

基于 M-C 方法的粗粒土剪切排列分布演化机理研究

高 智, 魏玉峰, 金磊磊

(地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘要: 考虑颗粒分布的不确定性, 在排列熵计算过程中引入蒙特卡罗(Monte-Carlo, 简称 M-C)方法, 用以表征排列混乱程度。为探究粗粒土剪切过程中排列熵的演化规律, 以粗颗粒含量 P_s 为指标, 设立 4 种不同类型的粗粒土结构为研究对象, 结合常法向应力下的剪切试验(CNL)试验结果, 运用 Image Pro Plus 等图像处理软件, 同时通过室内剪切试验和数值模拟双向验证所揭示规律的可靠性。在 206 kPa 的法向应力下对 4 种结构的粗粒土进行剪切试验, 以一组骨架密实结构数据为算例, 利用多项式拟合试验结果, 对比分析数值模拟和室内剪切试验排列熵变化结果。研究结果表明: 剪切初期, 粗粒土的排列熵随剪应力的增加呈先增大后减小的趋势, 在达到峰值后随着剪应力的缓慢减小表现为先增大后减小的趋势。随着粗颗粒含量的升高, 粗粒土结构发生变化, 排列熵值增大, 同时其排列分布的有序性受剪切作用的影响越大。

关键词: 粗粒土; 排列熵; M-C 方法; 剪切试验; 排列分布

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)06-0873-08

Research on the evolution of coarse-grained soil on permutation distribution based on M-C model

GAO Zhi, WEI Yufeng, JIN Leilei

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Considering the uncertainty of particle distribution, M-C method is introduced in the calculation of permutation entropy to characterize the degree of permutation chaos. To explore the coarse grained soil shear permutation entropy evolution rule, in the process of P_s coarse particle content as indexes, four different types of coarse grained soil structure were set up as the research object, in combination with shear test under normal stress (CNL) test results, using the image processing software, such as the Image Pro Plus through indoor shear test and numerical simulation of two-way authentication at the same time reveals the reliability of the law. Under the normal stress of 206 kPa, shear tests were carried out on coarse grained soil with four kinds of structures. A set of dense skeleton structure data is taken as an example, and polynomial fitting test results are used to compare and analyze the results of permutation entropy change in numerical simulation and laboratory shear test. Results show that the permutation entropy of coarse-grained soil increases first and then decreases with the increase of shear stress at the initial stage of shear stress, and increases first and then decreases with the slow decrease of shear stress after reaching the peak. With the increase of coarse grain content, the structure of coarse grain soil changes, the permutation entropy increases. Meanwhile the ordering of its permutation distribution is greatly affected by shear.

Key words: coarse grained soil; permutation entropy; M-C model; shearing test; permutation distribution

粗粒土作为一种非连续介质, 是地质灾害的重要物质组成。受地震、小区域地质构造作用等影响, 粗粒土通常会发生颗粒重排, 而结构则是影响土体颗粒排列的决定性因素。当粗粒土受到外力扰动时, 其内部颗粒的排列分布将发生剧烈的变化, 这种变化将对土体颗粒的排列熵值产生直接的影响。

随着土力学的发展, 土体结构的研究受到越来越

多学者的关注, 早在 20 世纪 20 年代, 土力学奠基人太沙基就首次提出土体微观结构的概念^[1]。近年来众多学者对土体颗粒几何形态及颗粒排列分布特征进行量化研究时, 依托于物理实验^[2]、CT 扫描^[3]、扫描电子显微镜^[4]、光学显微镜^[5]、数值模拟^[6]等方法开展土体结构参数量化研究, 已取得了一定的成果。相较于黏性土而言, 粗粒土由于组成颗粒的粒径较大, 粒间作用力以重力为主, 因而粗

收稿日期: 2020-06-28

修改稿日期: 2020-11-16

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(2017YFC1501000); 国家自然科学基金项目资助(42072303)

第一作者: 高 智(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事地质工程方向研究。E-mail: gaozhi96@163.com

通信作者: 魏玉峰(1979—), 男, 博士后, 副教授, 主要从事地质工程、岩土工程的科研和教学工作。E-mail: weiyufeng@cdut.edu.cn

粒土的结构研究实际上就是对粗粒土组成颗粒的几何形态和空间分布特征的研究^[7-10]。

而随着现代信息系统论不断发展, Shannon 于 1948 年将熵引入其中, 并定义信息熵 H ^[11]。Shannon 所定义的信息熵是指参数不确定性大小。随着统计物理学的引入, 信息熵被定义为排列熵, 且作为物理性质用于描述土体颗粒混乱程度。在排列熵的研究上, 施斌等^[12]提出和分析了排列熵这一指标和计算公式, 并基于 SEM 进行实例分析。一些学者以排列熵为基础, 推导出基础熵参数表达式以及参数和级配曲线信息合并成一对基于熵的参数, 用于量化颗粒破碎行为并建立了内部稳定性规则的物理基础^[13-14]。根据已有研究不难看出, 排列熵计算大都是单一地公式套用和推导, 并未考虑颗粒排列熵参数分布不确定性。

