定律和力-位移法则交替求解：前者作用于单个颗粒，以判定其运动状态；后者应用于颗粒间接触，以实现颗粒间接触力的迭代更新。

由图1可知，天然黄土的粒径分布范围为0.1～100 μm，其中大多数集中于5～50 μm，该粒组构成了黄土的主要骨架，是黄土微观结构的重要组成部分。为兼顾计算效率和颗粒表征精度，采用1 000倍的粒径放大比例，将5～50 μm的颗粒等效为5～50 mm的模型颗粒，在直径39.1 mm、高80 mm的圆柱空间内生成2 549个球形颗粒，如图2所示。模型采用刚性墙体边界条件，顶部和底部为可移动刚性加载板。轴向加载采用应力控制模式，通过动态调节墙体速度在上下边界施加正弦波循环荷载；侧向采用伺服控制的圆柱形刚性墙体边界，通过实时调节墙体位置维持恒定围压。墙体与颗粒的接触摩擦系数设为0.5，允许颗粒滑动和自由转动。

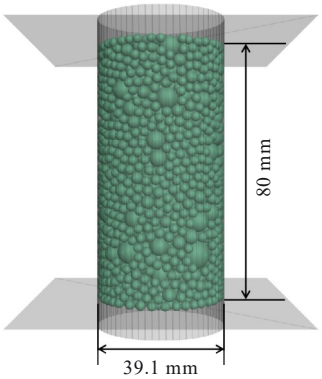


图2 颗粒流模型图

Fig. 2 Particle flow model diagram

在黄土震陷变形研究中，震陷系数δ是表征土体在动荷载作用下累积塑性变形能力的关键指标，其表达式为：

$$\delta = \frac{H - H_0}{H} \tag{4}$$

式中：H为加载后的试样高度；H_0为初始试样高度。

加载围压分别设置为100、150及200 kPa，输入与室内试验一致的正弦波循环荷载，每级荷载振动20次，以轴向应变达3%作为破坏判别标准。颗粒的移动和旋转会影响黄土试样的变形，因此，试验过程中记录不同动应力幅值下颗粒的力链、位移、旋转等参数变化规律，以揭示黄土微观结构的动力变形响应特征。需要指出的是，本文假设所有颗粒为理想球形，这在一定程度上简化了颗粒间的咬合效应和力链结构。但由于黄土震陷的核心机制是颗粒间联结破坏和孔隙塌陷，而非颗粒咬合[20]，因此该简化适用于本研究。

2 细观参数标定

2.1 细观参数敏感度分析

在颗粒流模拟中，细观参数的合理选取是准确反映材料宏观力学特性的关键[21]。黄土作为一种结构性土，其抗震变形能力主要取决于颗粒间黏结力、摩擦力和咬合力。本文采用控制变量法，开展黄土动三轴试验模拟过程中接触黏结强度、摩擦系数、刚度比等细观参数的敏感性分析，探讨细观参数变化对试样震陷变形的影响规律。

2.1.1　接触黏结强度

土体的组成是影响其抗震变形能力的基础因素。黄土属于黏性土，其黏性矿物在颗粒间形成了一定的胶结作用，对其抗震变形能力产生了显著影响[22]。因此，在PFC3D建模中，采用法向黏结强度（*NS*）和切向黏结强度（*SS*）来表征颗粒间的胶结作用。本文在围压200 kPa下，按固定比例调节法向与切向黏结强度，探究接触黏结强度和震陷系数之间的内在联系。

图3为不同黏结强度下动三轴模拟所得震陷曲线，其变化趋势基本一致：随着黏结强度增大，试样的抗震变形能力增强，震陷系数逐渐减小。保持*NS*与*SS*的比例为1∶2，施加相同的动应力幅值（65 kPa）。以 $NS=0.5\times10^4$ N/m、$SS=1.0\times10^4$ N/m 所对应试样的震陷系数（2.04%）为基准，随接触黏结强度增大，其余三组试样的震陷系数分别减小了3.27%、4.69% 和 9.60%，表明试样的抗震变形能力有小幅提升。可见，黏结强度对数值试样的破坏程度有一定影响。在颗粒流模拟中，增加接触黏结强度对应于室内试验中胶结作用增强，可使颗粒间黏结效果更加显著，从而提升试样的抗震变形能力并降低其震陷系数。这与现有研究的实验结果相互印证[23]。

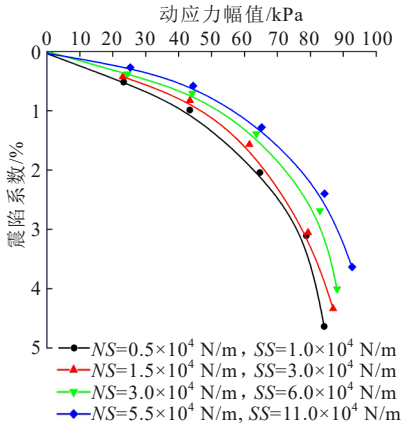


图3　不同黏结强度下动三轴模拟震陷曲线

Fig. 3　Seismic subsidence curves from dynamic triaxial numerical simulation under different bond strengths

