

四参数随机生长法参数对多孔介质建模的影响

李明^{1,2}

(1. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2. 福建理工大学 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 四参数随机生长 (quartet-parameter structure generation set, 简称 QSGS) 法是目前较常用的多孔介质建模算法, 多孔介质的分形维数 D 和孔隙自相关距离 λ 是评价建模效果的两个重要指标, 目前缺乏关于 QSGS 法建模参数与多孔介质分形维数、孔隙自相关距离间关系的研究。首先, 提出了一种生长核分布概率归一化处理办法, 在此基础上设计了一套不同网格尺寸 N 、孔隙率 ϕ 、归一化生长核分布概率 P_η 组合下多孔介质建模的数值模拟方案; 然后, 基于数值模拟结果分析了 D 、 λ 随建模参数 N 、 ϕ 、 P_η 的变化规律, 并基于正交试验分析了建模参数的敏感性; 最后, 构建了建模参数 N 、 ϕ 、 P_η 与 D 、 λ 的拟合关系。结果显示, 建模参数 N 、 ϕ 、 P_η 对 D 均有一定程度的影响, 且 ϕ 的影响最大, P_η 的影响其次, N 的影响最小; λ 的最主要影响因素是 P_η , 其他参数的影响较小。所构建的多元回归拟合模型精度较高, 可以用于指导 QSGS 法的建模。

关键词: 四参数随机生长法; 分形维数; 自相关距离; 多元回归拟合

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2026) 01-0349-10

Influence of quartet-parameter structure generation set method parameters on porous media modeling

LI Ming^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350118, China;

2. Key Laboratory of Underground Engineering of Fujian Provincial Universities, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350118, China)

Abstract: The quartet-parameter structure generation set (QSGS) method is a commonly used modeling algorithm for porous media. The fractal dimension D and pore autocorrelation distance λ of porous media are important indicators for evaluating modeling effect. There is currently a lack of research on the relationship between the parameters of the QSGS method and the fractal dimension, as well as the pore autocorrelation distance of porous media. A method for normalizing the probability distribution of the cores of growth phase is proposed, and a set of numerical simulation schemes for modeling porous media with different grid sizes N , porosities ϕ and normalized distribution probability P_η is designed on this basis. Then the variations of D and λ with the modeling parameters N , ϕ and P_η are analyzed based on the numerical simulation results, and the sensitivity of the modeling parameters is analyzed based on the orthogonal tests. Finally, the fitting relationships between the modeling parameters N , ϕ , P_η and D , λ are established. The results show that the modeling parameters N , ϕ and P_η all have a certain degree of influence on D , and the degree of influence is ϕ , P_η and N in descending order. The main influencing factor of λ is P_η , and the other parameters have less influence. The constructed multiple regression fitting models have high precision and can be used to guide the modeling of the QSGS method.

Keywords: quartet-parameter structure generation set method; fractal dimension; autocorrelation distance; multiple regression fitting

1 引言

多孔材料内部复杂的孔隙结构对其变形、破坏、渗流、传热等性质有重要影响, 构建合理的孔隙结构模型是建立多孔材料渗透系数、导热系数等物理量预测模型的前提^[1-2]。多孔介质的孔隙结构可以通

过压汞试验、CT 扫描、核磁共振等^[3-5]手段获得, 但因其价格较高, 且费时、费力等原因未被广泛的采用。研究人员^[6-10]提出采用数值模拟重构多孔介质的方法解决了这一难题, 其具有建模速度快、结果可直观显示等诸多优点, 相关学者基于模拟退火算法^[6]、Monte-Carlo 法^[7]、随机生长法^[8-10]等提出

了多种重构技术,其中 Wang 等^[8-9]提出的四参数随机生长法 (quartet structure generation set, 简称 QSGS 法) 可对任意尺度的孔隙结构进行建模,具有良好的尺度扩展性,因而在岩土材料孔隙结构建模中得到广泛应用^[11-13],但实际应用中建模参数的选择比较随意。

分形维数和孔隙自相关距离是目前最常用的描述多孔介质孔隙结构复杂性的两个参数^[12,14]。分形维数能定量描述孔隙分布的自相似性,在一定程度上表征了孔隙分布的规律性特征;而孔隙间自相关距离能定量描述孔隙分布的空间变异性,其代表了孔隙分布的随机性特征。因此,深入研究重构方法建模参数与分形维数、孔隙自相关距离之间的关系,对多孔介质重构时建模参数的合理选择具有重要指导意义。朱维伟等^[15]研究了 QSGS 法建模时孔隙率、生长方向概率对多孔介质模型分形维数、多重分形谱的影响,结果显示孔隙度与分形维数在双对数坐标下高度线性相关。张季如等^[16]结合扫描电镜数据研究了 QSGS 法建模时孔隙度、生长核分布概率、生长方向概率等对多孔介质模型分形参数的影响,结果显示生长核分布概率的影响最为显著。王雪^[17]依据合肥地区黏土的颗粒及孔隙分布特征,基于 QSGS 方法重构了土体的微观结构,分析了网格密度对孔隙自相关距离的影响,建议网格尺寸选取至少要大于 200×200 个格点。

目前,关于 QSGS 法建模参数对多孔介质模型分形维数和孔隙自相关距离影响的研究相对较少,已有的研究都是定性规律的分析,缺乏全面、系统、量化的研究,这导致使用 QSGS 法建模时参数选择比较随意。针对这一问题,本文拟系统研究 QSGS 法中模型尺寸、孔隙率、生长核分布概率等参数对多孔介质模型分形参数、孔隙自相关距离的影响规律,并对建模参数的敏感性进行分析,最终构建建模参数与分形维数、孔隙自相关距离的定量关系。

2 QSGS 法原理

对于仅由孔隙和固体颗粒组成的多孔介质, QSGS 法通过设置生长核分布概率 P_c 、生长概率 P_i ($i=1 \sim 8$) 和孔隙率 φ 等参数,选择固体颗粒为生长相,孔隙为非生长相生成多孔介质模型,具体建模步骤如下^[8-10]。

(1) 选择模型尺寸: 对于二维平面多孔介质模型,一般选择在 $N \times N$ 个格点上建模,其中 N 为网格尺寸一般取正整数,通常取 200、300、...