而蒙特卡罗^[15] (Monte-Carlo, 简称 M-C) 方法则是解决不确定参数最优化问题的一种重要的手段, 已在岩土工程的可靠性分析^[15]、岩体质量分类^[16-17]等方面得到了相应的运用。

基于此, 本文以粗颗粒含量 P_5 为指标, 设立 4 种不同类型的粗粒土结构为研究对象, 通过粗粒土可视化室内剪切试验和颗粒流 (PFC2D) 数值模拟剪切试验, 然后结合 Matlab、Image Pro Plus 等软件对图像进行处理分析, 最后基于 M-C 方法计算粗粒土剪切过程中排列熵, 并研究其变化规律。

1 粗粒土颗粒排列熵计算方法

1.1 分析模型

粗粒土颗粒形成的稳定结构常表现出一定的定向性(如图 1(a)所示), 剪切过程中在外荷载作用下原有平衡状态被打破, 颗粒发生运动, 颗粒呈无序分布; 随着应力的重分布, 颗粒逐渐达到新的平衡, 颗粒长轴重新呈现出定向性(如图 1(b)所示)。在分析模型中建立笛卡尔直角坐标系 XOY, 假设剪切试验中剪切盒的尺寸为 200 mm×200 mm, 粗粒土颗粒在剪切盒中呈一定随机性分布, 选取剪切过程中颗粒排列熵变化建立分析模型(如图 1 所示)。

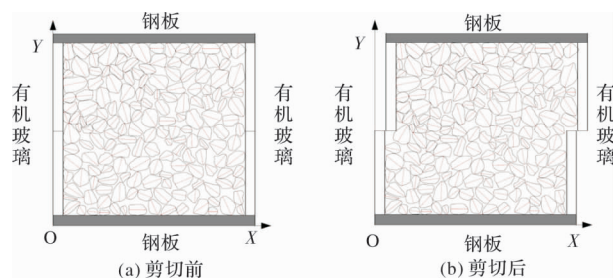


图 1 颗粒剪切分析模型

Fig. 1 Particle shear analysis model

严格意义上讲, 颗粒剪切运动属于三维空间运动, 影响因素非常复杂。为方便研究, 进行以下假设:

(1) 上剪切盒在剪切过程中沿 x 轴正方向运动。

(2) 二维空间颗粒剪切运动仍然成立。

(3) 计算排列熵时, 仅考虑分析模型内有完整形态的颗粒。

1.2 基于 M-C 的排列熵计算方法

M-C 方法是解决各种参数不确定性问题的有效手段。概率论的大数法则和中心极限定理为蒙特卡罗方法的数学基础^[15]。

颗粒上距离最远的两点的连线被定义为长轴^[18], 椭球状粗粒土颗粒通常都有较明显的长轴方向(如图 2 所示)。分析模型设第 k 个颗粒长轴向量为 $v_k (k=1, 2, \dots, Q)$, 主定向角 α_k 为

$$\alpha_k = \langle v_k, (1, 0) \rangle \quad (1)$$

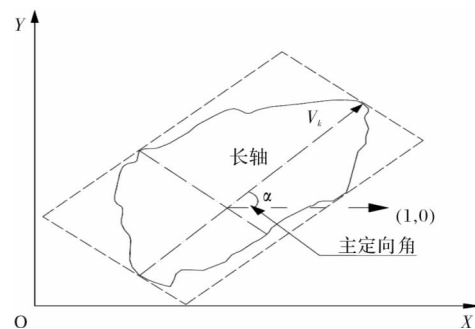


图 2 颗粒主定向角示意图^[18]

Fig. 2 Schematic diagram of particle main orientation angle

主定向角取值: $0 \sim 9^\circ, 10 \sim 19^\circ, \dots, 170 \sim 179^\circ$ 。令 $K_i (i=1, 2, \dots, N)$ 表示第 i 次随机数结果, 并记下 K_i 属于哪一个取值范畴。在 N 个随机数参数生成完毕后, 假设 $0 \sim 9^\circ$ 取值范畴内出现的随机数参数为 M 个, 则可计算获得该取值范畴在实验中的失效概率为

$$P_i = M/N \quad (2)$$

在现代信息系统论中, 常用信息熵这个指标来反映一个系统内结构单元体的有序性。C. E. Shannon^[11]将信息排列熵 H 定义为

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \quad (3)$$

式中: P_i 表示某种信号出现的概率, n 表示信号的种数。 H 反映信息源发出的每个代码含有的信息量。

施斌等^[11]结合信息熵的定义引入排列熵 S 反映粗粒土颗粒单元体排列的有序性。由于排列熵反映了颗粒排列的有序化程度, S 的取值范围为 $[0, 1]$, 则定义如下

$$S = - \sum_{i=1}^n P_i \log_n p_i \tag{4}$$

式中： S 为颗粒单元体排列的排列熵，其中 P_i 为颗粒单元定向性在某一区间中出现的概率。将水平坐标轴正向与颗粒长轴方向的夹角定义为颗粒的倾角，其值域为 $[0, \pi]$ 。将 10° 作为分度值， n 即为颗粒单元倾角 $[0 \sim \pi]$ 中等分数，即 $n=18$ 。 S 越大，说明颗粒排列越混乱，有序性越低。