2.1.2　摩擦系数

摩擦系数μ反映了颗粒间相对运动的阻尼特性。在围压200 kPa条件下，分别设置摩擦系数的值为0.15、0.3、0.6、0.9，得到不同动应力幅值作用下数值试样的震陷系数，以进一步探究摩擦系数和震陷系数之间的关系。

图4为不同摩擦系数下动三轴数值模拟所得震陷曲线。不难看出，在同一动应力幅值作用下，随着摩擦系数增大，数值试样的震陷系数明显减小。这一现象可解释为：在相同围压下，数值试样加载过程中，若颗粒间转动幅度或剪切应力超出临界值，导致黏结结构发生破坏，则颗粒间的残余力主要受摩擦系数影响[24]。随着摩擦系数增大，颗粒间错动和滑移的摩擦强度增加，促使颗粒间发生运动所需的外部荷载增加，进而提升了试样的整体抗震变形能力。

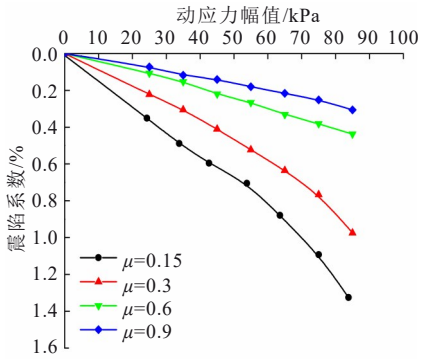


图4　不同摩擦系数下动三轴数值模拟震陷曲线

Fig. 4　Seismic subsidence curves from dynamic triaxial numerical simulation under different friction coefficients

在相同的动应力幅值（65 kPa）条件下，当摩擦系数由0.15增至0.3、0.6、0.9时，对应的震陷系数由0.88%分别降至0.63%、0.27%、0.18%，减小幅度分别为28%、69%、79%。由此可见，摩擦系数对试样的震陷系数影响较大；随着摩擦系数增大，试样的震陷系数显著减小。

2.1.3　刚度比

刚度比（k_n/k_s）定义为颗粒的法向刚度和切向刚度之比，反映了试样抵抗法向和切向变形的能力。保持颗粒的法向刚度不变，分别设置刚度比为2、4、6、8，在200 kPa围压作用下，得到黄土震陷系数随动应力的变化曲线，如图5所示。由图可知，在同一动应力幅值下，震陷系数随刚度比增大逐渐增加。在同一动应力幅值（65 kPa）条件下，保持颗粒法向刚度不变，当刚度比由2增至4、6、8时，对应数值试样的震陷系数由0.87%分别增至1.71%、1.93%、2.96%，增幅分别为0.96、1.21、2.41倍。这是因为保持法向刚度不变时，颗粒的切向刚度随刚度比增大而减小，导致颗粒抵抗剪切变形的能力减弱，从而使得试样整体抗剪能力整体降低，震陷系数增大。

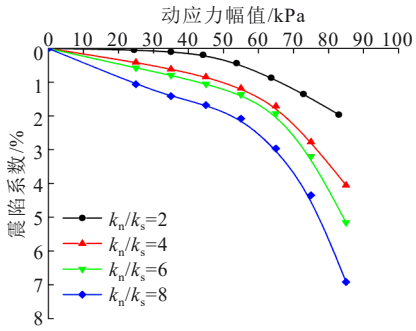


图 5 不同刚度比下动三轴数值模拟震陷曲线

Fig. 5 Seismic subsidence curves from dynamic triaxial numerical simulation under different stiffness ratios

表 1 黄土动三轴试验数值模型颗粒细观参数

Table 1 Mesoscopic parameters of the numerical model for dynamic triaxial test of loess

参数	数值
颗粒密度/(kg/m^3)	2 500
初始孔隙率	0.51
摩擦系数	0.15
阻尼比	0.7
刚度比	2
法向刚度/(N/m)	6.5×10^8
切向刚度/(N/m)	3.3×10^8
法向黏结强度/(N/m)	3×10^4
切向黏结强度/(N/m)	3×10^4

2.2 模拟结果与试验结果对比

为验证黄土试样颗粒流计算模型的可靠性，采用英国GDS动三轴仪对试样进行室内动三轴试验，获得数值模拟相同条件下黄土试样的震陷曲线。在此基础上，采用试错法并结合细观参数的敏感性分析，参考黄土数值模拟相关建模经验[25]，对细观参数进行标定，结果列于表1。