(2) 设置初始固相生长核: 在 $N \times N$ 个格点上,

以概率 P_c 随机分布固相生长核, P_c 的值不应大于固体颗粒面积的百分比,即 $P_c \leq 1 - \varphi$ 。

(3) 固相生长核随机生长: 选择任意固相生长核,按给定的方向生长概率 P_i 向 8 个相邻点方向生长 (图 1),对于各项同性孔隙结构,一般取 $P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = 4P_5 = 4P_6 = 4P_7 = 4P_8$ 。

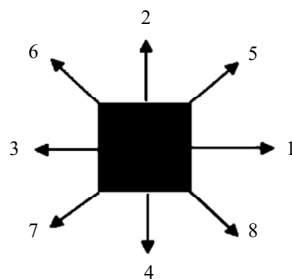


图 1 固相生长核的 8 个生长方向

Fig.1 Eight growth directions of solid-phase growth cores

(4) 迭代建模: 重复步骤 (3) 直到孔隙面积占比达到给定的孔隙度 φ 。

QSGS 法构建的多孔介质模型常被应用于基于格子玻尔兹曼方法 (lattice Boltzmann method, 简称 LBM) 的渗流、扩散等计算中,计算过程中相关物理参数采用无量纲处理,计算完成后通过单位转换确定最终的结果。Succi^[18]、阙云^[19]等详细地介绍了真实单位与格子单位的转换方法。因此, QSGS 法结合具体问题可应用于任意尺度的建模,并在无量纲格子单位下进行相关计算,通过单位转换方法最终获得真实单位下的对应计算结果。

3 多孔介质模型分形维数及孔隙自相关距离数值模拟

3.1 多孔介质模型分形维数计算原理

分形维数 D 常被用来描述多孔介质孔隙结构的复杂性,但依据严格的数学定义,其值往往较难计算,因此许多等价的或近似的分形维数被提出,其中应用最广的是计盒维数 D_B 。计盒维数 D_B 是一种通过像素点覆盖估算得到的多孔介质分形维数,通过 QSGS 方法得到 $N \times N$ 的多孔介质模型像素矩阵 M ,矩阵元素值仅由 0、1 组成,一般 0 表示孔隙,1 表示固体颗粒, D_B 计算方法如下^[20-21]。

(1) 像素点逐级覆盖: 选择大小为 $k \times k$ 的矩阵对矩阵 M 进行不重叠覆盖划分,得到一系列的子矩阵;统计子矩阵中至少包含 1 个 0 元素的矩阵总数 S_k ;选取不同的 k 值,从而获得一系列数据点 ($1/k, S_k$),其中 k 为不大于 $0.5N$ 的正整数。

(2) 拟合确定分形维数: 在双对数坐标系中采用最小二乘法对数据点 $(1/k, S_k)$ 进行拟合, 所得直线斜率即为计盒维数 D_B 。

本文中多孔介质模型的分形维数 D 由计盒维数 D_B 确定。

3.2 多孔介质模型孔隙自相关距离计算理论

多孔介质的孔隙分布具有空间变异性, 不同区域的孔隙特征不完全相同, 但又具有某种联系。这种空间变异性一般用孔隙两点自相关距离 λ 来表示, 可以通过孔隙两点空间相关函数 $S(d)$ 确定, 具体计算步骤如下:

(1) 计算孔隙相关函数 $S(d)$: $S(d)$ 表示随机选定的距离为 d 的两点均为孔隙的概率。Berryman^[22] 提出了 $S(d)$ 的理论计算公式, 但其计算量较大, 因此学者^[23-24] 提出了基于 Monte Carlo 抽样的计算方法, 计算原理见图 2。首先随机选择一点 P_1 并随机生成角度 θ , 然后在给定的距离 d 下确定另一随机点 P_2 , 记录 N_s 次 Monte Carlo 抽样试验后每一个给定的距离 d 下 P_1 、 P_2 点均为孔隙相的次数 N_t , 然后基于下式确定孔隙两点相关函数 $S(d)$:

$$S(d) = N_t / N_s \quad (1)$$

式中: N_s 为总的模拟次数, 为保证结果可靠性建议大于 10^4 。

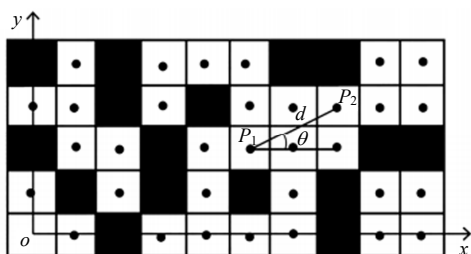


图2 孔隙2点间相关函数计算原理

Fig.2 Calculation principle of correlation function between two points of pores

为解决抽样过程图2中 P_2 点可能落入像素矩阵外的情况, 编程时建议采用周期性边界条件(图3), 图中红色线框内为多孔介质模型, 周边为多孔介质模型的镜像, 当图2中 P_2 点落入红色线框外时以镜像方式寻找其在线框内多孔介质模型中的对应点, 并将计算结果取整到格点处。

(2) 计算自相关函数 $R(d)$: $R(d)$ 表示空间任意两点的相关性。获得 $S(d)$ 的值后, 可以由下式进一步求解孔隙两点自相关函数 $R(d)$:

$$R(d) = \frac{S(d) - \varphi^2}{\varphi - \varphi^2} \quad (2)$$

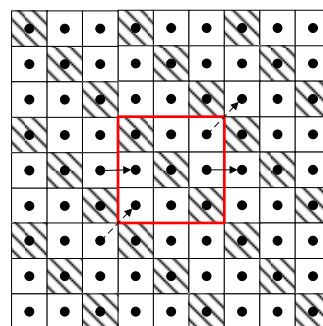


图3 周期性边界示意图

Fig.3 Schematic diagram of periodic boundary

(3) 拟合确定孔隙两点自相关距离 λ : 求得 $R(d)$ 的值后, 选择某种特定的函数型式进行拟合确定孔隙两点自相关距离 λ 。常见的自相关函数型式有指数型、高斯型、二阶自回归型^[25], 本文选择指数型:

$$R(d) = \exp(-d/b) \quad (3)$$

$$\lambda = 2b \quad (4)$$

式中: b 为拟合参数, 一般采用最小二乘法拟合求解获得。

3.3 数值模拟方案

采用 QSGS 法建模时生长核分布概率 P_c 的变化范围为 $[1/(N \times N), 1 - \varphi]$, 即要保证建模范围内的格点上至少有一个固相生长点又不能大于固相占比, 为便于分析将其进行归一化处理:

$$P_\eta = \frac{P_c - 1/(N \times N)}{(1 - \varphi) - 1/(N \times N)} \quad (5)$$

