

孔隙空间分布对粗粒土强度变形特性影响研究

胡有方^{1,2},袁俊平^{1,2*},卢毅^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;

2. 河海大学 江苏省岩土工程技术工程研究中心,江苏 南京 210098)

摘要: 为了深入认识粗粒土的强度变形机理,以孔隙结构的不均匀性为研究对象,通过分析孔隙的数量变异性、体积变异性和偏聚效应,定义了可以定量刻画粗粒土孔隙空间变异性的孔隙空间分布系数。并利用 PFC3D 和 Abaqus 软件进行了粗粒土的数值模拟三轴试验,结果表明:在其他条件不变时,随着孔隙空间分布系数增大 46.8%,粗粒土的弹性模量、峰值强度和泊松比均呈指数函数形式分别减小 40.8%,12.5%,39.5%,影响十分显著。

关键词: 粗粒土;PFC3D;孔隙结构特征;三轴剪切试验;强度变形特性

中图分类号: TU443

文献标识码: A

Influence of Pore Space Distribution on Strength and Deformation Characteristics of Coarse-Grained Soil

HU Youfang^{1,2}, YUAN Junping^{1,2*}, LU Yi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering,

Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Jiangsu Research Center for

Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: The macro strength and deformation characteristics of coarse-grained soil are closely related to its micro pore structure. In order to deeply understand the strength deformation mechanism of coarse-grained soil, this paper takes the heterogeneity of pore structure as the research object, and defines the pore space distribution coefficient which can quantitatively describe the pore space variability of coarse-grained soil by analyzing the quantitative variability, volume variability and segregation effect of pores. The results show that the elastic modulus, peak strength and Poisson's ratio of coarse-grained soil decrease by 40.8%, 12.5% and 39.5% respectively with the increase of pore space distribution coefficient under other conditions.

Key words: Coarse-grained soil; PFC3D; pore structure characteristics; triaxial shear test; strength deformation characteristics

粗粒土是一种典型的颗粒材料,由大量粒径不等、形状各异、排列随机的土石颗粒组成,微观上孔隙结构的多样性决定了其宏观物理力学性质的复杂性^[1]。因此可以说,粗粒土的变形过程实质上就是其孔隙结构变化的过程,如果能获得粗粒土的孔隙结构特征和变化规律,也就能掌握其变形规律^[2]。近年来,许多国内外学者对粗粒土的孔隙结构特征进行了研究,主要方法有实验法

和数值重构法^[3-4]。实验方法最早起源于1982年,Petrovic等^[5]首先在土壤的密度和含水率研究中引入CT扫描技术,之后,Warner^[6]则在对CT扫描图像的分析中发现,孔隙的位置、大小和数量信息都能由图像精确地揭示。在国内,学者吕菲^[7]等在扫描图像的基础上建立了孔隙网络模型,并成功预测了饱和土壤的水力学性质。相方园^[8]使用切片法进行试验,将孔隙拓扑结构与形态学理论

收稿日期:2020-11-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0404804);国家自然科学基金资助项目(51378008)

作者简介:胡有方(1995-),男,江苏无锡人,硕士研究生,研究方向为非饱和土、土石坝。

* 通讯作者:袁俊平(1975-),男,湖北麻城人,博士,教授,研究方向为非饱和土、土石坝、道路工程。

相结合,定量地获得了孔隙结构中的特征参数。与实验方法不同,数值重构法的思路是基于二维孔隙信息和不同的数学模拟算法建立三维孔隙结构模型,目前常用的方法有高斯随机场法^[9]、过程法^[10]和模拟退火法^[11]。比较成功的案例有 Piloti^[12]基于过程法,用一种主要适用于球体、椭球体、圆柱体和平行六面体的算法建立了任意形状颗粒的随机堆积体。曾建邦^[13]等利用改进的模拟退火法重建了含水沉积物的三维孔隙结构,并通过孔隙结构的特征化分析揭示了分布模式对沉积物特性的影响。