2 试验方案

2.1 法向应力的确定

由于压力表的读数表示的为千斤顶油缸内的油压，而油缸面积与受力面积不同，因此需要对油缸内的液压进行换算才能得到实际受力面上的应力。根据力学原理可知读表压力和实际应力之间的转换关系如公式(5)所示

$$P'A' = PA \tag{5}$$

式中： P' 和 P 分别表示读表压力和实际应力； A' 和 A 分别表示千斤顶油缸面积和受力部分的试样面积。

选定剪切试验法向应力条件，分别设定法向应力为 103 kPa (2.0 MPa)、206 kPa (4.0 MPa) 和 308 kPa (6.0 MPa) 三种条件下开展剪切试验(括号内为竖向千斤顶油表直接读数)。通过整理试验数据、作室内试验与数值模拟剪应力-位移对比曲线图(如图 3 所示)，得出以下结论：

(1) 数值试验与室内试验剪切过程中的曲线变化趋势较为一致，剪应力均表现为先增加后达到残余强度，具有典型粗粒土的剪切性状；

(2) 低法向压力条件下，粗粒土的剪应力-剪位移关系曲线的剪切峰值不明显，表现出硬化曲线的特征；

(3) 高法向压力条件下，剪切盒承受正压力过大，导致剪切过程中粗粒土颗粒向外膨胀，影响试验数据的真实性。考虑到低法向应力下曲线峰值不明显和高法向应力下可能发生破碎，最终确定剪切试验法向应力 206 kPa 为试验最佳法向应力条件。

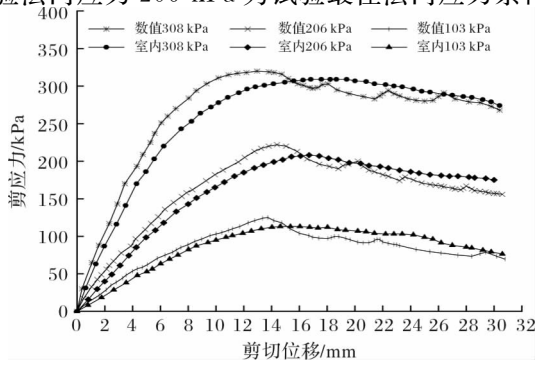


图 3 剪应力-位移对比曲线
Fig. 3 Shear stress-displacement relation curve

2.2 室内试验

已有研究结果表明^[19-20]：首先根据不同的粗粒土结构设计级配含量，将 5~20 mm 粒径范围内的颗粒均匀混合配制成粗粒料。然后按照粗粒料百分含量 P_s 别为 25%、45%、65%、85%，将对应质量的粗细粒料混合并搅拌均匀，尽可能保证制成后试样中颗粒分布的均匀性，配制成具有悬浮密实结构、骨架松散结构、骨架密实结构、骨架孔隙结构 4 种结构类型的粗粒土试样。4 种结构类型粗粒土试样中不同粒径颗粒的百分含量如表 1 所示，不同结构类型粗粒土试样的特征如图 4 所示。

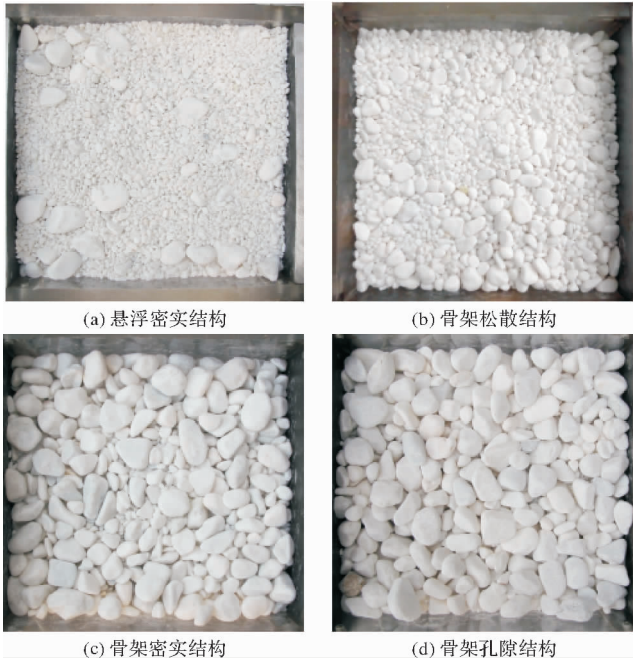


图 4 试验材料
Fig. 4 Test material

表 1 材料颗粒级配

粒径/mm	悬浮密实结构	骨架松散结构	骨架密实结构	骨架孔隙结构
	各粒径颗粒所占百分比/%			
15<d<20	9.50	17.10	24.70	32.30
12<d<15	5.00	9.00	13.00	17.00
9<d<12	5.00	9.00	13.00	17.00
5<d<9	5.50	9.90	14.30	18.70
2<d<5	75.00	55.00	35.00	15.00