室内试验和模拟结果的对比如图6所示。由图可知，二者所得震陷曲线变化趋势基本一致：(1)随动应力幅值增大，震陷系数逐渐增加；(2)在同一动应力幅值下，震陷系数随围压增大而减小。以65 kPa动应力幅值为例：围压100 kPa时，数值模拟和室内试验的震陷系数分别为3.95%和3.05%；围压150 kPa时，二者分别降至2.73%和2.01%，降幅分别为1.22%和1.04%；围压200 kPa时，二者进一步降至1.39%和0.87%，降幅分别为2.56%和2.18%。由于球形颗粒相较于不规则的真实黄土颗粒更易发生滑动，数值模拟所得震陷系数略高于室内试验结果。表2列出了相同动应力幅值(25 kPa、45 kPa、65 kPa)下室内试验和数值模拟结果的对比，二者的绝对误差小于1%，说明该数值模型可以较好地反映黄土的震陷特性。

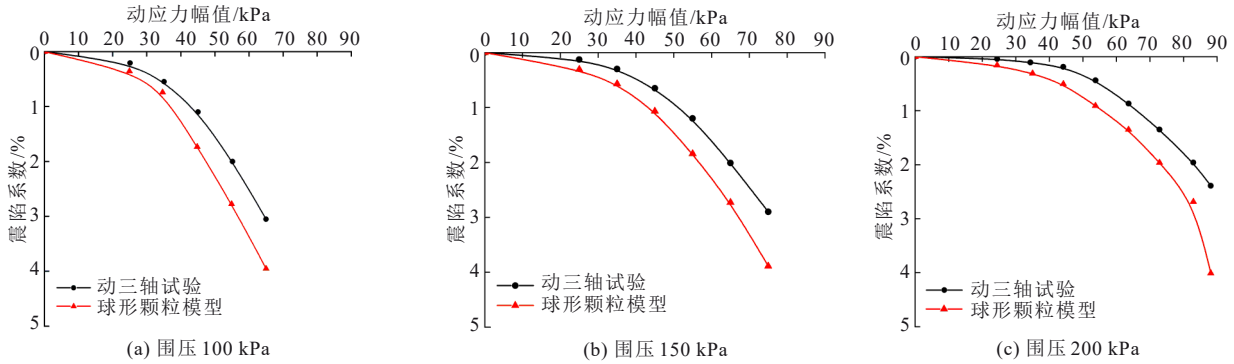


图 6 黄土动三轴试验震陷曲线与数值模拟结果对比曲线

Fig. 6 Comparison of seismic subsidence curves between dynamic triaxial test and numerical simulation of loess

3 结果分析

分析不同围压下数值试样的加载结果，包括力学性质、颗粒间力链变化、颗粒旋转和位移等参数。

3.1 宏观力学性质分析

3.1.1 震陷曲线

图7为不同围压作用下黄土试样震陷系数随动应力幅值的变化曲线。由图可知，在同一动应力幅值作用下，试样的震陷系数随围压增大而减小。在65 kPa的动应力幅值作用下，当围压由100 kPa上升到200 kPa时，试样的震陷系数由3.95%降至1.35%。这是因为围压增大使更多颗粒之间产生接触并发生摩擦，从而提高了试样整体结构强度，增强了其抵抗动应力变形的能力。因此，在循环荷载作用下，同一动应力幅值对应的震陷变形随围压增大而减小。

表 2　室内试验与数值模拟结果对比

Table 2　Comparison of results between indoor test and numerical simulation

围压/kPa	动应力幅值/kPa	震陷系数/%		绝对误差/%
		室内试验	数值模拟	
100	25	0.21	0.36	0.15
	45	1.10	1.73	0.63
	65	3.05	3.95	0.90
150	25	0.13	0.31	0.18
	45	0.65	1.07	0.42
	65	2.01	2.73	0.72
200	25	0.04	0.16	0.12
	45	0.19	0.50	0.31
	65	0.87	1.35	0.48

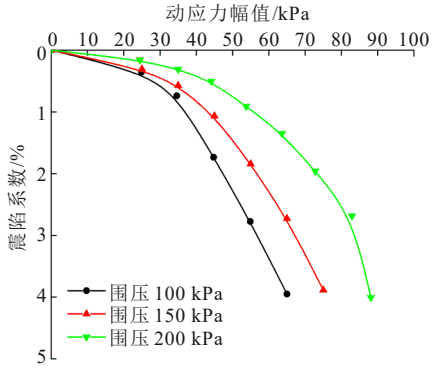


图 7　不同围压作用下黄土震陷曲线

Fig. 7　Seismic subsidence curves of loess under different confining pressures

3.1.2　轴向累积应变

图 8 为不同围压下动应力幅值对土体轴向累积应变的影响。由图可知，数值试样的轴向累积应变随循环次数增加而增大，且增长速率逐渐减小。在较高动应力幅值（65 kPa）作用下，围压越大，试样的轴向累积应变越小，且收敛更趋稳定；而在较低动应力幅值（25 kPa）作用下，围压对轴向累积应变的影响较小。