综上所述,目前的研究主要针对的是粗粒土孔隙结构特征的描述方法,因此,如何将粗粒土的孔隙结构特征与强度变形特性定量地联系起来,仍是有待探讨的问题。本文在前人的研究基础上,从孔隙空间分布的不均匀性出发进行研究,定义了可以定量刻画粗粒土孔隙空间变异性的孔隙空间分布系数 F_{SD} ;基于 PFC3D 离散元软件,分析了 F_{SD} 与粗粒土强度变形参数之间的关系;同时,基于 Abaqus 有限元软件,分析了 F_{SD} 在有限元计算中的适用性。

1 土体孔隙空间分布不均匀性的定量刻画

首先,粗粒土试样中各岩土颗粒和孔隙的位置可以通过扫描的方法得到^[14]。接下来,使用最大球算法^[15]对孔隙进行模拟,即对于每一部分孔隙,插入若干个以岩土颗粒为边界的最大内切球,使这些球充满孔隙空间。以各球体的质心作为孔隙的质心,以各球体的体积作为孔隙的体积,从而达到以大量规则的球体模拟不规则的孔隙体的目的,最大球算法的示意图如图 1 所示。

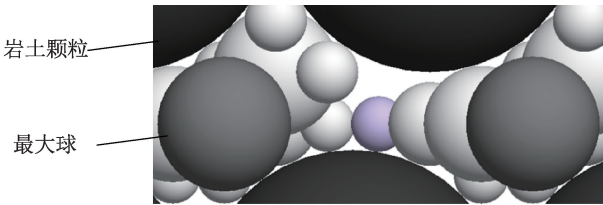


图 1 最大球算法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of maximum sphere algorithm

下一步,将土体划分为 N 个相同的区域对孔隙球体进行统计,由于粗粒土的不均匀性,每个区域内的孔隙数量和孔隙体积分布都不相同,因此引入孔隙数量变异系数 CV_n 和孔隙体积变异系数 CV_v ,两者的表达式分别为

$$CV_n = \frac{1}{\bar{n}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (n_i - \bar{n})^2} \quad (1)$$

$$CV_v = \frac{1}{\bar{v}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2} \quad (2)$$

式中, n_i 和 v_i 分别为每个区域内孔隙质心点的数量和孔隙体积, $\bar{n}$ 和 $\bar{v}$ 分别为各个区域内孔隙质心点的数量和孔隙体积的平均值, N 为区域个数。

CV_n 和 CV_v 可以较好地地将试样中孔隙数量的分布情况和孔隙体的分布情况反映出来,其值越小,则代表均匀性越好。理想情况下,孔隙分布完全均匀时,两者值为 0。但要注意的是,这两个参数本身无法反映出孔隙质心点在空间中的分布情况,因为存在偏聚现象,如图 2 所示, a 试样与 b 试样的 CV_n 和 CV_v 相同,但显然 a 试样的偏聚程度小于 b 试样。因此,还需要引入偏聚系数 β 来反映这种情况。

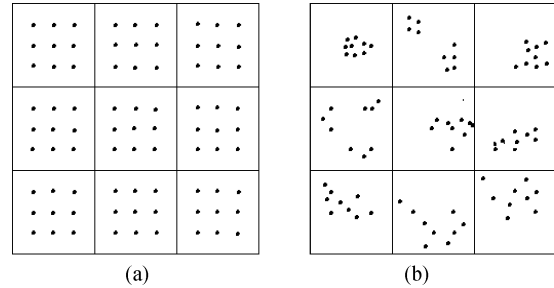


图 2 孔隙空间分布状态示意图

Fig. 2 Diagram of pore space distribution

本文选择最短距离法来进行偏聚系数的计算,定义 x_i 表示每个孔隙的质心和最邻近孔隙质心的距离,定义 $\bar{x}$ 为孔隙之间最短距离的平均值:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

式中: n 表示样本区域内孔隙总数量。

接着,用 x_0 表示试样中孔隙完全规则地分布在试样空间中时孔隙之间的距离,然而对于任意的 n 值, x_0 的值都难以计算,因此本文用下式代替:

$$x_0 = \sqrt[3]{\frac{6v}{n\pi}} \quad (4)$$

式中: v 表示样本区域内孔隙总体积。如此计算时, x_0 表示当 n 个相同尺寸的球体孔隙总体积与样本区域内孔隙总体积相等时这些孔隙的直径。

于是,偏聚系数 β 可以用下式计算:

$$\beta = \begin{cases} 1 - \frac{\bar{x}}{x_0} = \frac{x_0 - \bar{x}}{x_0} & (\bar{x} < x_0) \\ 1 - \frac{x_0}{\bar{x}} = \frac{\bar{x} - x_0}{\bar{x}} & (\bar{x} > x_0) \end{cases} \quad (5)$$

