文章编号：1674-2974（2026）03-0186-15 DOI：10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026036

# 基于随机有限元法的土工格室加筋地基可靠性研究

张冰冰[1,2,3]，宋飞[1,2,3†]，孔祥悦[1,2,3]
（1. 长安大学 公路学院，陕西 西安 710064；
2. 长安大学 民航机场智慧建造与维养重点实验室，陕西 西安 710064；
3. 长安大学 西安市绿色智慧交通岩土工程重点实验室，陕西 西安 710064）

**摘 要**：为了评估土层不均匀性及其土体参数空间变异性对地基可靠性的影响．基于中心点离散法的随机场理论分析土体参数的空间变异性，运用Matlab为每个考虑变异性的土体参数各生成500组随机场．在此基础上，借助Duncan-Chang E-B本构模型模拟了地基模型的参数随机场，探究不同天然密度下随机场地基的承载力、变形特性及可靠性．此外，采用加筋剪缩复合体本构模型模拟了土工格室加筋地基参数的随机场，并与随机场地基模型进行对比．结果表明，相较于传统的确定性有限元分析，随机场模型能提供的地基承载力范围更宽；有无加筋地基的极限承载力因子分布均服从正态分布，且较高天然密度下地基承载力因子分布范围更广；土工格室加筋地基的沉降量略小于无加筋地基，土工格室加固可小幅减少地基的沉降量；土工格室加筋地基的有效概率$p_e$随安全系数$F_s$的增加显著提升，变化趋势与无加筋地基一致，当$F_s$为1.4时，两者的$p_e$均大于95%，安全性大幅提升．

**关键词**：地基；空间变异性；随机场理论；中心点离散法；承载力因子
**中图分类号**：TU471 **文献标志码**：A

# Reliability study of geocell-reinforced foundation based on random finite element method

ZHANG Bingbing[1,2,3]，SONG Fei[1,2,3†]，KONG Xiangyue[1,2,3]
（1. Highway College，Chang'an University，Xi'an 710064，China；
2. The Key Laboratory of Intelligent Construction and Maintenance of CAAC，Chang'an University，Xi'an 710064，China；
3. Xi'an Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Green and Intelligent Transport，Chang'an University，Xi'an 710064，China）

**Abstract**：To assess the effect of soil heterogeneity and spatial variability of soil parameters on foundation reliability，the spatial variability of soil parameters is analyzed based on the random field theory of the centroid discretization method，and Matlab is used to generate 500 sets of random fields for each soil parameter，considering the variability. On this basis，the parametric random field of the foundation model is simulated with the help of Duncan-Chang E-B intrinsic model to investigate the bearing capacity，deformation characteristics and reliability of the random field foundation under different natural densities. In addition，a reinforced shear composite model is used to simulate the random field of geocell-reinforced foundation parameters and compared with the random field

* **收稿日期**：2025-02-24
**基金项目**：国家自然科学基金资助项目（52278328），National Natural Science Foundation of China（52278328）
**作者简介**：张冰冰（1992—），男，河南洛阳人，长安大学博士研究生
† 通信联系人，E-mail：songf1980@163.com

foundation model. The results show that the random field model can provide a wider range of foundation bearing capacity than the traditional deterministic finite element analysis. The distribution of ultimate bearing capacity factors with and without reinforced foundations obey normal distribution, and the distribution of foundation bearing capacity factors is wider at higher natural densities. Additionally, the settlement of geocell-reinforced foundations is slightly smaller than that of unreinforced foundations, and the geocell-reinforcement can reduce the settlement of foundations in a small amount. The effective probability $p_e$ of geocell-reinforced foundation increases significantly with the increase of safety factor $F_s$, and the change trend is consistent with that of unreinforced foundation, when $F_s$ is 1.4, the $p_e$ of both is greater than 95%, and the safety is greatly improved.