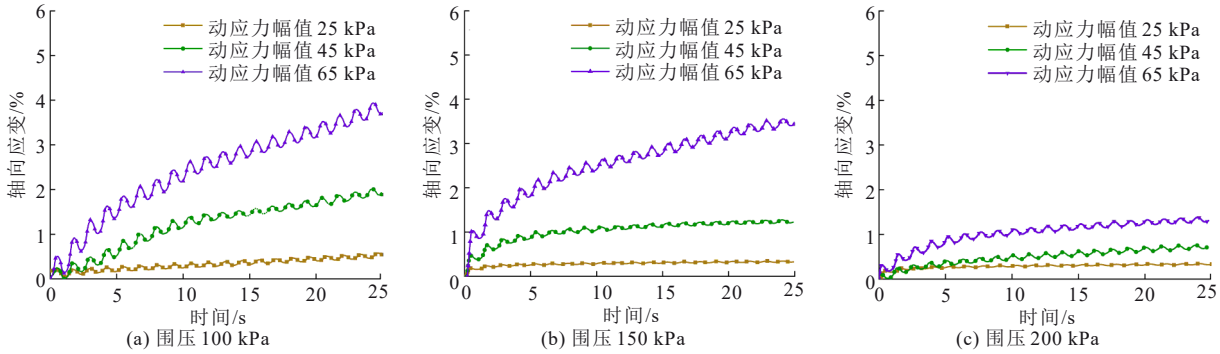


图 8　不同围压作用下黄土轴向累积应变曲线

Fig. 8　Axial cumulative strain curves of loess under different confining pressures

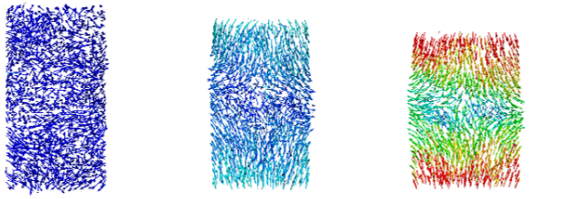
3.2　细观机理分析

利用数值模型，可以直观看到加载过程中任意时刻、任意位置颗粒的运动状态和受力特性，从而深入剖析颗粒间相互作用和宏观变形的微观机制。为研究不同围压下数值试样动力变形特性的细观特征，分别选取动应力幅值 25、45 和 65 kPa 作用下的数值模拟结果，分析试样的位移场、旋转场和应力场。

3.2.1　位移场

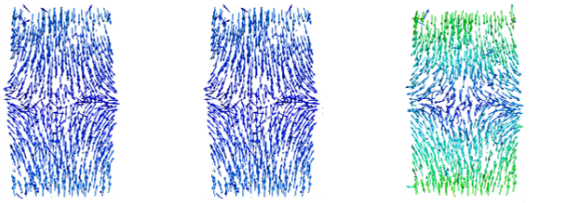
图 9 为不同围压下颗粒位移分布图。由图可知，在低围压（100 kPa）作用下，当施加较低应力幅值（25 kPa）时，颗粒呈随机排列；随动应力幅值增至 45 kPa，颗粒产生定向排列，呈现两端颗粒向中间运动、中间颗粒向外围运动的趋势。在 PFC3D 模拟中，数值试样的变形是由颗粒运动引起的：随动应力幅值增加，两端颗粒受力增大，使得试样的整体位移增大，在宏观上表现为试样被压缩；但由于阻尼系数的存在，试样中部颗粒的位移小于两端，表现出滞后性。

图 10(a)展示了在 100 kPa 围压条件下，颗粒位移量随动应力幅值变化的分布特征。由图可知，当动应力幅值从 25 kPa 增至 65 kPa 时，位移分布柱状图整体呈明显的右移趋势。在 25 kPa 动应力幅值下，颗粒位移均值为 0.53 mm，标准差为 0.06 mm，位移主要集中于 0～0.65 mm 的较小范围；而在 65 kPa 动应力幅值下，位移均值增至 4.41 mm，标准差扩大至 1.35 mm。这表明动应力幅值增大会显著促进颗粒位移，同时使位移分布范围拓宽、数据离散程度增大。图 10(b)反映了 65 kPa 动应力幅值下围压对颗粒位移的影响。由图可知，在 100 kPa 围压



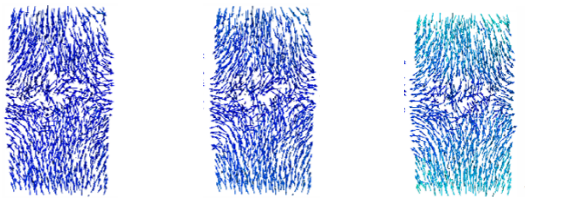
(Ⅰ)动应力幅值25 kPa (Ⅱ)动应力幅值45 kPa (Ⅲ)动应力幅值65 kPa