对于一部分孔隙数量确定的空间,其 x_0 为可以计算的定值。从上式可以看出,当孔隙分布较为集中时, $\bar{x}$ 小于 x_0 , 此时偏距系数 β 随着 $\bar{x}$ 的减小而增大;当孔隙分布较为分散时, $\bar{x}$ 大于 x_0 , 此时偏距系数 β 随着 $\bar{x}$ 的增大而增大。反之,如果孔隙分布较为均匀,则 $\bar{x}$ 与 x_0 接近,此时 β 值较小。

在得到了孔隙数量变异系数 CV_n , 孔隙体积变异系数 CV_v 以及偏聚系数 β 之后,本文定义孔隙空间分布系数 F_{SD} 作为综合性指标,从孔隙质心点空间分布的均匀性、孔隙体积空间分布的均匀性以及孔隙质心在空间上的偏聚程度三个方面综合反映孔隙空间的分布情况,其表达式定义为

$$F_{SD} = \beta \cdot CV_n \cdot CV_v \quad (6)$$

2 孔隙空间变异系数与土体强度变形参数关系研究

在定义了孔隙空间分布系数 F_{SD} 之后,为了研究其对土体宏观强度变形特性的具体影响,就需要定量分析 F_{SD} 与土体各项强度参数之间的关系。因此本节中基于 PFC3D 软件,建立了 5 组三轴压缩试验试样进行数值模拟实验。试样编号为 PK1—PK5,高度 $H=200$ mm,直径 $D=101$ mm。这些试样的总孔隙率相同,但各试样的内部分层情况不同,详细参数和示意图如图 3 所示。

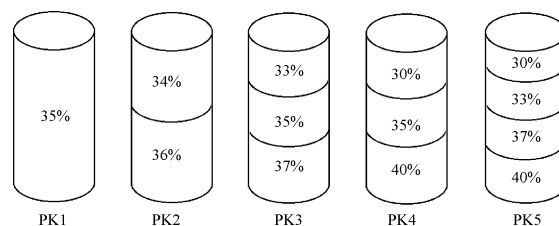
试样模型按照以下步骤建立:(1)将试样空间按照试验方案均分为指定层数,从最底层开始生成颗粒;(2)使用半径扩大法生成试验方案中指定孔隙率的土颗粒,在每层顶部多预留 5 cm 的高度;(3)赋予土颗粒重力加速度,使土颗粒在重力作用下自由下落形成堆积体;(4)赋予该层顶部墙体一定速度使其下落直至获得该层指定尺寸的试样,运行一定时步使试样达到稳定状态,该层试样生成完毕;(5)重复(2)—(4)步骤直至所有层的试样均生成完毕,删除中间墙体,运行一定时步使试样达到稳定状态,试样生成完毕。模型生成过程如图 4 所示。

完成试样的生成后,为了防止偶然误差给数值试验结果带来影响,对各试样进行多次对照试验,结果取平均值。最终统计各试样的孔隙空间分布系数 F_{SD} 如表 1 所示。

表 1 各试样孔隙空间分布系数

Tab. 1 Pore space distribution coefficient of each sample

试样编号	PK1	PK2	PK3	PK4	PK5
孔隙空间分布系数 $F_{SD}/10^{-3}$	1.333 4	1.515 2	1.642 2	1.791 3	1.958 6



注:数据为各层孔隙率。

图 3 不同孔隙空间分布影响效应试验方案示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test scheme for effect of different pore space distribution