本文将选取上述配制的粗粒料作为研究对象(如图 5(a)所示)。为了便于采集剪切过程中图像数据，主要通过在中型可视化剪切仪剪切盒侧壁有机玻璃材质面布置一台高清数码相机(如图 5(b)所示)，对剪切全过程进行实时拍摄，来获取剪切过程中粗粒土形态变化的影像资料(如图 5(c)所示)。利用 MATLAB 软件绘制研究区域的二值化图像

(如图 5(d)所示),为了记录颗粒形态等方面的信息,利用 IPP 软件中提供的 count 测量工具,可以提取土体结构图像中所包含的结构参数信息。运用

count 测量工具进行颗粒形态参数测量时主要包括:①图像识别(如图 5(e)所示)、②图像测量(如图 5(f)所示)两部分。

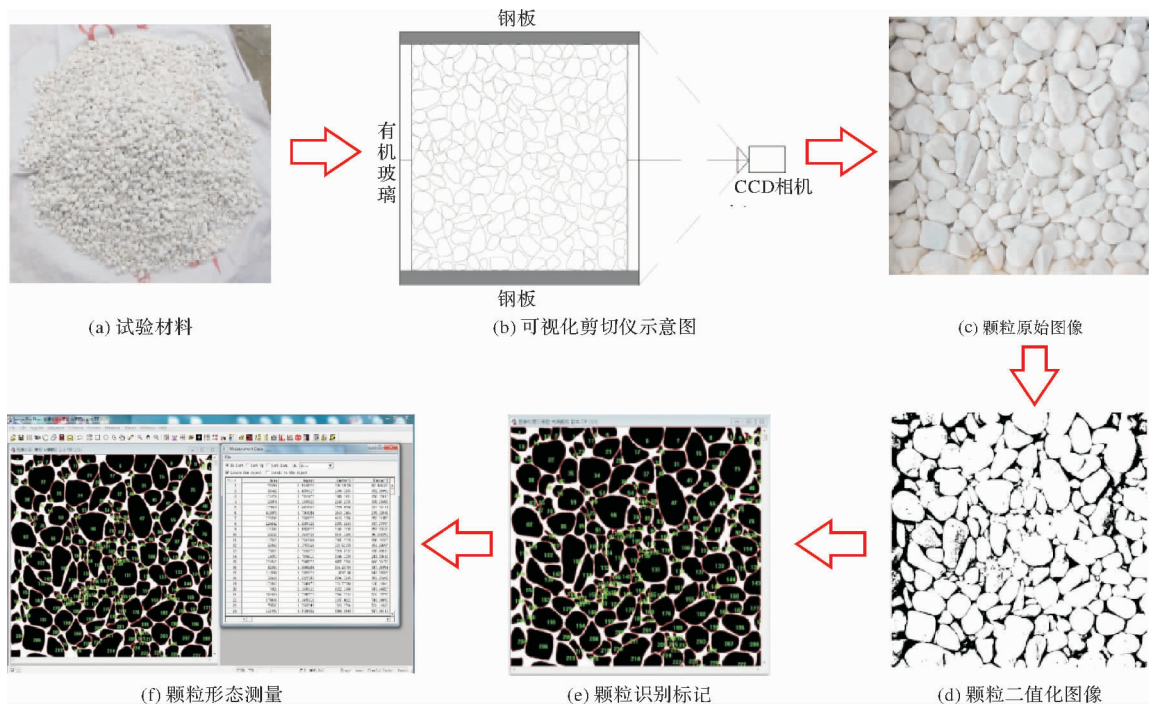


图 5 土体颗粒识别标记、形态测量过程图

Fig. 5 The process diagram of soil particle identification and morphological measurement

2.3 数值模拟

颗粒流方法 PFC(Particle Flow Code)是离散单元法中进行细观随机性模拟研究最常用的方法之一。因此,开展 PFC2D 数值模拟试验能更好的体现排列熵随机性的特点。由于粗粒土是由粒径较大的单颗粒碎屑物质组成的集合体,往往具有不同的颗粒形态特征,颗粒形态对粗粒土颗粒间作用力大小和咬合作用强弱有一定程度影响。因而粗粒土数值模拟室内剪切试验过程中,为了尽可能的还原室内剪切试验中粗粒土的颗粒形态特征,在对室内剪切试验中所用粗粒土试样的颗粒形态进行归纳总结的基础上,结合 PFC2D 软件中的 clump 功能模拟建立了 4 种形态类型的颗粒如图 6 所示。