(a) 围压 100 kPa



(Ⅰ)动应力幅值25 kPa (Ⅱ)动应力幅值45 kPa (Ⅲ)动应力幅值65 kPa

(b) 围压 150 kPa



(Ⅰ)动应力幅值25 kPa (Ⅱ)动应力幅值45 kPa (Ⅲ)动应力幅值65 kPa

(c) 围压 200 kPa

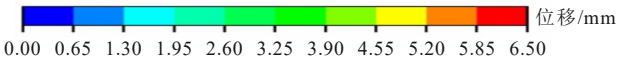
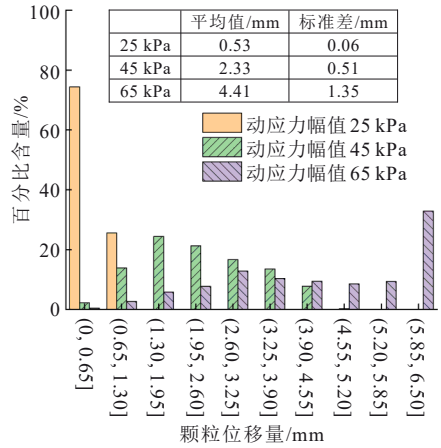
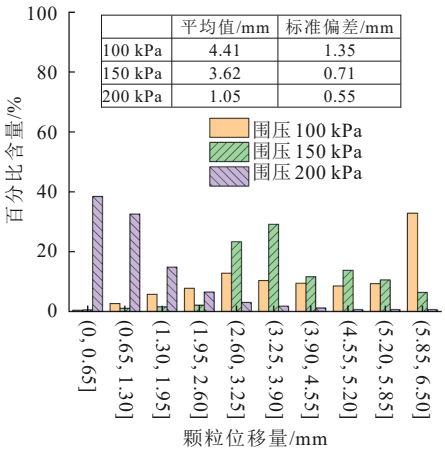


图 9 不同围压下颗粒位移示意图

Fig. 9 Diagram of particle displacement under different confining pressures



(a) 颗粒位移量随动应力幅值的变化规律



(b) 颗粒位移量随围压的变化规律

图 10 颗粒位移量变化规律

Fig. 10 Variation of particle displacement with confining pressure

下,颗粒位移均值为4.41 mm,标准差为1.35 mm;围压增至200 kPa时,位移均值减小至1.05 mm,标准差减小至0.55 mm,颗粒位移主要集中于0~1.3 mm的较小范围。这表明高围压环境能有效约束颗粒运动,同时显著降低颗粒位移的离散性。

3.2.2 旋转场

图11为不同围压下颗粒旋转分布图。由图可知,在较小动应力幅值作用下,外围颗粒发生小幅度旋转,而中部颗粒几乎不旋转;随动应力幅值增大,颗粒逐渐发生旋转,旋转范围从外边缘扩大到试样中部,且以小颗粒旋转为主。这是因为在相同旋转角度下,相较于大颗粒,小颗粒旋转所需能量更小,所以在同一能量输入下,小颗粒旋转角度更大。

图12(a)显示了在100 kPa围压下,颗粒旋转量随动应力幅值变化的规律。由图可知,随动应力增大,旋转量各柱体呈现向右推移的趋势。在25 kPa动应力幅值下,颗粒旋转量均值为0.19 rad,标准差为0.01 rad,旋转主要集中于小角度区间;而在65 kPa动应力幅值下,旋转量均值增至0.75 rad,标准差扩大至0.12 rad。这表明动应力幅值增加不仅增强了颗粒的旋转运动,同时使旋转角度的分布范围明显扩大,颗粒体系的旋转行为表现出更强的非均匀性特征。图12(b)展示了在65 kPa动应力幅值下,颗粒旋转量随围压增大的变化规律。由图可知,围压从100 kPa增至200 kPa时,颗粒旋转量呈减小趋势:在围压100 kPa时,旋转量均值为0.75 rad,标准差为0.12 rad;围压增至200 kPa时,旋转量均值降至0.2 rad,标准差降至0.02 rad。这表明围压增大能有效抑制颗粒的旋转运动,使旋转角度的分布更加集中,颗粒体系的旋转行为表现出更高的均匀性和稳定性。

