

DOI: 10.11779/CJGE2021S1045

# 考虑吸力作用的非饱和土离散元模型及细观参数影响分析

李 瑶<sup>1</sup>, 伏映鹏<sup>1</sup>, 廖红建<sup>1\*</sup>, 吕龙龙<sup>1</sup>, 董 琪<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院,陕西 西安 710049;2. 陕西科技控股集团有限责任公司,陕西 西安 710003)

**摘要:**为了研究非饱和土在三轴应力状态下细观参数对宏观力学行为的影响,基于PFC<sup>3D</sup>程序,采用可以施加基质吸力作用的Hill接触模型对非饱和土开展了等围压和等吸力作用下的离散元三轴试验模拟,得到了不同细观参数下偏应力与轴向应变之间的关系。数值模拟结果表明:在细观参数中,颗粒杨氏模量与颗粒摩擦系数对非饱和土的影响最大,而颗粒泊松比和颗粒阻尼常数对偏应力-轴向应变曲线影响较小;随着颗粒杨氏模量增大,试样初始弹性模量增大,并且出现应变软化现象;在其他参数相同的条件下,颗粒摩擦系数与峰值强度表现出明显的正相关关系。

**关键词:**非饱和土;离散单元法;吸力;细观参数;三轴试验

**中图分类号:**TU43      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-4548(2021)S1-0246-05

**作者简介:**李 瑶(1996—),女,硕士研究生,主要从事土体细观力学与离散元模拟等方面的研究工作。E-mail: e22515x126980@stu.xjtu.edu.cn。

## Discrete element model for unsaturated soils considering suction effect and its meso-parameter influence analysis

LI Yao<sup>1</sup>, FU Ying-peng<sup>1</sup>, LIAO Hong-jian<sup>1\*</sup>, LU Long-long<sup>1</sup>, DONG Qi<sup>2</sup>

(1. School of Human Settlement and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;2. Shaanxi Science and Technology Holding Group, Xi'an 710003, China)

**Abstract:** In order to study the influences of meso-parameters on the macro-mechanical behavior of unsaturated soils under triaxial stress, based on the PFC<sup>3D</sup> program, the numerical triaxial tests on unsaturated soils under equal confining pressure and suction based on the Hill contact model, which can exert matrix suction, are conducted. The relationships between the deviator stress and the axial strain under different meso-parameters are obtained. The numerical simulation results show that the Young's modulus and the friction coefficient have the greatest influences on the unsaturated soils, while the Poisson's ratio and the damping constant have a minor effect on deviator stress axial strain curve. The initial elastic modulus of the samples increases with the increase of the Young's modulus and the phenomenon of strain softening appears as well. The relationship between the friction coefficient and the peak strength shows obviously positive correlation when other parameters keep the same. This study has a certain guiding significance for the parameter calibration of the meso-contact model for unsaturated soils.

**Key words:** unsaturated soil; discrete element method; suction; micro-parameter; triaxial test

## 0 引言

近年来,随着中国道路工程、水利水电工程等各项基础设施的兴建,越来越多的工程都涉及到非饱和土。非饱和土逐渐成为现在岩土工程的广泛研究对象。基质吸力对力学行为的复杂影响导致了非饱和土宏观力学行为与饱和土存在显著差异。岩土力学性质的研究方法主要有室内力学试验和数值试验。由于土体通常是在长期的历史演变中形成的,经常表现出各向异性、离散性及不确定性。宏观室内试验一般只能定性描述单一变量的变化规律及影响,难以实时测试试样的组构变化、胶结破坏的发展、胶结接触与无胶结接触分担

的应力等细观信息<sup>[1]</sup>。

随着非连续数值模拟方法的发展,基于离散元方法的颗粒流数值模拟试验在土体力学行为的研究中发挥着越来越大的作用。与传统力学试验与常规宏观本构模型相比,离散元法将土体看成颗粒集合体,通过接触模型假设研究每个颗粒的运动信息、位置情况、颗粒

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51879212,41630639);中央高校基本科研业务费专项资金项目(xzy022019009);陕西省国际科技合作计划重点项目(2019KWZ-09)

**收稿日期:**2020-12-15

\*通信作者(E-mail: hliaoj@xjtu.edu.cn)