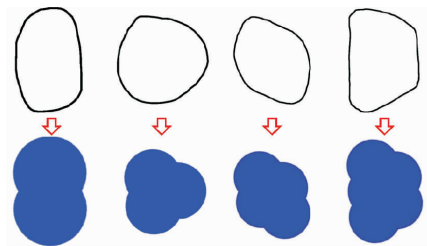


图 6 4 种颗粒单元形状

Fig. 6 Four particle unit shapes

设计试验方案首先要确定土体材料的细观力学参数,通过总结前人研究中土体细观参数设置的经

验^[9],大致确定土体相应细观参数的设置范围,进而不断调整各细观参数的取值开展大量试算,使模拟剪切试验结果尽可能与室内剪切试验结果相吻合,从而最终确定了土体各细观参数的取值如表 2 所示。根据室内试验方案设计级配生成不同结构类型粗粒土试样时,确保在每个粒组中 4 种形态类型颗粒的含量相同且均匀分布,从而最大程度上模拟了粗粒土的实际组成状态,确保了对不同结构类型粗粒土模拟剪切试验结果的可靠性。PFC2D 数值剪切试验模型中实际生成不同结构类型粗粒土试样的颗粒信息,确定了不同结构类型粗粒土试样的颗粒。

表 2 模型参数

Tab. 2 Model parameters

参数	数值	参数	数值
初始孔隙率	0.14	颗粒密度	2 643 kg/m ³
颗粒摩擦系数	0.65	墙体摩擦系数	0
颗粒法向刚度 kn	4×10 ⁷ N/m	墙体法向刚度 kn	3×10 ⁸ N/m
颗粒切向刚度 ks	3×10 ⁷ N/m	墙体切向刚度 ks	3×10 ⁷ N/m

3 试验数据分析

3.1 排列熵 S 的计算

本文以一组室内试验数据样本(颗粒数=200 个)

为例阐述基于M-C的排列熵计算步骤.该样本数据由土体颗粒识别标记、形态测量流程(如图6所示)计算的骨架密实结构峰值应力前主定向角分布数据.通过公式(2)对样本数据进行区间概率测定并统计概率数据,从而得到区间概率分布图如图7所示.

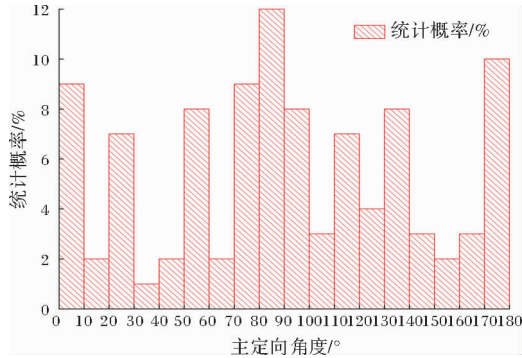


图7 主定向角概率分布图

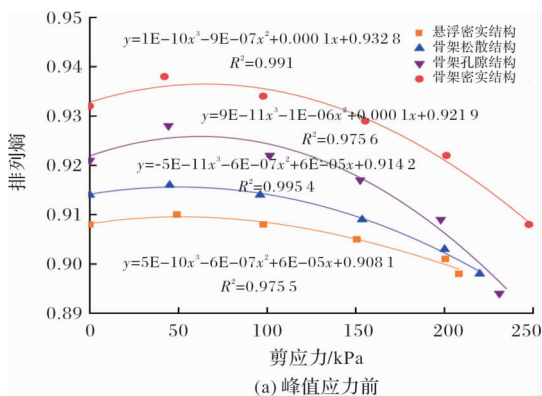
Fig. 7 Probability distribution diagram of angle

则样本数据中概率 $P_i (i=1, 2, \dots, 18)$ 分别为: $\{0.09, 0.02, 0.07, 0.01, 0.02, 0.08, 0.02, 0.09, 0.12, 0.08, 0.03, 0.07, 0.04, 0.08, 0.05, 0.02, 0.03, 0.10\}$. 根据公式(4)可得:

$$S = - \sum_{i=1}^{18} P_i \log_{18} P_i = 0.93412 \quad (6)$$

3.2 剪切试验结果与分析

为了分析剪切过程中土体颗粒排列特征的变化规律,探究土体结构对其排列特征的影响,对数值模拟过程中获取的不同剪切时刻4种结构类型粗粒土的结构图像,分别进行如图5所示的结构图像处理分析,并计算排列熵 S , 获得了206 kPa法向应力条件下不同结构类型粗粒土不同剪切时刻的排列熵数据.剪切过程中土体结构的变化具有一定的阶段性,以剪切峰值为界,整理试验数据分别作剪切峰值应力前后排列熵与剪应力的拟合曲线.为了更好的使试验数据与拟合函数之间吻合(R^2 值越接近1,二者越吻合),各结构类型粗粒土排列熵随剪应力的变化关系采用多项式进行拟合,如图8所示.