**Key words**: foundations; spatial variability; random field theory; centroid discretization method; bearing capacity factor

相较于土木工程的其他领域,岩土工程具有显著独特性:即便在均匀岩土剖面中,土体参数也存在随机波动[1-3]. 然而,过往的研究大多依赖钻孔资料或土工试验结果来设定岩土模型的参数,进行确定性分析. 这种做法往往导致计算结果与实际情况存在一定偏差[4-5]. 鉴于岩土材料的物理力学性质本质上具有高度非均质性,在解决岩土工程问题时,将土体参数视为随机变量显得尤为重要[6-8]. 这种方法充分遵从了土体性质固有的随机性和空间变异性,能够更全面地捕捉并准确模拟土体的实际物理力学行为,进而提升岩土工程结构设计的可靠性[9-11].

为了在岩土工程结构设计中考虑土体参数的空间变异性,Vanmarcke[12]提出应用随机场理论来描述土体参数的变异性. 此后,众多学者将随机场理论与有限元分析法相结合实现了岩土工程结构的随机场分析. 顾鑫等[13]基于 Chebyshev-Galerkin-Karhunen-Loève 的随机场离散方法与摩尔-库仑模型,针对考虑岩土体参数变异性的非饱和边坡算例,深入分析了水位及坡高变化对边坡可靠度的影响. 张轩煜等[14]运用 Gauss 自相关函数结合 KL 级数展开法的随机场理论,在摩尔-库仑模型下通过隧道实例验证了随机模拟法优于确定性有限元模拟. 朱彬等[15]建立了基于 Karhunen-Loève 展开随机有限元法的概率分析框架,揭示了土体渗透系数、剪切模量空间变异性及波浪荷载随机性对孔隙水压力和液化深度的影响. 赵炼恒等[16]考虑了土体参数互相关性和空间自相关性,采用 Cholesky 分解生成二维互相关对数正态随机场,探究了参数间的互相关性、变异系数及波动范围变化对边坡稳定性的影响. 边宏光等[17]采用局部平均法模拟随机场,并运用强度折减法计算了土石混合体边坡模型,结果显示边坡稳定安全系数呈正态分布. 曾勇等[18]基于随机有限元方法和蒙特卡罗模拟,运用摩尔-库仑模型模拟了深度依赖性土体强度参数的非平稳随机场边坡模型. Liao 等[19]采用随机有限元极限分析方法与摩尔-库仑模型,通过考虑土体空间变异性进行随机分析,获得了土坝稳定性的统计特征. Cao 等[20]利用 Abaqus 有限元软件和 Python 脚本创建随机地基模型,通过 USDFLD 子程序和强度折减法计算了安全系数. Chakraborty 等[21]和 Li 等[22]研究发现,随机有限元法相较于传统极限平衡法在评估开挖引起的失稳时能更准确地计算失效概率. 结合随机场理论,该方法不仅能给出安全系数范围以指导工程实践,还能揭示土体参数不确定性对边坡整体安全系数及随机土体中基础竖向承载力变异系数的影响. Johari 等[6]和 Das 等[23]基于随机有限元法,分别研究了土工格栅加筋土挡墙和土工纤维加筋粉煤灰管道的力学响应及变形特征,重点探讨了材料参数的空间变异性对结构性能的影响规律,并指出随机场分析能更可靠地预测结构的应力分布、变形模式及潜在破坏机制.

目前,岩土工程随机场研究多基于摩尔-库仑本构模型,聚焦土体弹性模量、黏聚力及内摩擦角等参数空间变异性对地基、隧道、边坡及坝体等工程可靠性的影响. 相比之下,反映土体非线性力学特性的 Duncan-Chang 等本构模型的相关随机场研究较少,虽有王坤等[24]和相彪等[25]对 Duncan-Chang 模型参数敏感性进行了初步分析,但尚未建立系统的随机场有限元分析方法. 在加筋土领域,现有研究多针对

土工格栅加筋挡墙和土工纤维加筋粉煤灰管道等结构,土工格室加筋土结构的随机场研究仍是空白.