间的相互作用,能够实时监测试样内部的细观信息<sup>[2-4]</sup>,从细观尺度来进行宏观性质研究。目前许多学者采用离散单元法研究土体力学行为。Nivedita<sup>[5]</sup>进行了砂土的直剪试验模拟,指出颗粒形状会对砂土的宏观力学行为产生影响;温韬<sup>[6]</sup>的研究表明从颗粒细观能量的角度更能直观得到应力路径对岩体能量演化规律的影响;蒋明镜等<sup>[7]</sup>研究了密实散粒体在直剪试验中颗粒的运动状态;张强等<sup>[8]</sup>基于大型三轴模拟试验,发现了剪切破坏与颗粒的转动有关;李涛等<sup>[9]</sup>指出土体宏观的压缩和坍塌行为与细观结构上颗粒之间的黏合断裂有关;Sadek 等<sup>[10]</sup>探讨了试样抗剪强度与含水率和颗粒密度之间的关系。综上,现有的离散元方法很大程度上研究的是干颗粒或饱和颗粒,而针对非饱和颗粒的研究较少,这与实际工程中遇到的土大部分处于非饱和状态存在一定的差距。

为了利用离散单元法模拟非饱和土,需要建立合适的接触模型以充分考虑基质吸力的影响与作用。在PFC<sup>3D</sup>程序的FishTank工具箱中给出了一种有效模型,即Hill接触模型。基于该模型的数值试验不仅操作简单,易于实现,同时与线性接触模型等传统模型相比,该模型把吸力作为细观参数,能在颗粒之间施加吸力作用,在非饱和土的宏细观性质研究上也具有一定优势。为此,本文采用PFC<sup>3D</sup>离散元方法,运用Hill接触模型,建立非饱和土数值试样,开展不同细观参数下的室内三轴试验模拟,以查清细观参数对非饱和土力学特性的影响。

## 1 Hill Contact 模型简介

Hill接触模型定义了一种与非饱和粒状材料具有类似力学行为的材料。参数颗粒杨氏模量、颗粒泊松比与土体宏观杨氏模量和泊松比的定义相同,但针对的是模型土颗粒细观参数。由于颗粒之间存在接触,颗粒本身会有位移和旋转,根据接触模式和力-位移准则,两者值并不相同,但颗粒杨氏模量与泊松比直接影响了宏观杨氏模量和泊松比。

图1为模型接触模式。当模型处于浸湿状态时,水分的作用力使得两个颗粒之间建立了液桥并产生吸力(如图2)。总接触力 $F_c$ 可以分解为接触表面相互作用力 $F_s$ 和水分作用力 $F_m$ 。用公式表示为

$$F_c = F_s + F_m \quad (1)$$

PFC以时间步长为计算单位,在每一时步内,根据力-位移准则(图3)计算并更新每一个接触处的力。最后基于颗粒上作用的合力,由运动定律计算并更新颗粒的速度和位置。通过引入与表面张力相关的吸力来反映土体之间的毛细力。吸力使颗粒接触间形成液