(a) 峰值应力前

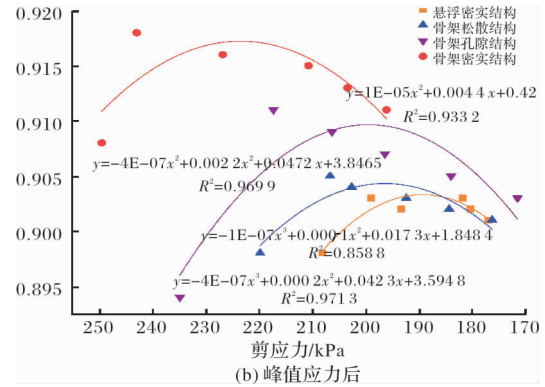


图8 排列熵与剪应力拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of permutation entropy and shear stress

由图8(a)可知,在达到峰值应力前,各结构类型粗粒土排列熵随剪应力的增加表现出先增大后减小的变化趋势.由拟合曲线的斜率可知,剪切过程中土体排列熵随剪应力增加而变化的幅度一直在变化,且在不同剪切时刻排列熵的变化幅度因粗粒土结构类型的不同而不同.整体而言,剪切过程中骨架密实结构和骨架孔隙结构粗粒土的排列熵随剪应力增加而变化的幅度比悬浮密实结构和骨架松散结构粗粒土的变化幅度要大.

由图8(b)可知,在达到峰值应力后,随着剪应力的减小,不同结构类型粗粒土的排列熵表现出先增大后减小的趋势.分析拟合曲线斜率的变化情况可知,峰值应力后剪应力开始下降时,骨架孔隙结构粗粒土的排列熵随剪应力减小而增大的幅度最大,其次为骨架密实结构粗粒土,骨架松散结构和悬浮密实结构粗粒土排列熵随剪应力减小而增大的幅度相近.

为了进一步验证剪切过程中土体结构对粗粒土排列熵的影响规律,在相同法向应力条件下运用上述方法得到4种粗粒土土体结构在数值模拟过程中排列熵变化规律,并拟合曲线,如图9所示.

结合室内剪切试验和数值模拟试验排列熵变化曲线可得到以下结论:

(1)数值模拟与室内剪切试验中排列熵随剪应力的变化规律基本相同,室内剪切试验的结果在一定程度上验证了数值模拟中土体结构变化规律研究成果的可靠性.由图9(a)可知:在剪切初始阶段,4种结构类型粗粒土的排列熵随剪应力的增加而增大的幅度较大.表明在剪切初始时刻土体颗粒排列分布的有序性相对大幅降低,颗粒间排列分布的混乱程度增加.接近峰值应力时,4种结构类型粗粒土的排列熵随剪应力增加而变化的趋势相对稳定.

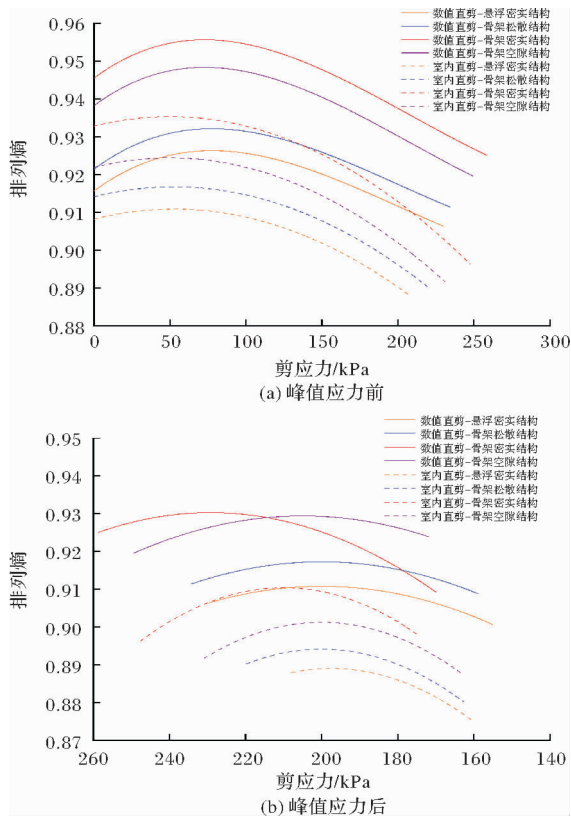


图 9 数值模拟和室内试验的比较

Fig. 9 The comparison between the numerical modeling and the laboratory test

(2)由图 9(b)可知:同峰值应力前一样,峰值应力后数值模拟和室内剪切试验的规律也较为吻合,两种试验条件下不同结构类型粗粒土的结构参数与剪应力间的拟合曲线表现出相似的规律性.在峰值应力后的一定位移范围内,4 种结构类型粗粒土的排列熵发生了较大的变化,骨架密实结构和骨架孔隙结构粗粒土在剪切破坏时,土体结构量化参数随剪应力降低而变化的幅度明显比悬浮密实结构和骨架松散结构粗粒土的要大.表明剪切破坏时骨架密实结构和骨架孔隙结构粗粒土原始结构的破坏程度较大.

(3)数值模拟和室内剪切试验的结果均表明,骨架密实结构粗粒土的排列熵比其他 3 种结构类型粗粒土都要大.剪切初始时刻骨架密实结构和骨架孔隙结构粗粒土的排列熵随剪应力增加而增大的幅度明显比悬浮密实结构和骨架松散结构粗粒土的要大.剪切过程中骨架密实结构和骨架孔隙结构粗粒土排列熵的变化幅度也要比悬浮密实结构和骨架松散结构粗粒土的要大.反映出剪切过程中随着粗颗粒含量的增加,粗粒土排列熵变化幅度增大,同时表明了颗粒排列分布的有序性受剪切作用的影响越大.