式中: P_η 为归一化的生长核分布概率。

对于一个拟重构的多孔介质模型, 采用 QSGS 法建模时, N 、 φ 往往是在建模之前就给定的, 故 P_η 的值仅由 P_c 决定。

参考文献[8-13, 15-17], 本文采用表1所示参数构建二维各向同性多孔介质模型。文献[8-9]的研究结果显示, 由于较小的 P_η 能产生更精细的多孔介质模型, 因此 P_η 在较小时取值间距更小。文献[8-10]的研究结果显示生长概率 P_i 仅影响建模速度, 故此处取值为定值。

表1 QSGS 法建模参数取值

Table 1 Parameter values for QSGS method modeling				
N	P_η	φ	$P_1 \sim P_4$	P_5, P_6
200, 300, ..., 1 000	0.005, 0.01, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.2, 0.4, 0.6	0.05, 0.10, ..., 0.50	0.1	0.025

按下述步骤进行多孔介质建模及计算, 首先基

于表 1 列出参数 N 、 P_η 、 φ 、 P_i 所有可能的组合, 然后对每一组 (N 、 P_η 、 φ 、 P_i) 参数, 采用 QSGS 法构建 30 个多孔介质模型, 最后计算 30 个多孔介质模型的分形维数 D_1 、 D_2 、...、 D_{30} 及孔隙两点自相关距离 λ_1 、 λ_2 、...、 λ_{30} , 将平均值 $\bar{D}$ 、 $\bar{\lambda}$ 记为参数组合 (N 、 P_η 、 φ 、 P_i) 下对应的多孔介质模型的 D 、 λ 。

4 建模参数对分形维数及孔隙自相关距离的影响

4.1 不同建模参数下的多孔介质模型特征

采用 QSGS 法构建二维各向同性多孔介质模型时, 不同建模参数会生成空间结构特征各异的多孔介质模型。图 4~6 展示了不同建模参数 N 、 P_η 、 φ 生成的多孔介质模型的孔隙及对应孔隙骨架特征。

由图 4~6 可知, 随着建模参数 N 、 P_η 的增大, 多孔介质模型中的孔隙变的更加密集, 孔隙骨架的分支则变的越来越多; 随着 φ 的增大, 多孔介质模型中的孔隙所占比例逐渐提高, 从而导致孔隙显得更大、更加分散, 但其孔隙骨架的分支变得来越

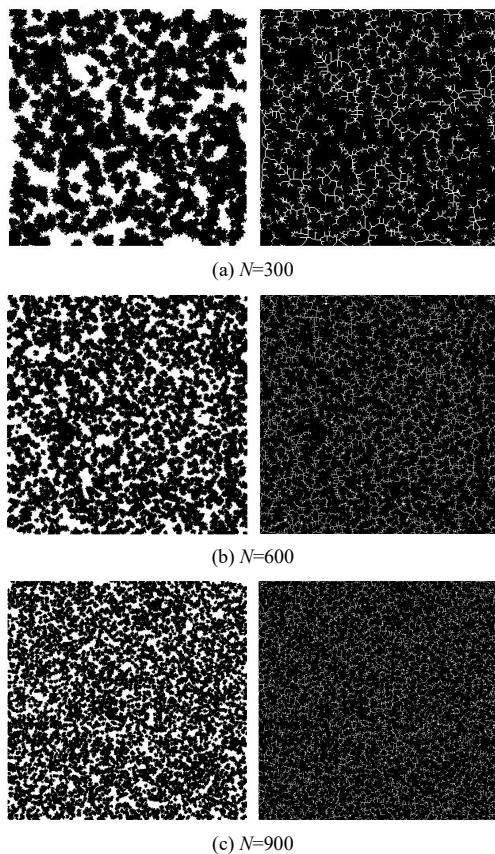


图 4 N 对多孔介质模型特征影响 ($\varphi=0.3$, $P_\eta=0.01$)
Fig.4 Influences of N on the characteristics of porous media models ($\varphi=0.3$, $P_\eta=0.01$)

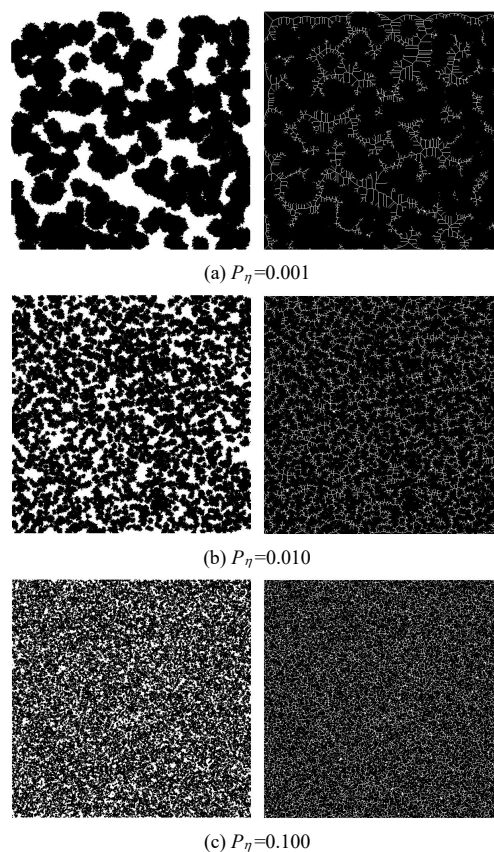


图 5 P_η 对多孔介质模型特征影响 ($N=600$, $\varphi=0.3$)
Fig.5 Influences of P_η on the characteristics of porous media models ($N=600$, $\varphi=0.3$)