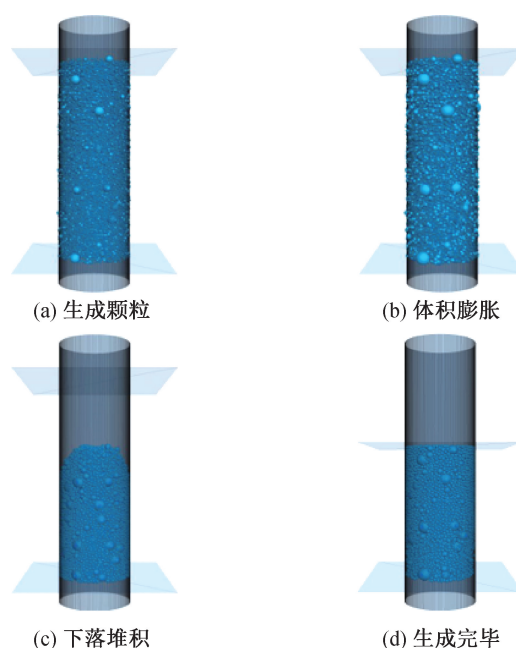


图 4 模型生成过程示意图

Fig. 4 Diagram of model generation process

从表 1 可以看出,在其他颗粒细观参数相同的条件下,各试样的孔隙空间分布系数因分层的不同而发生了明显的变化。试样 PK5 相对于试样 PK1,空间分布系数 F_{SD} 增大了 46.8%,说明该方法的合理性。

为了得到上述各试样的应力和应变曲线,对表中的各组试样进行围压 800 kPa 的三轴固结排水试验数值模拟,结果如图 5 和图 6 所示。

从图 5 和图 6 中可以看出,在其他颗粒细观参数相同的条件下,土体的弹性模量、峰值强度和泊松比都随着孔隙空间分布系数 F_{SD} 的增大而减小。试样 PK5 相对于试样 PK1,弹性模量减小 40.8%,

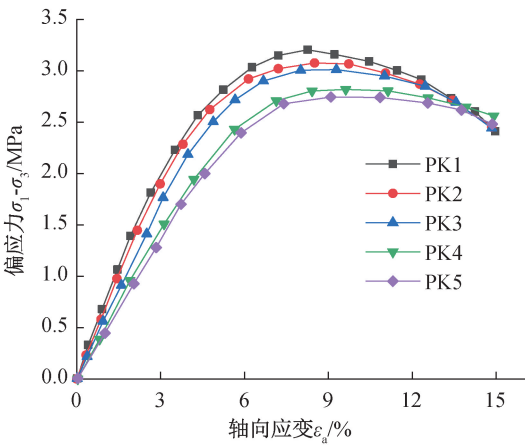


图 5 偏应力-轴向应变曲线
Fig. 5 Relationship between deviatoric stress and axial strain

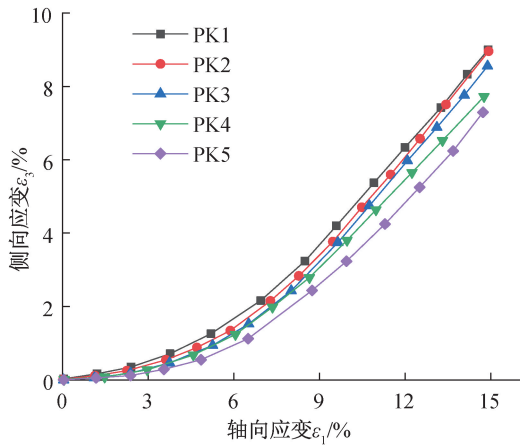


图 6 侧向应变-轴向应变曲线
Fig. 6 Relationship between lateral strain and axial strain

峰值强度降低 12.5%,泊松比减小 39.5%。

由于加载刚进行时,试样的偏应力-轴向应变曲线近似为一条直线,因此将试样轴向应变达到 1%时的割线模量作为试样的弹性模量。相关性分析结果表明,弹性模量 E 与孔隙空间分布系数 F_{SD} 之间呈指数函数关系,如式(7)。

$$E = A_1 + B_1 e^{r_1 F_{SD}} \tag{7}$$

用指数函数对试样弹性模量 E 和孔隙空间分布系数 F_{SD} 进行拟合,结果如图 7 所示,其中 A_1 的值为 94.062 2, B_1 的值为 -0.609 4, r_1 的值为 -2 071.968 1。