3.3 排列分布规律分析

由于骨架密实结构粗粒土试样在剪切过程中的排列熵变化率最大,反映出土体颗粒排列分布的规律更加明显,因此选取骨架密实结构粗粒土的应力-位移及排列熵-位移数据进行分析,可得到土体在各阶段的相应关系曲线图(如图 10 所示).由图 10 可知:(1)初始剪切阶段,粗粒土试样的排列熵随着剪应力的增大而缓慢增加,表明了土体颗粒在剪切过程中的排列分布混乱程度发生一定的变化;(2)稳定剪切变形阶段,随着剪应力的持续增大,土体颗粒的排列熵值增加的趋势有所减小且达到最大值,随后逐步减小,这表明当剪切力稳定增大时,颗粒混乱程度有所增大,而后颗粒排列分布逐渐呈现有序性;(3)剪切峰值阶段,当剪应力达到峰值应力时,土体的排列熵值减小到极小值,可看出此阶段粗粒土颗粒排列分布的定向性越来越好;(4)峰值后剪切阶段,峰值应力后土体颗粒的排列熵呈现出增大的趋势,当剪切达到残余状态时,试样的排列熵值再次达到极大值,随后便以稳定减少的趋势发展演化,表现出剪切后期,颗粒排列分布定向性有所减弱.因此在剪切过程中,颗粒排列分布与剪应力变化是紧密相连的.

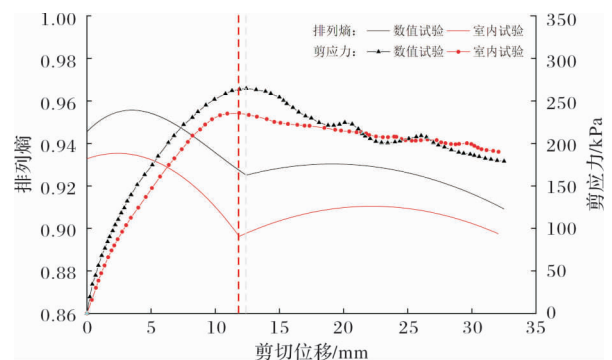


图 10 排列熵变化规律

Fig. 10 Permutation entropy change rule

4 结论

本文通过室内直剪试验和数值模拟相结合的方法,并引入 M-C 理论对土体的排列熵演化机理进行研究,探讨排列熵变化和土体排列特征的影响规律,主要得到以下结论:

(1)仅采用信息熵的定义对土体的排列熵进行计算具有很大的随机不确定性.本文引入 M-C 方法可以很好的避免这一问题,同时根据多项式的拟合曲线进行深入分析,对于揭示土体在剪切过程中的排列熵演化规律具有良好的可靠性.

(2)对4种不同结构类型的粗粒土试样在法向应力为206 kPa条件下进行剪切试验;试验结果表明:数值模拟试验与室内直剪试验中土体的排列分布演化规律具有良好的一致性,反映出利用数值模拟试验开展土体结构变化规律研究具有较好的可靠性。

(3)剪切过程中颗粒排列熵的变化具有一定的阶段性,且排列熵上下浮动范围较窄。在达到峰值应力前,各结构类型粗粒土排列熵随剪应力的增加均表现出先增大后减小的变化趋势;在达到峰值应力后,不同结构类型粗粒土的排列熵随着剪应力的减小均表现出先增大后减小的变化趋势。表明剪切初始阶段,粗粒土颗粒排列分布的有序性增大后相对大幅降低;剪切后期,土体颗粒排列分布的有序性缓慢增大后逐步缓慢降低。整个剪切过程,粗粒土颗粒间排列分布的混乱程度相对降低。