桥,以此来传递水分作用力。当顶部颗粒向上移动至临界距离时,液桥断裂,再将顶部颗粒向下移动至目标间隙值以内,此时颗粒间由于施加的吸力而重新产生接触。

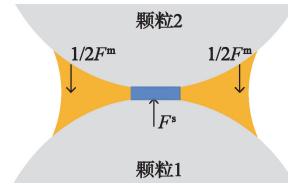


图1 Hill 接触模型

Fig. 1 Hill contact model

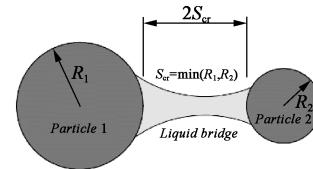


图2 颗粒接触示意图

Fig. 2 Sketch of particle contact

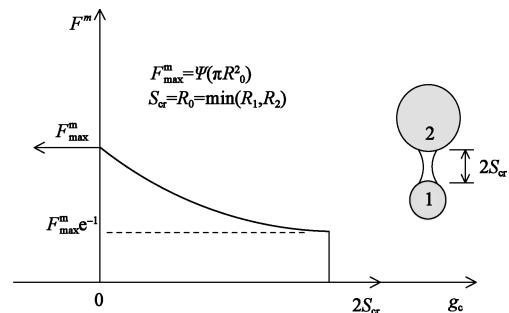


图3 毛细力与接触间隙的力-位移准则

Fig. 3 Force-displacement law between moisture force and contact gap

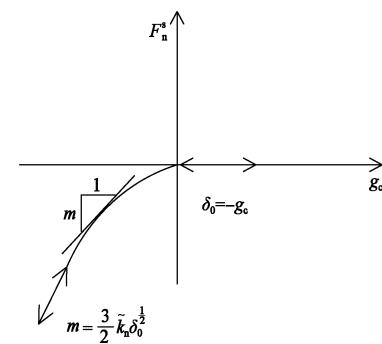


图4 法向作用力与接触间隙的力-位移准则

Fig. 4 Force-displacement law between normal force and contact gap

## 2 细观参数对宏观力学行为的影响

### 2.1 离散元模拟方案

模拟土体(陕北某黄土地)基本物理参数见表1。

数值试样的土颗粒采用规则球体,作为离散元计

表 1 基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of loess

天然密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	天然含水率/%	塑限/%	液限/%	孔隙比	相对密度
1.580	12.350	18.42	29.73	0.92	2.695

算单元。在理想离散元颗粒流模拟中,颗粒粒径量为mm,很难达到真实土体粒径的μm量级。颗粒尺寸越小,模拟试样越接近实际土样,但由于颗粒与接触数量的增多,试验运行时间明显延长。同时,在颗粒流模拟中,颗粒尺寸对土体宏观特性的影响相比于颗粒接触强度与摩擦系数来说要小很多。因此,为了节省计算时间并提高模拟效率,基于室内非饱和土三轴试验与选取的土样,确定试样尺寸为高80 mm,直径39.1 mm的圆柱体。试样颗粒最大粒径为5 mm,最小粒径为2 mm,颗粒密度为2650 kg/m<sup>3</sup>,孔隙率为48%。

首先采用应力应变曲线拟合法,对吸力25.0 kPa,围压200 kPa的数值试样进行了参数标定(如图5),验证了所选Hill接触模型的正确性。标定的 $E_g$ 、 $v_g$ 、 $\mu$ 、 $\alpha_h$ 值分别为 $2.3 \times 10^7$ 、0.5、0.19、0.07。设计的不同Hill接触模型参数的三轴试验模拟方案,见表2。

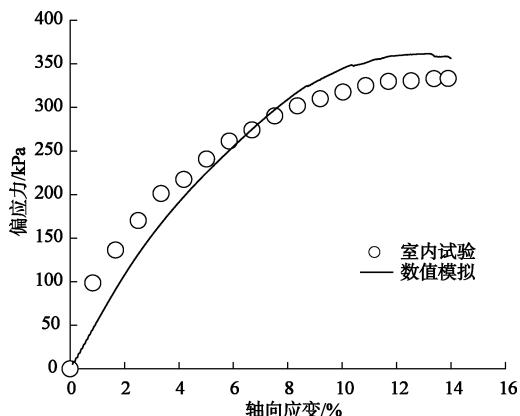


图5 室内三轴试验和数值三轴试验的偏应力-轴向应变曲线

Fig. 5 Deviator stress-axial stress curves of laboratory and numerical triaxial tests

## 2.2 数值实现

在PFC中,基本单元包括颗粒与墙体。颗粒组成试样,可以直接施加力和速率。墙体代表试验装置边界,但由于没有质量,只能施加速率而不能施加作用力。因此采用伺服机制来对墙体施加法向应力。在伺服过程中,离散元程序算法在每一个时步内进行迭代,根据前一次的迭代结果计算当前一次颗粒的位置与接触力,再进行下一次迭代,以此不断更新颗粒的位置信息。每一次迭代都会通过实际试验中的应力值与目标应力值的差值来调整墙体速率,使得当前应力不断向目标应力逼近。