本文采用中心点离散法的随机场理论,结合非线性本构模型,对土工格室加筋与非加筋土体的参数空间变异性进行研究. 首先,运用Matlab软件为每个变异性参数生成500组随机场数据;其次,基于Duncan-Chang E-B本构模型建立地基随机场模型,分析不同天然密度条件下地基的承载力、变形特性及可靠性;同时,通过土工格室加筋剪缩复合体本构模型构建加筋地基随机场,并与未加筋地基进行对比分析. 研究结果可为考虑土体空间变异性的地基工程分析与设计提供可靠的理论依据和方法参考.

## 1 材料参数随机场

### 1.1 土体参数变异性

土体参数的变异性需综合考虑时间变量与空间变量的双重效应[26-27]. 但在多数情况下,土体参数变异性受时间变量的影响相对较小,因此实践中常侧重于分析参数在空间变量上的变异性[12]. 为了描述土体参数的空间变异性,在随机场有限元方法中引入了自相关函数,用以表征空间上任意两点岩土体参数之间的自相关性[28-29]. 在平面上,自相关函数可定义为

$$\rho\left[p\left(x_i,y_i\right),p\left(x_j,y_j\right)\right]=\frac{\mathrm{COV}\left[p\left(x_i,y_i\right),p\left(x_j,y_j\right)\right]}{\sqrt{\mathrm{Var}\left[p\left(x_i,y_i\right)\right]}\cdot\sqrt{\mathrm{Var}\left[p\left(x_j,y_j\right)\right]}} \tag{1}$$

式中:$p\left(x_i,y_i\right)$和$p\left(x_j,y_j\right)$分别为空间平面上任意两点的中心点坐标;COV(·)和Var(·)分别是协方差和方差函数. 目前,常用的理论自相关函数模型有指数型、Gauss型、二阶自回归型、指数余弦型和三角型等[30-31],其中,指数型自相关函数因其在土体参数样本曲线全段上展现出良好的拟合性能,且计算相对简便. 其表达式为

$$\rho\left[p\left(x_i,y_i\right),p\left(x_j,y_j\right)\right]=\exp\left[-2\left(\frac{\left|x_j-x_i\right|}{\delta_{\mathrm{h}}}+\frac{\left|y_j-y_i\right|}{\delta_{\mathrm{v}}}\right)\right] \tag{2}$$

式中:$\delta_{\mathrm{h}}$和$\delta_{\mathrm{v}}$分别代表水平和垂直方向上的波动范围;$(x_i,y_i)$和$(x_j,y_j)$分别代表空间上任意两点坐标.

假设在有限元中模型被划分为$l$个网格,基于式(2)的自相关函数以及网格单元数,建立一个自相关系数矩阵$\boldsymbol{\rho}$.

$$\boldsymbol{\rho}=\begin{bmatrix}\rho_{11}&\cdots&\rho_{1l}\\ \vdots&&\vdots\\ \rho_{l1}&\cdots&\rho_{ll}\end{bmatrix} \tag{3}$$

式中:$\rho_{ij}=\rho\left[p\left(x_i,y_i\right),p\left(x_j,y_j\right)\right]$,表示空间上$i$、$j$两点之间的自相关系数.

### 1.2 随机参数方法

目前常用的抽样方法包括系统抽样、整群抽样、多阶段抽样、重要性抽样、拉丁超立方抽样(Latin hypercube sampling, LHS)及蒙特卡罗抽样(Monte Carlo sampling, MCS)等[32-33],其中,LHS与MCS在处理复杂系统的随机性和不确定性方面表现尤为突出,图1展示了这两种方法的累积概率分布情况. 相较于MCS法,LHS能够生成更具代表性的随机参数集合,其特点是在尽可能少的抽样次数下覆盖整个样本空间,具有较高样本有效性,可大幅提升模拟计算效率和结果的准确性. 因此,选择LHS法生成随机参数.