3.2.3 应力场

图13为不同围压下颗粒间力链分布图。为更

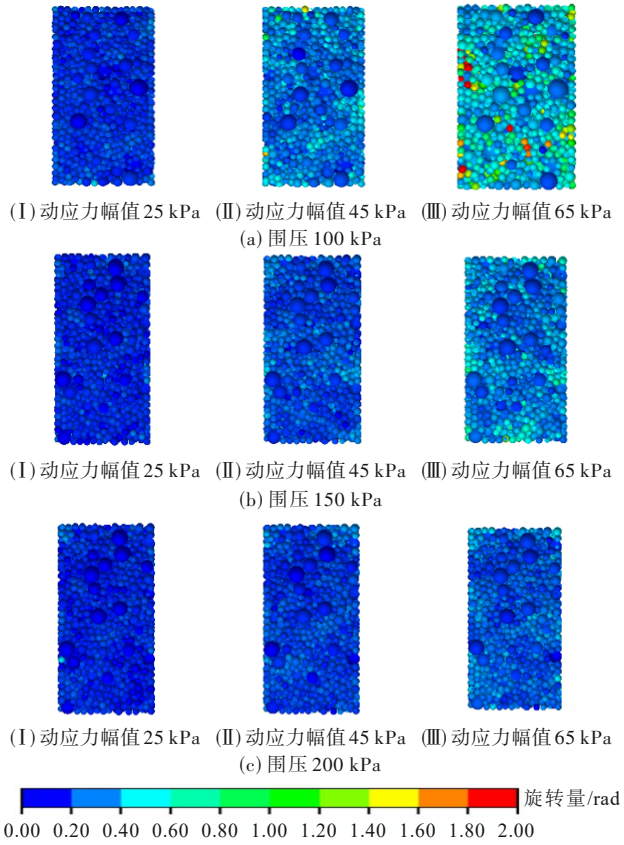


图 11　不同围压下颗粒旋转示意图

Fig. 11　Diagram of particle rotation under different confining pressures

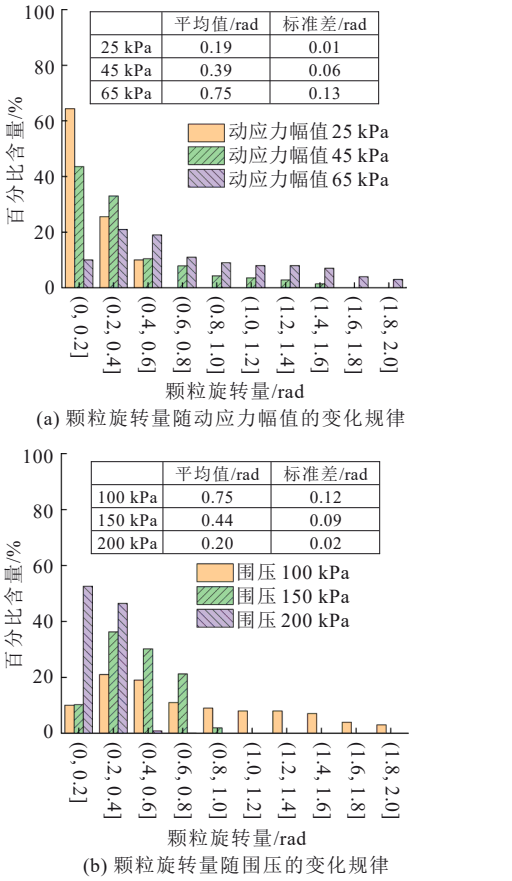


图 12　颗粒旋转量变化规律

Fig. 12　Variation of particle rotation with confining pressure

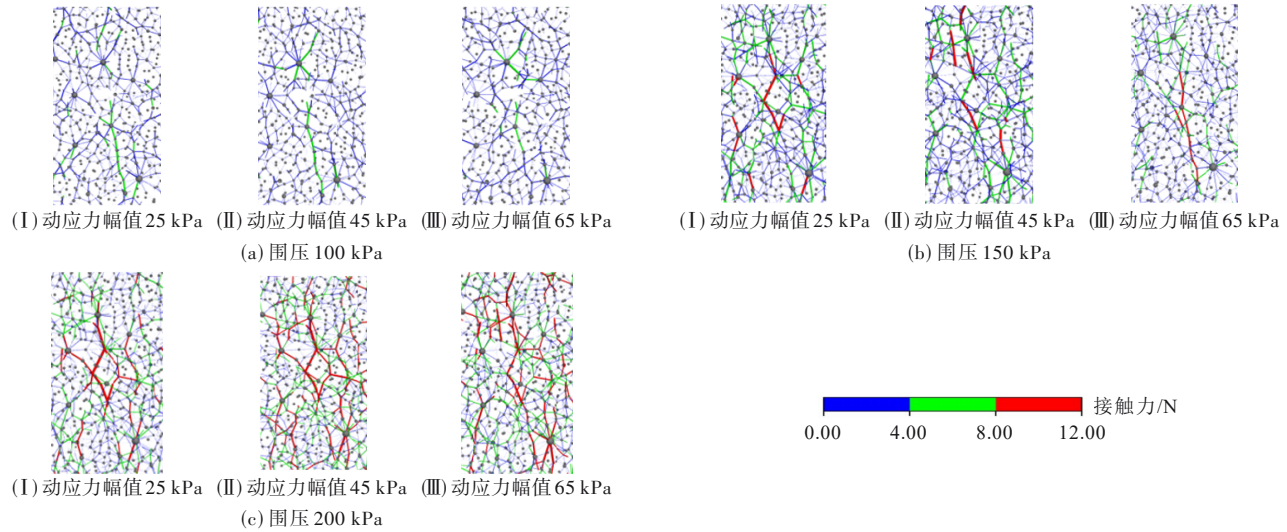


图 13　不同围压下数值颗粒间力链分布图

Fig. 13　Distribution of interparticle force chains under different confining pressures