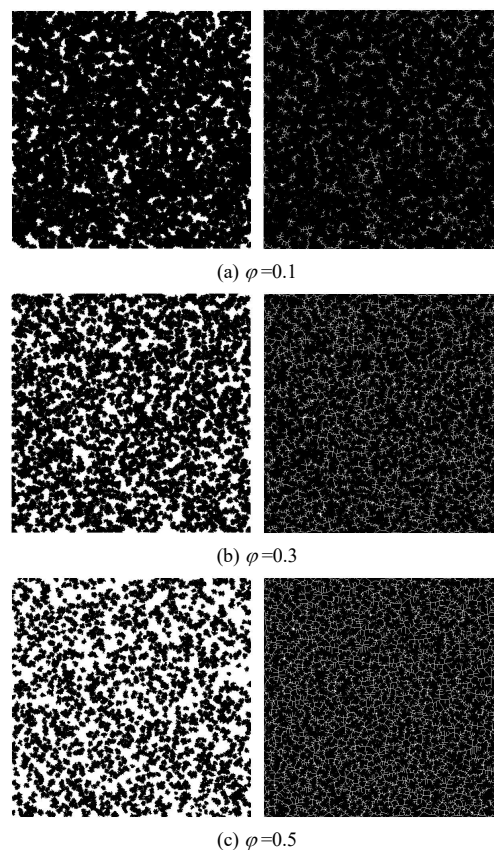


图 6 φ 对多孔介质模型特征影响 ($N=600$, $P_\eta=0.01$)
Fig.6 Influences of φ on the characteristics of porous media models ($N=600$, $P_\eta=0.01$)

多。孔隙骨架一定程度上能够反映孔隙结构的复杂性, 孔隙骨架分支越多越密集, 则孔隙结构越复杂, 故随着建模参数 N 、 P_η 、 φ 的变大, 基于 QSGS 法构建的多孔介质模型的孔隙结构变得更加复杂。

4.2 建模参数对分形维数的影响

分形维数 D 是描述多孔介质孔隙结构复杂性最常用的参数, 基于 3.3 节数值模拟计算结果, 图 7~9 展示了 D 随建模参数 N 、 P_η 、 φ 的变化规律, 其中为了便于展示, 将 P_η 转换为了对数坐标。限于篇幅, 此处只展示了部分计算结果, 其余情况变化规律类似。

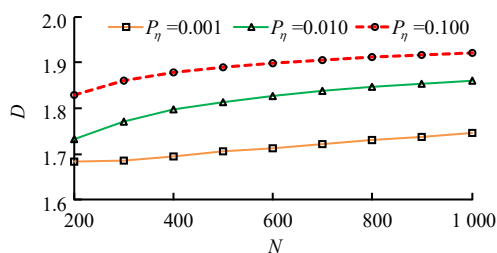


图7 D 随 N 的变化规律 ($\varphi=0.3$)

Fig.7 Variation pattern of D with N ($\varphi=0.3$)

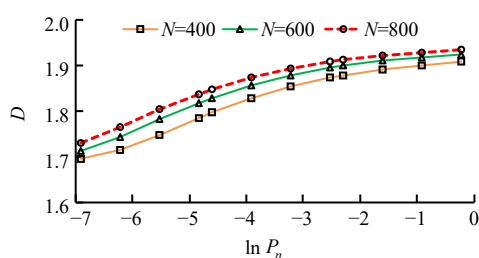


图8 D 随 P_η 的变化规律 ($\varphi=0.3$)

Fig.8 Variation pattern of D with P_η

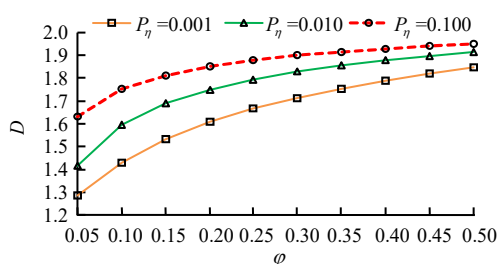


图9 D 随 φ 的变化规律 ($N=600$)

Fig.9 Variation pattern of D with φ ($N=600$)

由图 7~9 可知, 建模参数 N 、 P_η 、 φ 对 D 的影响规律一致, 即 D 随着建模参数 N 、 P_η 、 φ 的变大而逐渐变大, 这主要是由于建模参数较大时, 所构建的多孔介质模型的孔隙结构更为复杂, 从而导致其分形维数更大, 这与文献[15]的相关规律类似。建模参数较小时, D 的增长速率较快, 随着参

数变大, D 的增长速率逐渐放缓, 说明建模参数较小时对 D 的影响更为敏感。

4.3 建模参数对孔隙两点自相关距离的影响

多孔介质孔隙分布的空间变异性常采用孔隙两点自相关距离 λ 表示, 基于 3.3 节数值模拟计算结果, 图 10~12 给出了建模参数 N 、 P_η 、 φ 对 λ 的影响规律。限于篇幅, 此处只展示了部分计算结果, 其余情况变化规律类似。

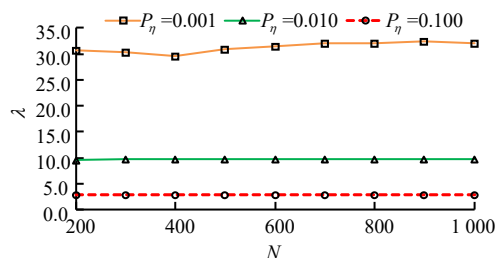


图10 λ 随 N 的变化规律 ($\varphi=0.3$)

Fig.10 Variation pattern of λ with N ($\varphi=0.3$)

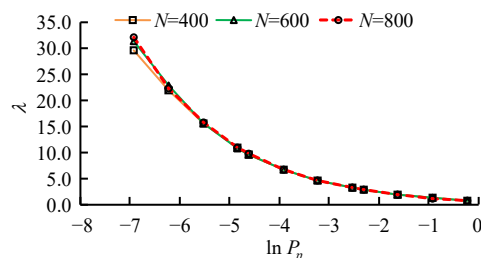


图11 λ 随 P_η 的变化规律 ($\varphi=0.3$)

Fig.11 Variation pattern of λ with P_η ($\varphi=0.3$)

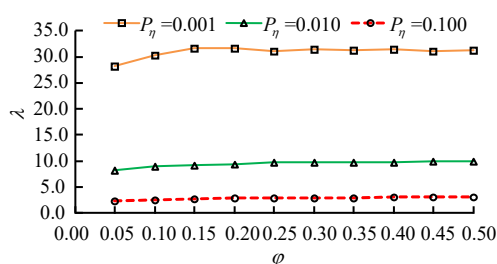


图12 λ 随 φ 的变化规律 ($N=600$)

Fig.12 Variation pattern of λ with φ ($N=600$)