(4)随着粗颗粒含量的增加,粗粒土试样的结构发生明显的变化,土体系统的排列熵值不断增大,这反映出粗粒土颗粒排列分布的有序性受剪切作用的影响较为强烈。

参考文献 References

- [1] 太沙基 K. 理论土力学[M]. 徐志英,译,北京:地质出版社,1960.
TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. XU Zhiying, Translated. Beijing: Geological Publishing House, 1960.
- [2] 郑星,敖大华,李裕忠,等. 砂卵石粗粒土颗粒外形特征测量与评定初探[J]. 岩土力学,2018,39(5): 1805-1810.
ZHENG Xing, AO Dahua, LI Yuzhong, et al. A preliminary study of measurement and evaluation of geometry characteristics of coarse gravel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1805-1810.
- [3] 程展林,左永振,丁红顺. CT技术在岩土试验中的应用研究[J]. 长江科学院院报,2011,28(3): 33-38.
CHENG Zhanli, ZUO Yongzhen, DING Hongshun. Application of CT technology in geotechnical mechanics[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(3): 33-38.
- [4] 王东伟,陆武萍,唐朝生,等. 砂土微观结构样品制备技术及量化方法研究[J]. 岩土力学,2019,40(12): 4783-4792.
WANG Dongwei, LU Wuping, TANG Chaosheng, et al. Sample preparation technique and microstructure quantification method for sandy soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(12): 4783-4792.
- [5] 赵鲁庆,杨更社,吴迪,等. 冻融黄土微观结构变化规律及分形特性研究[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(6): 1680-1690.
ZHAO Luqing, YANG Gengshe, WU Di, et al. Micro structure and fractal characteristics loess under freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(6): 1680-1690.
- [6] 聂志红,袁梦,王翔. 粗粒土的粒间孔隙特征与其影响因素的相关性研究[J]. 铁道科学与工程学报,2018,15(7): 1700-1707.
NIE Zhihong, YUAN Meng, WANG Xiang. Study on the correlation between intergranular pore characteristics and influencing factors of coarse grained soil[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(7): 1700-1707.
- [7] 李学丰,王奇,刘金峰,等. 考虑砂土颗粒形状的细观组构定量描述[J]. 中国公路学报,2016,29(10): 29-36,53.
LI Xuefeng, WANG Qi, LIU Jinfeng, et al. Quantitative description of microscopic fabric based on sand particle shapes[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(10): 29-36, 53.
- [8] 杨涵,徐文杰,张启斌. 散体颗粒介质变形局部化宏-细观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(8): 1692-1701.
YANG Han, XU Wenjie, ZHANG Qibin, et al. Macroand meso-mechanism of strain localization in granular material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8): 1692-1701.
- [9] 蒋中明,袁涛,刘德谦,等. 粗粒土渗透变形特性的细观数值试验研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(4): 752-758,706.
JIANG Zhongming, YUAN Tao, LIU Dengqian, et al. Mesoscopic numerical tests on seepage failure characteristics of coarse grained soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(4): 752-758, 706.
- [10] 胡敏云,肖斌,张旭俊,等. 粗粒土细观组构分析的影响因素研究[J]. 浙江工业大学学报,2018,46(3): 342-349.
HU Minyun, XIAO Bin, ZHANG Xujun, et al. Study on influential factors of micro-fabric analysis of granular sand[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2018, 46(3): 342-349.
- [11] SHANNON C E, WEAVER W. A mathematical the-

- ory of communication[J]. The Bell System Technical Journal, 1948, 27:379-423,623-656.
- [12] 施斌. 粘性土击实过程中微观结构的定量评价[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(4): 57-62.
SHI Bin. Quantitative assessment of changes of microstructure for clayey soil in the process of compaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(4): 57-62.
- [13] 曾志雄, 孔令伟, 田海, 等. 膨胀岩崩解特性的干湿循环效应与粒度熵表征[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1983-1989.
ZENG Zhixiong, KONG Lingwei, TIAN Hai, et al. Effect of drying and wetting cycles on disintegration behavior of swelling mudstone and its grading entropy characterization[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 1983-1989.
- [14] 陈旺旺, 李典庆, 唐小松, 等. 抗剪强度参数概率分布的最大熵估计及边坡可靠度分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1469-1478.
CHEN Wangwang, LI Dianqing, TANG Xiaosong, et al. Probability distribution of shear strength parameters using maximum entropy principle for slope reliability analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(4): 1469-1478.
- [15] 张璐璐, 张吉, 徐耀, 等. 岩土工程可靠度理论[M]. 上海: 同济大学出版社, 2011: 89-104.
ZHANG Lulu, ZHANG Ji, XU Yao, et al. Reliability theory of geotechnical engineering[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2011: 89-104.
- [16] WU L Z, LI S H, ZHANG M, et al. A new method for classifying rock mass quality based on MCS and TOPSIS[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78: 199.
- [17] 李绍红, 王少阳, 吴礼舟. 基于 MCS-TOPSIS 耦合模型的岩体质量分类研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1053-1062.
LI Shaohong, WANG Shaoyang, WU Lizhou. Quality classification of rock mass based on MCS-TOPSIS coupling model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1053-1062.
- [18] 吴为义. 颗粒材料组构的 DEM 模拟[C]//全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会, 珠海: 1988.
WU Weiyl. DEM simulation of granular material fabric[C]//National Symposium on Numerical Analysis and Analytical Methods of Rock and Soil Mechanics, Zhuhai: 1988.
- [19] 郭庆国. 关于粗粒土工程特性及其分类的探讨[J]. 水利水电技术, 1979(6): 53-57.
GUO Qingguo. Discussions on characteristics and classification of coarse grained soil[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1979, (06): 53-57.
- [20] 陈坚, 罗强, 张良, 等. 高速铁路基床表层级配碎石填料土体结构类型试验分析[J]. 铁道学报, 2015, 37(11): 82-88.
CHEN Jian, LUO Qiang, ZHANG Liang, et al. Experimental analysis on soil structure type of graded gravelly soil filling surface layer of subgrade of high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(11): 82-88.

(编辑 吴海西 沈 波)