清晰地呈现颗粒间力链分布的变化规律，将颗粒缩小为原来的0.25倍。由图可知，颗粒间接触力大小与相接触颗粒的粒径呈正相关，因此在加载过程中，较大颗粒（碎屑颗粒、团聚体）构成骨架体系，承受主要的外力作用。随动应力幅值增加，颗粒间接触力链沿主应力方向发展，其数值呈现先增大后减小的趋势。以 200 kPa 围压下的数值颗粒为例：动应力幅值 25 kPa 时，颗粒间最大接触力为 10.33 N；

45 kPa时，最大接触力增至12.58 N；65 kPa时，最大接触力降至9.84 N。这表明，在较小动应力幅值作用下，颗粒先被压密，颗粒间接触力增大；随着动应力幅值增加，颗粒间胶结发生破坏，颗粒产生滑移或旋转，导致颗粒间接触力减小。

此外，随着围压增大，颗粒间接触力沿主应力方向逐渐增大。以动应力幅值25 kPa作用下的数值试样为例：100 kPa围压下，颗粒间最大接触力为4.06 N；150 kPa围压下，最大接触力增至9.87 N；200 kPa围压下进一步增至10.33 N。这是因为围压增大使试样被压密，颗粒间接触力随之增大。综上所述，颗粒间接触力沿主应力方向发展，其数值随围压增大而增加，随动应力幅值增大呈先增大后减小的趋势。

4 结论

（1）黄土的接触黏结强度、摩擦系数、刚度比均对试样震陷产生一定影响。其中，增大接触黏结强度或摩擦系数使数值试样的抗震变形能力增强、震陷系数减小；增大刚度比则使得数值试样的抗剪强度减小、震陷系数增大。

（2）三维离散元模型可以较准确地反映室内黄土试样的震陷变形规律。数值模拟所得震陷曲线变化趋势与室内试验基本一致：在相同动应力幅值作用下，二者所得震陷系数均随围压增大而降低。

（3）在相同围压条件下，增大动应力幅值会使数值试样震陷系数增大，细观上表现为颗粒间接触力先增大后减小、颗粒位移和旋转量增大；反之，在相同动应力幅值条件下，增大围压则使黄土试样的震陷系数减小，并使轴向累积应变的收敛更趋稳定，细观上表现为颗粒间接触力增大、颗粒位移和旋转量减小。

参考文献（References）

[1] 彭建兵，林鸿州，王启耀，等. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J]. 工程地质学报，2014，22(4)：684-691.
PENG Jianbing，LIN Hongzhou，WANG Qiyao，et al. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards[J]. Journal of Engineering Geology，2014，22(4)：684-691.

[2] 董理. 动荷载下EPS颗粒混合轻量土的动强度特性试验研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2018.
DONG Li. Study on dynamic strength properties of lightweight loess-EPS beads soil under cyclic loading[D]. Yangling：Northwest A & F University，2018.

[3] 田欣欣，严武建，郑海忠，等. 地震作用下含暗穴高边坡黄土路基稳定性分析[J]. 地震工程学报，2022，44(1)：72-78，85.
TIAN Xinxin，YAN Wujian，ZHENG Haizhong，et al. Stability analysis of high-slope loess subgrade with hidden holes under earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal，2022，44(1)：72-78，85.

[4] 宁孝梁. 黏性土的细观三轴模拟与微观结构研究[D]. 杭州：浙江大学，2017.
NING Xiaoliang. The meso-simulations of triaxial tests and microstructure study of the cohesive soil[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2017.

[5] 李识博，王常明，王念秦，等. 黄土三轴试验的颗粒流数值模拟[J]. 中国公路学报，2013，26(6)：22-29.
LI Shibo，WANG Changming，WANG Nianqin，et al. Numerical simulation of loess triaxial shear test by PFC3D[J]. China Journal of Highway and Transport，2013，26(6)：22-29.

[6] 赵洲，张鹏，宋晶，等. 低围压下颗粒形态对软黏土抗剪强度影响的离散元分析[J]. 工程地质学报，2019，27(5)：1085-1092.
ZHAO Zhou，ZHANG Peng，SONG Jing，et al. Discrete element analysis of the effect of particle morphology on shear strength of soft clay under low confining pressure[J]. Journal of Engineering Geology，2019，27(5)：1085-1092.

[7] QU T M，FENG Y T，WANG Y，et al. Discrete element modelling of flexible membrane boundaries for triaxial tests[J]. Computers and Geotechnics，2019，115：103154.