由图 10~12 可知, λ 基本不随建模参数 N 、 φ 发生变动, 而随建模参数 P_η 的变大而逐渐减小, 这可能与 QSGS 法的建模特征有关, P_η 很大程度上决定了固相的空间分布特征, 从而在一定程度上决定了孔隙结构的变异性。由图 4 可知, 当 P_η 较小时, 多孔介质模型的孔隙一般较大, 从而 λ 也相对较大; 当 P_η 变大时, 多孔介质模型的孔隙变的较为密集, 从而使得 λ 变小。

5 建模参数与分形维数及两点间自相关距离拟合关系

5.1 建模参数的敏感性分析

由 4.2、4.3 节的结果可知, QSGS 法建模参数 N 、 P_η 、 φ 对多孔介质模型的 D 、 λ 有不同程度的影响, 采用敏感性方法对不同建模参数的影响程度进行定量分析。基于正交试验的敏感性分析, 由于具有所需试验方案少、结果准确等优点, 而在岩土工程领域得到了广泛的应用^[26-27]。对于 3 因素试验, 其对应的正交表为 3 因素 2 水平正交表 $L_4(2^3)$ 。由于其仅有 4 次试验计算结果可能不够准确, 因此为保证分析结果的准确性, 应该增加试验次数并确保试验之间的正交性, 故通常在 3 因素的基础上增加空白因素的方法生成正交表, 本文选择 4 因素 3 水平的正交试验表 $L_9(3^4)$, 其中一个因素为空白因素, 相关因素及水平见表 2。

基于 3.3 节的数值模拟结果获得各正交试验下多孔介质模型的 D 、 λ 值 (表 3), 并进一步得到多孔介质模型的 D 、 λ 影响因素的极差 (表 4)。

表 2 正交试验因素及水平

Table 2 Factors and levels of orthogonal experiments

N	P_η	φ	B
200, 600, 1 000	0.001, 0.01, 0.1	0.1, 0.3, 0.5	1, 2, 3

注: B 为空白因素, 目的是保证试验的正交性。

表 3 正交试验方案及结果

Table 3 Schemes and results of orthogonal experiments

试验号	因素				结果	
	N	P_η	φ	B	D	λ
1	200	0.001	0.1	1	1.445	25.28
2	200	0.010	0.3	2	1.732	9.61
3	200	0.100	0.5	3	1.914	2.98
4	600	0.001	0.3	3	1.713	31.37
5	600	0.010	0.5	1	1.912	9.96
6	600	0.100	0.1	2	1.752	2.53
7	1 000	0.001	0.5	2	1.865	32.24
8	1 000	0.010	0.1	3	1.664	8.99
9	1 000	0.100	0.3	1	1.920	2.90

表 4 多孔介质模型的 D 、 λ 影响因素的极差

Table 4 Ranges of influencing factors for D and λ in porous media models

D				λ			
R_N	R_{P_η}	R_φ	R_B	R_N	R_{P_η}	R_φ	R_B
0.119	0.188	0.295	0.023	2.085	26.826	2.797	2.079

用 R_N 、 R_{P_η} 、 R_φ 、 R_B 分别表示 D 、 λ 影响因素 N 、 P_η 、 φ 、 B 的极差。由表 4 可知, D 影响因素极差由大到小依次为 $R_\varphi > R_{P_\eta} > R_N > R_B$, 即 φ 的影响

最大、 P_η 的影响次之、 N 的影响最小, 而 3 个因素的极差值相差不大, 故 N 、 P_η 、 φ 对 D 均有一定程度的影响。

λ 的影响因素的极差由大到小依次为 $R_{P_\eta} > R_\varphi > R_N > R_B$, 即 P_η 的影响最大, φ 的影响次之, N 的影响最小, 且 R_{P_η} 的值远远大于 R_φ 、 R_N , 故 P_η 是 λ 的最重要的影响因素。

5.2 建模参数与分形维数拟合关系

构建 QSGS 法建模参数 N 、 P_η 、 φ 与多孔介质模型分形维数 D 之间的定量关系, 可以有效指导多孔介质的建模。由敏感性分析可知, 模型尺寸 N 、 P_η 、 φ 对 D 均有一定程度的影响, 故基于第 3.3 节数值模拟结果, 采用多元回归方法建立如下拟合关系:

$$D = 1.131 + 0.462\bar{N} + 1.047P_\eta + 2.504\varphi - 0.047\bar{N}P_\eta - 0.428\bar{N}\varphi - 0.716P_\eta\varphi - 0.165\bar{N}^2 - 0.806P_\eta^2 - 2.39\varphi^2 \quad (6)$$

式中: $\bar{N} = 0.001N$; φ 的取值范围为 0~1; P_η 取值范围为 0~1。

常用决定系数 R^2 ($0 < R^2 < 1$) 评价多元回归的拟合效果, 判定系数越大, 拟合效果越好。式 (6) 的决定系数 $R^2 = 0.87$, 残差 r_D 分布见图 13, 分布范围约在 (-0.17, 0.17) 之间, 故拟合误差相对较小精度较高。

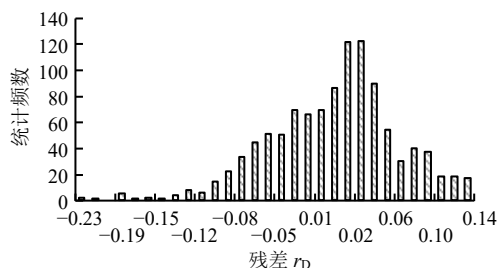


图 13 拟合残差 r_D 分布

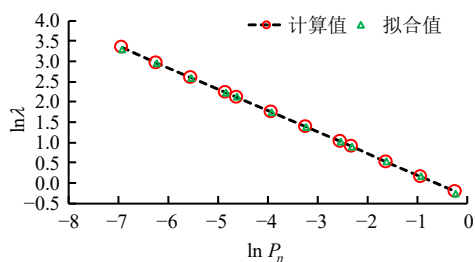
Fig.13 Distribution of fitted residuals r_D

5.3 建模参数与孔隙两点间自相关距离拟合关系

由敏感性分析可知, P_η 是 λ 的最主要影响因素, 其他建模参数影响较小, 故此处重点构建 P_η 与 λ 的拟合关系。为保证计算结果的准确性, 首先基于 3.3 节数值模拟结果依次对同一网格尺寸 N 、同一孔隙率 φ 下多孔介质模型的 2 点自相关距离 λ 取均值, 结合在双对数坐标系下 λ 与 P_η 的关系近似直线的特点, 拟合得到如下公式:

$$\ln \lambda = -0.33 - 0.53 \ln P_\eta \quad (7)$$

式 (7) 的决定系数 R^2 值为 0.999, 图 14 给出了 λ 计算值与拟合值, 可知式 (7) 拟合效果良好。

图14 双对数坐标下 λ 的计算及拟合值Fig.14 Calculation and fitted values of λ in double logarithmic coordinates