表 2 模型参数试验方案

Table 2 Testing programs of model parameters

研究变量	试验组	模型细观参数			
		$E_g/10^7$	$v_g$	$\mu$	$\alpha_h$
颗粒杨氏模量	1	1.9	0.5	0.19	0.07
	2	2.1	0.5	0.19	0.07
	3	2.3	0.5	0.19	0.07
	4	2.5	0.5	0.19	0.07
	5	2.7	0.5	0.19	0.07
颗粒泊松比	1	2.3	0.1	0.19	0.07
	2	2.3	0.2	0.19	0.07
	3	2.3	0.3	0.19	0.07
	4	2.3	0.4	0.19	0.07
	5	2.3	0.5	0.19	0.07
颗粒摩擦系数	1	2.3	0.5	0.15	0.07
	2	2.3	0.5	0.17	0.07
	3	2.3	0.5	0.19	0.07
	4	2.3	0.5	0.21	0.07
	5	2.3	0.5	0.23	0.07
颗粒阻尼常数	1	2.3	0.5	0.19	0.00
	2	2.3	0.5	0.19	0.05
	3	2.3	0.5	0.19	0.10
	4	2.3	0.5	0.19	0.15
	5	2.3	0.5	0.19	0.20

基于上述原理,设置Hill接触模型细观参数并生成稳定的数值试样,选取围压200.0 kPa,吸力25.0 kPa,模拟非饱和土三轴试验,得到了不同细观参数下的偏应力-轴向应变关系曲线,研究了细观参数对土体宏观应力应变特性的影响。

## 3 数值模拟结果分析与讨论

### 3.1 颗粒杨氏模量对非饱和土力学特性的影响

图6为试样在不同颗粒杨氏模量下的离散元模拟结果。结果表明,颗粒杨氏模量对试样的初始弹性模量、峰值强度、应变软化等特性都有一定的影响。在三轴试验初期,曲线斜率随着颗粒杨氏模量的增大而增大,说明试样的初始弹性模量增大,同时达到峰值强度时对应的轴向应变呈现下降趋势。而应力-应变曲线逐渐由颗粒杨氏模量较小时的应变硬化型向颗粒杨氏模量较大时的应变软化型发展,且杨氏模量越大,软化现象越显著。此时考虑软化现象后的残余强度也随着颗粒杨氏模量的增大而呈现减小的趋势。

### 3.2 颗粒泊松比对非饱和土力学特性的影响

图7为在0~0.5的范围内改变颗粒泊松比对三轴试验结果的影响。从图7中可以看出,颗粒泊松比的变化会导致偏应力-轴向应变曲线表现出差异性。在试验初期,曲线近乎重合,初始弹性模量相差不大。

当轴向应变达到一定值后,颗粒泊松比开始对曲线产生影响。峰值强度随颗粒泊松比的增大而发生变化,但变化幅度不是很大。因此可以认为颗粒泊松比不是影响试样峰值强度的主要原因。