[8] QIN Y，LIU C，ZHANG X Y，et al. A three-dimensional discrete element model of triaxial tests based on a new flexible membrane boundary[J]. Scientific Reports，2021，11：4753.

[9] 陈龙，吴顺川，金爱兵. 颗粒离散元分层建模法及颗粒尺寸效应[J]. 西南交通大学学报，2022，57(5)：1086-1095.
CHEN Long，WU Shunchuan，JIN Aibing. Particle discrete element layered modeling method and particle size effect[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2022，57(5)：1086-1095.

[10] 高德清. 筑坝料动力变形特性试验与颗粒流模拟[J]. 地震工程学报，2019，41(6)：1615-1622.
GAO Deqing. Test and particle flow simulation of dynamic deformation characteristics of dam materials[J]. China Earthquake Engineering Journal，2019，41(6)：1615-1622.

[11] 罗洋. 基于PFC3D的不规则颗粒土石混合体宏细观三维静动力特性分析[D]. 成都：西南交通大学，2021.
LUO Yang. 3D static and dynamic analysis on macro and meso characteristic of soil-rock mixture with irregular rock particles using PFC3D[D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2021.

[12] 赵金凤，严颖，季顺迎. 基于离散元模型的土石混合体直剪试验分析[J]. 固体力学学报，2014，35(2)：124-134.
ZHAO Jinfeng，YAN Ying，JI Shunying. Analysis of direct shear test of soil-rock mixture based on discrete element model

[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2014, 35(2): 124-134.

[13] 丁秀丽，李耀旭，王新. 基于数字图像的土石混合体力学性质的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报，2010，29(3)：477-484.
DING Xiuli, LI Yaoxu, WANG Xin. Particle flow modeling mechanical properties of soil and rock mixtures based on digital image[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 477-484.

[14] 金磊，曾亚武. 基于三维柔性薄膜边界的土石混合体大型三轴试验颗粒离散元模拟[J]. 岩土工程学报，2018，40(12)：2296-2304.
JIN Lei, ZENG Yawu. Numerical simulation of large-scale triaxial tests on soil-rock mixture using DEM with three-dimensional flexible membrane boundary[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(12): 2296-2304.

[15] 许江波，曹宝花，余洋林，等. 基于PFC3D的黄土三轴试验细观参数敏感性分析[J]. 工程地质学报，2021，29(5)：1342-1353.
XU Jiangbo, CAO Baohua, YU Yanglin, et al. Sensitivity analysis of meso-parameters in loess triaxial test based on PFC3D[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1342-1353.

[16] 权登州，柴少波，王玉铃，等. 黄土地区设诱导缝地铁车站地震响应特性研究[J]. 地震工程学报，2025，47(1)：91-103.
QUAN Dengzhou, CHAI Shaobo, WANG Yuling, et al. Seismic response characteristics of subway stations with induced joints in loess area[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2025, 47(1): 91-103.

[17] XU M Q, YANG Z X. Three-dimensional discrete element simulations of inherently anisotropic granular materials subjected to circular rotational shear stress path[J]. Computers and Geotechnics, 2025, 180: 107040.

[18] LI X, ZHANG L, WANG P. Discrete element modeling of loess microstructure by particle scaling and calibration[J]. Engineering Geology, 2020, 275: 105741.

[19] ZHOU W, YANG L, MA G. Particle size scaling in DEM simulations of cohesive soils under compression[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 100: 168-175.

[20] LIU Z, WANG J, ZHANG M, et al. Microstructural changes of loess soils due to cyclic loading and their impact on macroscopic behavior[J]. Engineering Geology, 2018, 234: 64-75.

[21] FAN M, SU D, ZHANG N, et al. Optimizing parameter combinations for clump models enabled by the bubble packing algorithm: insights from geometrical and morphological approximation of typical geotechnical particles[J]. Computers and Geotechnics, 2025, 180: 107061.

[22] 刘浩钰. 动荷载下EPS颗粒混合轻量土滞回曲线本构模型及离散元数值模拟研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2023.
LIU Haoyu. Study on hysteresis constitutive model and discrete element numerical simulation of light weight soil mixed with EPS particles under dynamic load[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023.

[23] 陈龙飞，游世辉，谢纯凯. 基于持续同调的边坡土颗粒应力链失稳分析[J]. 计算力学学报，2020，37(4)：470-475.
CHEN Longfei, YOU Shihui, XIE Chunkai. Instability analysis of soil particle stress chain on slope based on persistent homology[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2020, 37(4): 470-475.

[24] HOU T S, CUI Y X, PAN X R, et al. Characteristics of dynamic shear modulus and damping ratio and the structural formula of EPS particles lightweight soil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 166: 107768.

[25] ZHU Y F, FAN W, LIANG J Y. Effects of realistic particle morphology on mechanical behaviors of loess with discrete element analyses[J]. Environmental Earth Sciences, 2024, 83(18): 544.

（本文编辑：赵乘程）