5.4 模型预测精度检验

式(6)、(7)的预测精度是工程应用的关键,参考3.3节数值模拟方案参数的取值,选择 N 为350、550, P_η 为0.035、0.150, φ 为0.25、0.45的参数组合,分别利用数值模拟方法和式(6)、(7)确定不同参数组合下多孔介质模型的分形维数 D 、两点自相关距离 λ 的计算值、预测值见表5、6。

表5 不同参数组合下 D 的计算值和预测值Table 5 Calculated and predicted values of D under different parameter combinations

N	P_η	φ	D		相对误差 $\delta_D/\%$
			计算值 D_c	预测值 D_p	
350	0.035	0.25	1.809	1.740	3.80
350	0.035	0.45	1.904	1.871	1.72
350	0.150	0.25	1.853	1.821	1.75
350	0.150	0.45	1.927	1.936	0.42
550	0.035	0.25	1.843	1.781	3.35
550	0.035	0.45	1.922	1.895	1.38
550	0.150	0.25	1.881	1.861	1.09
550	0.150	0.45	1.941	1.958	0.88

注: 数值模拟过程中 $P_1 \sim P_4$ 取 0.1、 $P_5 \sim P_8$ 取 0.025; $\delta_D = |(D_c - D_p)/D_c| \times 100\%$ 。

表6 不同参数组合下 λ 的计算值和预测值Table 6 Calculated and predicted values of λ under different parameter combinations

N	P_η	φ	λ		相对误差 $\delta_\lambda/\%$
			计算值 λ_c	预测值 λ_p	
350	0.035	0.25	4.458	4.249	4.69
350	0.035	0.45	4.689	4.249	9.38
350	0.150	0.25	2.050	1.965	4.16
350	0.150	0.45	2.161	1.965	9.07
550	0.035	0.25	4.611	4.249	7.86
550	0.035	0.45	4.791	4.249	11.31
550	0.150	0.25	2.103	1.965	6.57
550	0.150	0.45	2.183	1.965	10.01

注: 数值模拟过程中 $P_1 \sim P_4$ 取 0.1、 $P_5 \sim P_8$ 取 0.025; $\delta_\lambda = |(\lambda_c - \lambda_p)/\lambda_c| \times 100\%$ 。

由表5可知,式(6)的预测值与计算值之间的相对误差约为0.5%~3.5%之间,预测误差相对较

小。由表6可知,式(7)的预测值与计算值之间的相对误差约为5%~10%之间,虽然 P_η 是 λ 的主要影响因素,但是 N 、 φ 也有一定程度的影响,故仅使用 P_η 构建的预测模型预测误差会稍大一些,但对于岩土工程问题预测精度是可以接受的。

6 工程应用

6.1 分形维数给定的多孔介质重构

岩土工程相关问题研究中常常需要构造孔隙率一定情况下指定分形维数的多孔介质模型,传统的方法多采用Sierpinski地毯模型进行构建^[28],但最终构建的孔隙结构与真实的岩土体孔隙结构有一定的差别(图15)。而利用本文相关结论,则可以有效地构造指定分形维数,且更接近真实岩土材料的多孔介质模型。如对某一孔隙率 $\varphi=0.32$ 的多孔介质,若要构造分形维数 $D=1.83$ 的多孔介质模型,选择网格尺寸 $N=400$,由式(6)得到归一化生长核分布概率 $P_\eta=0.0513$,则基于QSGS法构造的多孔介质模型如图16所示,其分形维数为1.8569,与1.8300非常接近,说明本文所提方法能够有效重构指定分形维数的多孔介质模型。

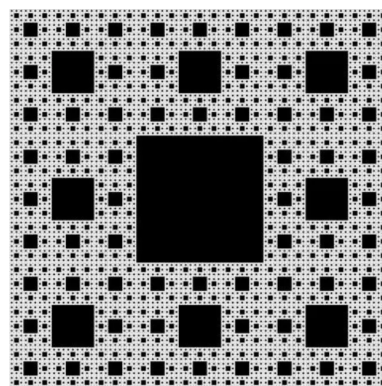


图15 Sierpinski地毯模型示意图

Fig.15 Schematic diagram of Sierpinski carpet model

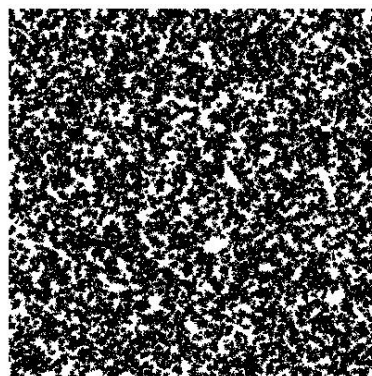


图16 基于QSGS法重构的多孔介质模型

Fig.16 Porous medium model reconstructed based on the QSGS method

6.2 自相关距离给定的多孔介质重构

岩土工程相关问题研究中某些情况需要构造给定自相关函数的多孔介质模型,传统的方法多采用模拟退火算法进行构建^[29],计算过程繁琐、耗时,而采用本文所提方法则是较高效的构造。如对某一孔隙率 $\phi=0.36$ 的多孔介质,基于自相关函数确定两点间孔隙自相关距离 $\lambda=4.33$,则由式(7)得到归一化生长核分布概率 P_η 为0.033 8,选择网格尺寸为400,基于 QSGS 法构造的多孔介质模型如图 17 所示,其 2 点间孔隙自相关距离 $\lambda=4.837$,与 4.330 非常接近,如需更高精度,可在此基础上采用模拟退火算法等进一步优化。这说明本文所提方法能够有效重构指定自相关函数的多孔介质模型。