将轴向应变 1%时的切线泊松比作为试样的泊松比,相关性分析结果表明,泊松比 ν 与孔隙空间分布系数 F_{SD} 呈指数函数关系,如式(8)。

$$\nu = A_2 + B_2 e^{r_2 F_{SD}} \tag{8}$$

用指数函数对二者进行拟合,结果如图 8 所示,其中 A_2 的值为 0.034 3, B_2 的值为 -21.302 8,

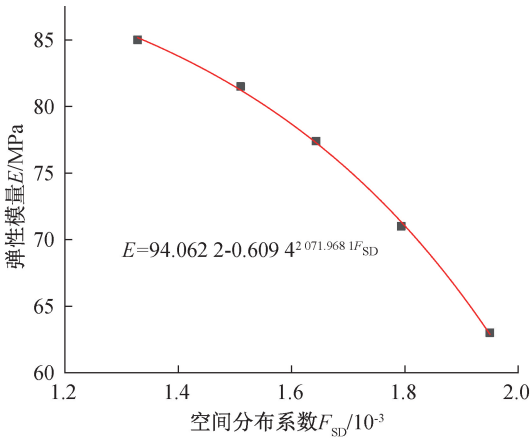


图 7 弹性模量随空间分布系数变化曲线
Fig. 7 Relationship between elastic modulus and pore space distribution coefficient

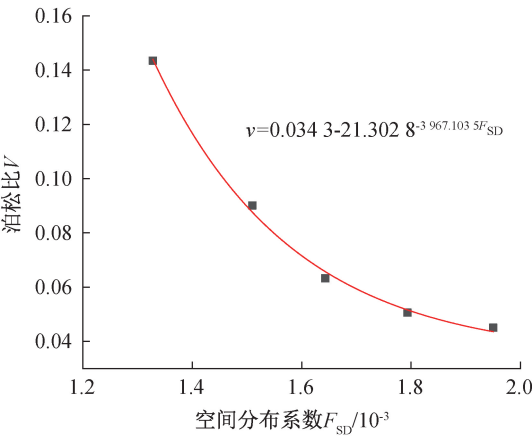


图 8 泊松比随空间分布系数变化曲线
Fig. 8 Relationship between Poisson's ratio and pore space distribution coefficient

r_2 的值为 -3 967.103 5。

为了得到各试样的内摩擦角,在围压 200、800 和 2 000 kPa 的条件下,对各试样进行三轴试验数值模拟,得到了各试样在不同围压下的峰值强度。根据莫尔-库伦强度理论,各试样的内摩擦角如表 2 所示。

表 2 各试样内摩擦角					
Tab. 2 Internal friction angle of each sample					
试样编号	PK1	PK2	PK3	PK4	PK5
内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	36.91	36.53	35.87	35.12	34.25

为了研究试样内摩擦角与孔隙空间分布系数之间的定量关系,对内摩擦角与孔隙空间分布系数进行相关性分析,发现两者之间呈指数函数关系,如式(9)。

$$\varphi = A_3 + B_3 e^{r_3 F_{SD}} \tag{9}$$

用指数函数对试样内摩擦角和空间分布系数进行拟合,结果如图 9 所示,其中 A_3 的值为 38.469 2, B_3 的值为 -0.156 7, r_3 的值为 1 705.456 1。

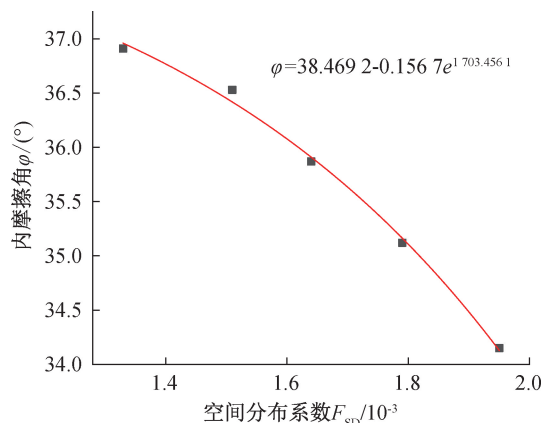


图 9 内摩擦角随孔隙空间分布系数变化曲线

Fig. 9 Relationship between internal friction angle and pore space distribution coefficient