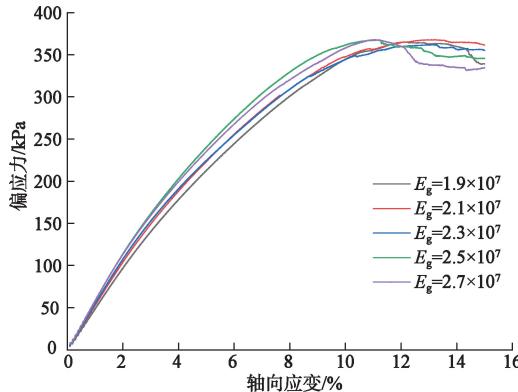


图 6 不同颗粒杨氏模量下的偏应力 – 轴向应变曲线

Fig. 6 Deviator stress-axial stress curves under different Young's moduli

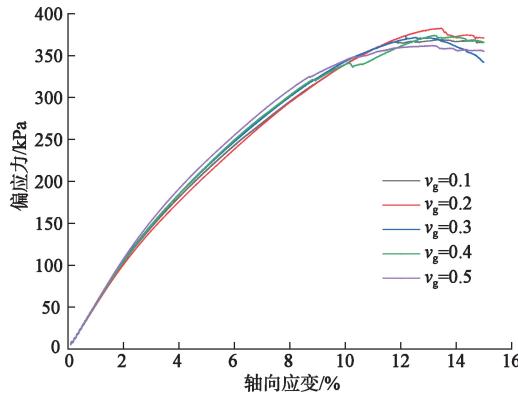


图 7 不同颗粒泊松比下的偏应力 – 轴向应变曲线

Fig. 7 Deviator stress-axial stress curves under different Poisson's ratios

### 3.3 颗粒摩擦系数对非饱和土力学特性的影响

数值试样由颗粒组成,而实际土体本质上也是颗粒集合体。当土体受力作用时,细观颗粒发生移动和旋转,颗粒与颗粒之间的作用主要依靠摩擦进行传递。不同颗粒摩擦系数试样的模拟结果(图 8)表明随着颗粒摩擦系数的增大,试样的峰值强度和弹性模量均明显增大,并且达到峰值强度时对应的轴向应变呈现增大的趋势,这表明颗粒摩擦系数对宏观剪切强度具有重要的影响。此时,分别取颗粒摩擦系数为 0.15, 0.17, 0.19, 0.21 时对应的峰值强度,作两者关系曲线(如图 9)。从曲线可以看出两者正线性相关。这种正相关性可以理解为,颗粒摩擦系数的增大会提高颗粒之间的摩擦作用,使颗粒发生相对移动或转动所需的应力变大,从而使试样的宏观峰值强度也得到了增强。

### 3.4 颗粒阻尼常数对非饱和土力学特性的影响

Hill 接触模型定义了颗粒阻尼常数,它影响着颗粒间的阻尼状态。由于在离散元模拟中要求模型处于

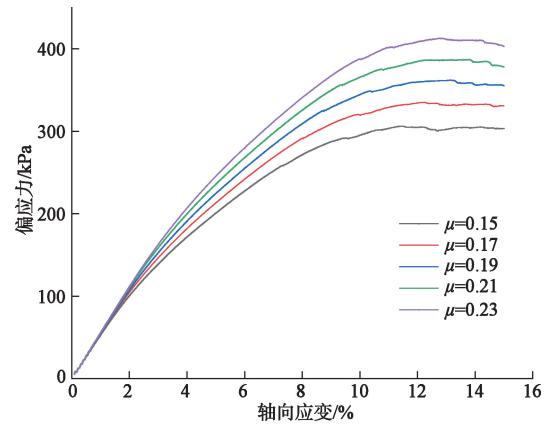


图 8 不同颗粒摩擦系数下的偏应力 – 轴向应变曲线

Fig. 8 Deviator stress-axial stress curves under different friction coefficients

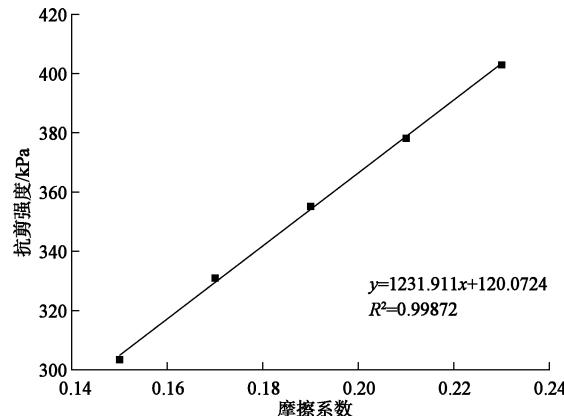


图 9 摩擦系数与峰值强度的关系

Fig. 9 Relationship between friction coefficient and peak strength  
拟静力状态,以保持稳定的模拟结果,因此设定的加载速率极小。在相同吸力和围压下,颗粒阻尼常数对偏应力-轴向应变曲线的影响如图 10 所示。曲线表明随着颗粒阻尼常数的增大,虽然得到的曲线有微小的变化,但曲线在弹性阶段的斜率基本相同,这反映了试样的初始弹性模量在不同颗粒阻尼常数下不变。不同偏应力应变曲线达到峰值强度时对应的轴向应变趋向于同一值。