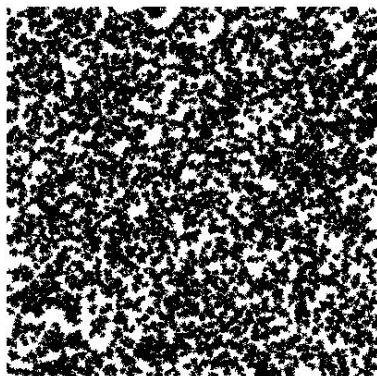


图 17 基于 QSGS 法重构的多孔介质模型

Fig.17 Porous medium model reconstructed by QSGS

7 结 论

本文采用数值模拟研究了 QSGS 法建模参数网格尺寸 N 、归一化生长概率 P_η 、孔隙率 ϕ 对多孔介质模型分形维数 D 、孔隙 2 点自相关距离 λ 的影响,分析了建模参数的敏感性,并基于敏感性分析结果构建了建模参数与分形维数、自相关距离的拟合关系,相关研究结论如下:

(1)采用 QSGS 法建模时,随着建模参数 N 、 P_η 、 ϕ 的变大,多孔介质模型的孔隙结构变的更加复杂。

(2)建模参数 N 、 P_η 、 ϕ 对 D 均有一定程度的影响,其中 ϕ 的影响最大, P_η 的影响次之, N 的影响最小; λ 的最主要影响因素是 P_η , 其他因素影响较小。

(3)采用多元回归方法构建了参数 N 、 P_η 、 ϕ 与 D 间的拟合关系式,拟合精度较高;构建了参数 P_η 与 λ 间的拟合关系式,拟合效果良好。

参 考 文 献

- [1] 张建伟,李智睿,曹克磊,等. 某水库粉质粘土渗透特性及微观机理研究[J]. 材料导报, 2024, 38(24): 163-170.
- [2] ZHANG Jian-wei, LI Zhi-rui, CAO Ke-lei, et al. Study on the permeability characteristics and microscopic mechanism of silty clay in a reservoir[J]. **Materials Reports**, 2024, 38(24): 163-170.
- [2] 张永利,涂钰滢,马玉林. 基于数字岩石物理的油页岩热导率模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(6): 26-34.
- [2] ZHANG Yong-li, TU Yu-ying, MA Yu-lin. Effect of cracks on thermal conductivity of oil shale after microwave pyrolysis[J]. **Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)**, 2023, 47(6): 26-34.
- [3] 张思奇,裴华富,谭道远,等. 单、双孔隙结构非饱和黏土孔隙分布变化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(2): 353-363.
- [3] ZHANG Si-qi, PEI Hua-fu, TAN Dao-yuan, et al. Experimental study on the variation pattern of pore size distributions for unsaturated clay with single or double pore structure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(2): 353-363.
- [4] 蔡沛辰,阙云,蒋振梁,等. 基于 CT 扫描的花岗岩残积土 3D 大孔隙定量表征及流动模拟[J]. 中国科学(技术科学)2022, 52(7): 1065-1082.
- [4] CAI Pei-chen, QUE Yun, JIANG Zhen-liang, et al. 3D quantitative characterization and flow simulation of granite residual soil based on CT scanning[J]. **Scientia Sinica (Technologica)**, 2022, 52(7): 1065-1082.
- [5] 贺元源,彭绮澜,王力,等. 基于多微观手段的季冻区草炭土孔隙特征和渗透性研究[J]. 岩土力学, 2025, 46(1): 110-122.
- [5] HE Yuan-yuan, PENG Qi-lan, WANG Li, et al. Investigating pore characteristics and permeability of seasonally frozen turfy soil using multiple micro-test methods[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2025, 46(1): 110-122.
- [6] 王美玲,郭若愚,肖梅峰,等. 基于模拟退火算法的多孔介质三维重建[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(3): 505-513.
- [6] WANG Mei-ling, GUO Ruo-yu, XIAO Mei-feng, et al. Three-dimensional reconstruction of porous media based on simulated annealing[J]. **Journal of Computer-Aided Design and Computer**, 2018, 30(3): 505-513.
- [7] 郭江峰,谢然红,丁业娇. 马尔可夫链-蒙特卡洛法重

- 构三维数字岩心及岩石核磁共振响应数值模拟[J]. 中国科技论文, 2016, 11(3): 280-285.
- GUO Jiang-feng, XIE Ran-hong, DING Ye-jiao. Three dimensional digital cores reconstructed by MCMC method and numerical simulation of rock NMR response[J]. **China Science Paper**, 2016, 11(3): 280-285.
- [8] WANG M R, PAN N. Numerical analyses of effective dielectric constant of multiphase microporous media[J]. **Journal of Applied Physics**, 2007, 101(11): 227-43.
- [9] WANG M R, WANG J K, PAN N, et al. Mesoscopic predictions of the effective thermal conductivity for microscale random porous media[J]. **Physical Review E**, 2007, 75(3): 036702.
- [10] 李仁民, 刘松玉, 方磊, 等. 采用随机生长四参数生成法构造黏土微观结构[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(10): 1897-1901.
- LIN Ren-min, LIU Song-yu, FANG Lei, et al. Micro-structure of clay generated by quartet structure generation set[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2010, 44(10): 1897-1901.
- [11] 申林方, 王志良, 李邵军. 基于土体细观结构重构技术的渗流场数值模拟[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3307-3314.
- SHEN Lin-fang, WANG Zhi-liang, LI Shao-jun. Numerical simulation for seepage field of soil based on mesoscopic structure reconfiguration technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(11): 3307-3314.
- [12] 费锁柱, 谭晓慧, 孙志豪, 等. 基于微结构模拟的土体自相关距离分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4751-4758.
- FEI Suo-zhu, TAN Xiao-hui, SUN Zhi-hao, et al. Analysis of autocorrelation distance of soil based on microstructure simulation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(12): 4751-4758.
- [13] 徐加祥, 杨立峰, 丁云宏, 等. 基于四参数随机生长模型的页岩储层应力敏感分析[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(9): 1341-1348.
- XU Jia-xiang, YANG Li-feng, DING Yun-hong, et al. Stress sensitivity analysis of the shale reservoir by the quartet structure generation set[J]. **Natural Gas Geoscience**, 2019, 30(9): 1341-1348.
- [14] 谢和平. 分形几何及其在岩土力学中的应用[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(1): 14-24.
- XIE He-ping. Fractal geometry and its application to rock and soil materials[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1992, 14(1): 14-24.
- [15] 朱维伟, 姚约东, 邹威, 等. 随机生长四参数生成孔隙模型及其分形描述[J]. 天然气与石油, 2016, 34(3): 64-68.
- ZHU Wei-wei, YAO Yue-dong, ZOU Wei, et al. Pore model based on quartet structure generation set and its fractal description[J]. **Natural Gas and Oil**, 2016, 34(3): 64-68.
- [16] 张季如, 钟思维. 四参数随机生成法重构土体微观孔隙结构的分形特征[J]. 水利学报, 2018, 49(7): 814-822.
- ZHANG Ji-ru, ZHONG Si-wei. Fractal behaviors of microscope pore structure of soil reconstructed by quartet structure generation set[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2018, 49(7): 814-822.
- [17] 王雪. 合肥地区黏土微观结构的空间变异性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- WANG Xue. Microstructure research on spatial variability of clay in Hefei district[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [18] SUCCI S. Lattice Boltzmann equation for fluid dynamics and beyond[M]. Oxford: Clarendon Press, 2001.
- [19] 阙云, 邱婷, 蔡沛辰, 等. 基于QSGS法3D重构土体渗流场的LBM数值模拟[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(9): 119-130.
- QUE Yun, QIU Ting, CAI Pei-chen, et al. LBM numerical simulation of seepage field of 3D reconstructed soil based on QSGS method[J]. **Journal of Hunan University (Natural Sciences)**, 2023, 50(9): 119-130.
- [20] 彭瑞东, 谢和平, 鞠杨. 二维数字图像分形维数的计算方法[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(1): 22-27.
- PENG Rui-dong, XIE He-ping, JU Yang. Computation method of fractal dimension for 2-D digital image[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2004, 33(1): 22-27.
- [21] 潘科, 魏雪丰, 肖桂元, 等. MATLAB在处理膨胀土数字图像中的应用[J]. 土工基础, 2012, 26(6): 84-87.
- PAN Ke, WEI Xue-feng, XIAO Gui-yuan, et al. MATLAB applications in the digital image processing of expansive soils[J]. **Soil Engineering and Foundation**, 2012, 26(6): 84-87.
- [22] BERRYMAN J G. Measurement of spatial correlation functions using image processing techniques[J]. **Journal of Applied Physics**, 1985, 57(7): 2374-2384.
- [23] MOON K H, FALCHETTO A C, JEONG J H. Microstructural analysis of asphalt mixtures using digital image processing techniques[J]. **Canadian Journal of**