3 孔隙空间分布系数的准确性验证与分析

本节中使用 Abaqus 有限元软件对孔隙空间分布系数 F_{SD} 计算方法的准确性进行验证。相比于离散元方法,有限元方法更适合大规模的工程计算,这是由于有限元将粗粒土复杂的几何结构简化为了具有简单形状的单元,单元内的材料性质和控制方程通过单元节点的未知量来进行表达,从而使得计算的效率大大提高,然而这也使得有限元计算时忽略或低估了孔隙空间分布系数 F_{SD} 的影响。那么孔隙空间分布系数 F_{SD} 是否可以被忽略,是否可以使用 Abaqus 有限元软件进行孔隙空间变异性的模拟,这是本节中要讨论的问题。

为了解决此问题,建立编号分别为 A1—A5 的 5 种三轴固结排水实验试样,试样的高度、直径均与 PK1—PK5 相同。同时,通过上节中的结果推算出试样的弹性模量、泊松比、内摩擦角,使得两组试样的等效强度参数全部相同,具体数值如表 3 所示。最后,设置试样的孔隙率均为 35%,使其为均匀试样。

表 3 A1—A5 试样强度参数

Tab. 3 Strength parameters of sample A1—A5

试样编号	A1	A2	A3	A4	A5
弹性模量 E/MPa	84.9	80.5	76.3	69.6	59.3
泊松比 ν	0.231	0.144	0.088	0.065	0.052
内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	36.91	36.53	35.87	35.12	34.25

对试样施加 800 kPa 的围压时,各试样的偏应力-轴向应变曲线如图 10 所示。

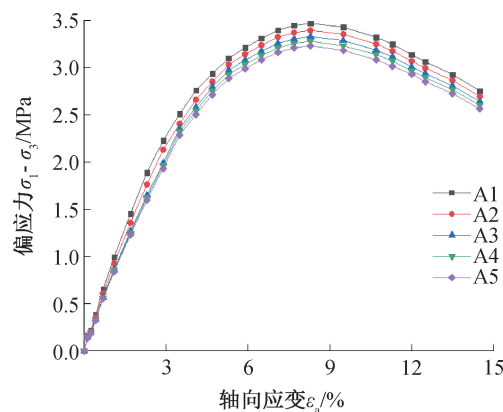


图 10 试样 A1—A5 偏应力-轴向应变曲线

Fig. 10 Relationship between deviatoric stress and axial strain of sample A1—A5

从图 10 中可以看出,由于试样 A1—A5 忽略了孔隙空间分布系数 F_{SD} ,消除了空间分布差异对强度的不利影响,使得虽然试样的各项强度参数均与离散元计算时相同,但试样破坏时的偏应力均偏大,并且随着离散元试样中 F_{SD} 的增加,这种差异更加明显。试样 A1 相比试样 PK1,破坏时的偏应力增大了 1.6%,试样 A5 相比试样 PK5,破坏时的偏应力增大了 12.0%。

为了降低有限元单元的均匀性,增加孔隙空间分布系数的影响,采用上节图 3 中的分层方法建立 5 种三轴固结排水实验试样 B1—B5,在前者的基础上额外考虑不同土层孔隙率的差异。同样对试样施加 800 kPa 的围压时,各试样的偏应力-轴向应变曲线如图 11 所示。以试样 5 为例,将三次试验的结果进行比较,如图 12 所示。