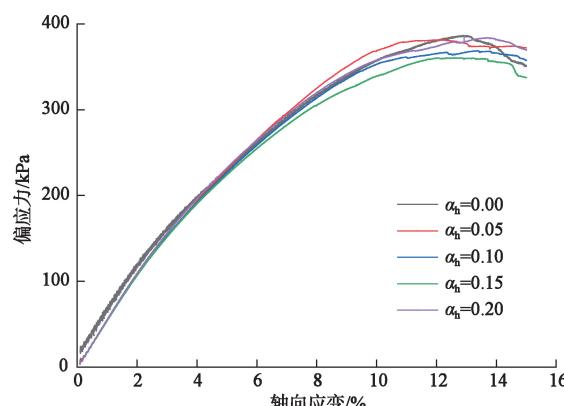


图 10 不同阻尼常数下的偏应力 – 轴向应变曲线

Fig. 10 Deviator stress-axial stress curves under different damping constants

## 4 结 论

基于 PFC<sup>3D</sup>程序,采用可以施加基质吸力的 Hill 接触模型进行离散元三轴试验模拟,研究了模型细观参数对非饱和土宏观力学行为的影响,得到了如下结论:

(1) 模型的细观参数均会对非饱和土的偏应力-轴向应变曲线产生不同程度的影响,其中影响较大的是颗粒杨氏模量与颗粒摩擦系数,颗粒泊松比和颗粒阻尼常数对偏应力-轴向应变曲线影响较小。

(2) 试样的初始弹性模量主要与颗粒杨氏模量和摩擦系数存在着正相关性。颗粒杨氏模量的增加还会使非饱和土材料从应变硬化型转化为应变软化型,残余强度也出现变小的趋势。

(3) 颗粒摩擦系数的增加导致了峰值强度出现非常明显的增长趋势,且两者表现出了良好的线性关系。这表明颗粒摩擦系数决定了颗粒之间的摩擦作用大小,进而对试样宏观强度产生影响。

## 参 考 文 献:

- [1] 蒋明镜, 李 涛, 胡海军. 结构性黄土双轴压缩试验的离散元数值仿真分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊2): 241–246. (JIANG Ming-jing, LI Tao, HU Hai-jun. Numerical simulation of biaxial tests on structured loess by distinct element method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2):241–246. (in Chinese))
- [2] 李 涛, 蒋明镜, 张 鹏. 非饱和结构性黄土侧限压缩和湿陷试验三维离散元分析[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(增刊1):39–44. (LI Tao, JIANG Ming-jing, ZHANG Peng. DEM analyses of oedometer and wetting tests on unsaturated structured loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S1):39–44. (in Chinese))
- [3] JIANG M J, YU H S, LEROUEIL S. A simple and efficient approach to capturing bonding effect in naturally microstructured sands by discrete element method [J]. International Journal

for Numerical Methods in Engineering, 2007, **69**(6):1158–1193.

- [4] JIANG M J, KONRAD J M, LEROUEIL S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies[J]. Computers and Geotechnics, 2003, **30**(7): 579–597.
- [5] NIVEDITA D. Modeling Three-Dimensional Shape of Sand Grains Using Discrete Element Method [D]. Tampa Bay: University of South Florida, 2007.
- [6] 温 韬. 加卸荷条件下岩石破坏机理及应用[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018. (WEN Tao. Failure Mechanism of Rock under Loading and Unloading Conditions and Its Engineering Application [D]. Wuhan: China University of Geosciences. 2018. (in Chinese))
- [7] 蒋明镜, 王富周, 朱合华, 等. 密实散粒体宏微观特性的直剪试验离散元数值分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, **38**(5): 538–544. (JIANG Ming-jing, WANG Fu-zhou, ZHU He-hua, el al. Discrete element numerical analysis of macro and micro characteristics of dense granular materials by direct shear test [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, **38**(5):538–544. (in Chinese))
- [8] 张 强, 汪小刚, 赵宇飞, 等. 基于围压柔性加载的土石混合体大型三轴试验离散元模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(8):1545–1554. (ZHANG Qiang, WANG Xiao-gang, ZHAO Yu-fei, el al. Discrete element simulation of large-scale triaxial tests on soil-rock mixtures based on flexible loading of confining pressure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(8): 1545–1554. (in Chinese))
- [9] JIANG M J, LI T, HU H J, el al. DEM analyses of one-dimensional compression and collapse behaviour of unsaturated structural loess[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **60**: 47–60.
- [10] SADEK M A, CHEN Y, LIU J D. Simulating shear behavior of a sandy soil under different soil conditions[J]. Journal of Terramechanics, 2011, **48**(6): 451–458.

(编校:孙振远)