- Civil Engineering**, 2014, 41(1): 74-86.
- [24] VELASQUEZ R, MARASTEANU M O, LABUZ J F. Microstructure characterization of asphalt mixtures with 2- and 3-point correlation functions[J]. **Road Materials & Pavement Design**, 2010, 11(2): 251-272.
- [25] 蒋水华, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑自相关函数影响的边坡可靠度分析[J]. **岩土工程学报**, 2014, 36(3): 508-518.
- JIANG Shui-hua, LI Dian-qing, ZHOU Chuang-bing, et al. Slope reliability analysis considering effect of autocorrelation functions[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(3): 508-518.
- [26] 王俊杰, 卢孝志, 邱珍锋, 等. 粗粒土渗透系数影响因素试验研究[J]. **水利水运工程学报**, 2013 (6): 16-20.
- WANG Jun-jie, LU Xiao-zhi, QIU Zhen-feng, et al. Experimental studies on influence factors of permeability coefficients of coarse-grained soil[J]. **Hydro-Science and Engineering**, 2013 (6): 16-20.
- [27] 王贤昆, 庞建勇, 王强. 复合水泥土无侧限抗压强度正交试验研究[J]. **长江科学院院报**, 2015, 32(12): 72-75.
- WANG Xian-kun, PANG Jian-yong, WANG Qiang. Orthogonal experimental studies on unconfined compressive strength of composite cement-soil[J]. **Journal of Changjiang River Scientific Research Institute**, 2015, 32(12): 72-75.
- [28] 徐玉莹, 陆欣. 分形多孔介质渗流特性分析[J]. **科技通报**, 2021, 37(6): 1-6.
- XU Yu-ying, LU Xin. Analysis on seepage characteristics of fractal porous media[J]. **Bulletin of Science and Technology**, 2021, 37(6): 1-6.
- [29] 王志良, 瞿嘉安, 周潇, 等. 基于模拟退火算法重构土体细观孔隙结构研究[J]. **昆明理工大学学报(自然科学版)**, 2016, 41(6): 43-48.
- WANG Zhi-liang, QU Jia-an, ZHOU Xiao, et al. Research on reconstruction for mesoscopic pore structure of soil based on simulated annealing algorithm[J]. **Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science)**, 2016, 41(6): 43-48.

(上接第 218 页)

《岩土力学》2025 年第 2 期被 EI 收录论文 (28 篇, 收录率 100%) (2)

序号	论文题名	作者	页码
15	新型盐渍土基泡沫轻质土隔断层阻盐机制及效果研究	张 荣, 赵 斌, 郑小川, 等	515-526
16	初始固结角度对饱和粉质土应变发展的影响	FARHAD Jamil, 曾长女, 马	527-538
17	不同荷载作用下折角式加筋土挡墙应力-应变特征模型试验研究	裴媛媛, 龙建辉, 郭师苡, 等	539-550
18	拉桩支护结构变形及工作机制试验研究	兰斌鹏, 王延平, 王卫国, 等	551-562
19	深圳土工参数数据库及基于生成对抗网络的多元参数分布预测模型研究	潘秋景, 孙广灿, 蔡永敏, 等	563-572
20	综合管廊始发井能源支护桩热力响应现场试验	任连伟, 王书彪, 孔纲强, 等	573-581
21	串联锚在黏土中的三向受荷承载力分析	杨明云, 陈 川, 赖 莹, 等	582-590
22	煤矿深部巷道大变形分步联合控制研究	李培涛, 刘泉声, 朱元广, 等	591-612
23	考虑蠕变剪裂的拉格朗日元与离散元耦合方法及应用	王学滨, 陈双印, 郑一方, 等	613-624
24	应用卷积近场动力学快速模拟随机裂纹扩展	周 建, 廖星川, 刘福深, 等	625-639
25	RBT 模式下刚性挡墙非极限主动土压力的离散元模拟及理论研究	姚嘉楠, 徐长节, 迟民良, 等	640-652
26	基于人工神经网络的黄土含水率光纤被动感测技术研究	郭旭辉, 朱鸿鹄, 吴 冰, 等	653-664
27	基于角点相关匹配识别的试样变形测量方法研究	邵龙潭, 唐孝强, 郭晓霞	665-672
28	防冲钻机钻测智能化试验平台研制及初步应用	谭 健, 刘学生, 耿艳峰, 等	673-684