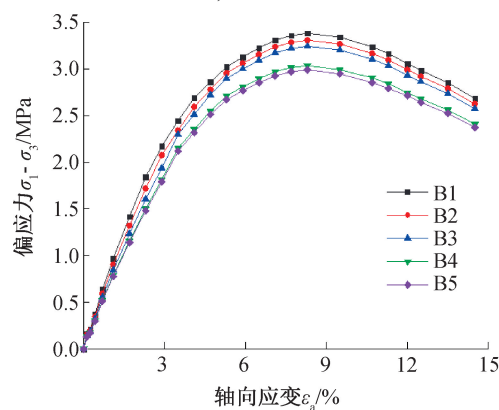


图 11 试样 B1—B5 偏应力-轴向应变曲线

Fig. 11 Relationship between deviatoric stress and axial strain of sample B1—B5

从图 11 中可以看出,对于考虑分层的有限元试样,其峰值强度相比均匀的有限元试样有所降低,但仍然比离散元试样大。这是因为,虽然分层

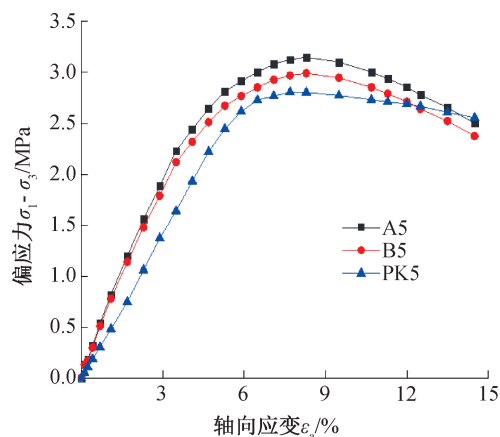


图12 试样A5,B5,PK5偏应力-轴向应变曲线

Fig. 12 Relationship between deviatoric stress and axial strain of sample A5,B5,PK5

增加了层与层之间的孔隙空间分布差异,但单独每个层内的孔隙仍然是均匀的,其 F_{SD} 虽然大于0,但仍小于离散元试样。

从图12中可以看出,对试样5来说,虽然三次试验的等效强度完全相同,但三次试验的峰值偏应力分别为2.74、3.07、2.99 MPa。再次验证了试样的峰值强度随着孔隙空间分布系数 F_{SD} 的增大而减小的规律,并进一步论证了孔隙空间分布系数 F_{SD} 计算方法的合理性。同时也说明,在试样离散型较大时,不应当忽略孔隙空间分布变异性的影响。

4 结论

1) 孔隙空间分布系数 F_{SD} 可以较好地模拟粗粒土中孔隙空间分布的不均匀性。这种不均匀性包括孔隙质心点空间分布的不均匀性、孔隙体积空间分布的不均匀性以及孔隙质心在空间上不同的偏聚程度,因此 F_{SD} 是一项比较系统的综合性指标。

2) 孔隙空间分布系数 F_{SD} 在离散元和有限元分析中均能得到较好的运用。在其他颗粒细观参数相同的条件下,土体的弹性模量、峰值强度和泊松比都随着孔隙空间分布系数 F_{SD} 的增大呈指数函数形式减小。

参考文献:

- [1] 董云. 土石混合料强度特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1269-1274.
- [2] KJAERNSLI B, SANDE A. Compressibility of Some Coarse-grained Materials[C]//Proc Eur Conf Soil Mech Found Eng, 1963, 1: 245-251.
- [3] 刘汉龙, 秦红玉, 高玉峰, 等. 堆石粗粒料颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 562-566.
- [4] 董云. 土石混合料强度特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1269-1274.
- [5] PETROVIC A M, SIEBERT J E, RIEKE P E. Soil Bulk Density in Three Dimensions by Computed Tomographic Scanning[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(3): 445-450.
- [6] WARNER G S, NIEBER J L, MOORE I D, et al. Characterizing Macropores in Soil by Computed Tomography[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(3): 653-660.
- [7] 吕菲, 刘建立, 何娟. 利用CT数字图像和网络模型预测近饱和土壤水力性质[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 10-14.
- [8] 相方园. 土壤孔隙网络模型的程序设计与实现[J]. 湖北农业科学, 2009, 48(4): 974-978.
- [9] JOSHI M Y. A Class of Stochastic Models for Porous Media[D]. University of Kansas, 1974.
- [10] 周怡佳, 滕奇志, 唐棠. 基于改进模拟退火算法的岩石薄片图像三维重建[J]. 石油矿场机械, 2007, 36(11): 13-16.
- [11] REN P E, BAKKE S. Process Based Reconstruction of Sandstones and Prediction of Transport Properties[J]. Transport in Porous Media, 2002, 46(2-3): 311-343.
- [12] PILOTTI M. Reconstruction of Clastic porous Media[J]. Transport in Porous Media, 2000, 41(3): 359-364.
- [13] 曾建邦, 胡高伟, 李隆键, 等. 含天然气水合物沉积物三维孔隙结构[J]. 天然气工业, 2016, 36(5): 128-135.
- [14] 贾超, 何玥, 狄胜同, 等. 固结条件下黏性土微观孔隙结构试验研究[J]. 实验力学, 2019, 34(03): 397-405.
- [15] 解朝阳, 张巍, 姚东方, 等. 基于最大球算法定量表征土体空间孔隙网络[J]. 工程地质学报, 2020, 28(01): 60-68.

(责任编辑 王利君)