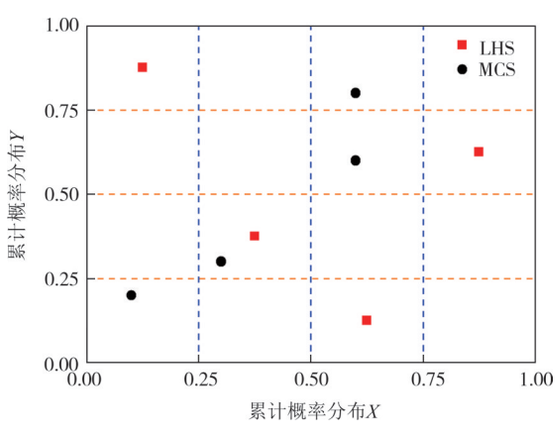



图1 LHS和MCS累积概率分布对比

Fig.1 Comparison of cumulative probability distributions for LHS and MCS

针对LHS法生成随机参数的过程[34],可以细分为5个关键步骤:生成抽样区间、执行区间映射变换、应用线性变换映射、生成随机参数以及建立随机参数矩阵. 具体如下:

1)生成抽样区间. 将随机参数$\alpha$的概率分布函数等分成$n$个连续且互不重叠的子区间,确保每个子区间内$(\Delta_i)$具有相同抽样概率,即

$$P\left(\Delta_1\right)=P\left(\Delta_2\right)=\cdots=P\left(\Delta_n\right)=\frac{1}{n} \tag{4}$$

2)执行区间映射变换.利用式(4),将区间$U(0,1)$的随机浮点数$\nu$映射到变换区间的各个子区间内,生成相应的随机数样本点:

$$\omega_i = \frac{\nu}{n} + \frac{i-1}{n} \tag{5}$$

3)应用线性变换映射.通过区间映射变换后,$\omega_i$为标准正态累积分布函数$\Phi(\cdot)$的输入值,采用标准正态分布反函数的线性变换得到:

$$\theta_i = \Phi^{-1}(\omega_i) \tag{6}$$

4)生成随机参数.将$\theta_i$映射为正态分布的散点,生成随机参数$\alpha_i$的样本:

$$\alpha_i = \theta_i \cdot \sigma_i + \mu_i \tag{7}$$

式中:$\mu_i$和$\sigma_i$分别为正态随机参数$\alpha_i$的均值和标准差.

5)建立随机参数矩阵.在随机场中每个随机参数$\alpha_i$共需随机生成$l$个样本,若选择的土体本构模型中有$m$个参数$\alpha_i$,通过重复上述步骤,生成$m$个参数$\alpha_i$的随机样本,进而建立一个独立标准正态分布随机参数矩阵$\boldsymbol{\beta}$.

$$\boldsymbol{\beta} = \left[\boldsymbol{\beta}_1, \boldsymbol{\beta}_2, \cdots, \boldsymbol{\beta}_i, \cdots, \boldsymbol{\beta}_m\right] \tag{8}$$

式中:$\boldsymbol{\beta}_i = \left[\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_i, \cdots, \alpha_l\right]$.

### 1.3　随机场的离散

随机场参数的空间离散方法对有限元模拟结果的准确性至关重要,当前主要有插值法、加权积分法、局部平均法以及中心点离散法等[31,35].其中,中心点离散法具有精度较高、计算步骤少和易实现的优势,其在岩土工程中已被广泛采纳.同时,大量研究如文献[30,36-37]指出,土体参数的随机场在空间分布上遵循相关非Gauss分布特性.但通过随机场离散方法无法直接得到相关非Gauss随机场.为此,利用中心点离散法模拟出标准Gauss随机场,然后通过数学变换及转化获得相关非Gauss随机场.此外,土体参数间还普遍存在着一定的相互关性,通常借助互相关系数矩阵$\boldsymbol{\psi}$来量化表达.

$$\boldsymbol{\psi} = \begin{bmatrix} \psi_{11} & \psi_{12} & \cdots & \psi_{1m} \\ \psi_{21} & \psi_{22} & \cdots & \psi_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \psi_{m1} & \psi_{m2} & \cdots & \psi_{mm} \end{bmatrix} \tag{9}$$

式中:$m$为参数随机场数目;$\psi_{ij}$为空间上参数间的互相关系数.

值得注意的是,自相关系数$\rho(p_i, p_j)$和互相关系数$\psi_{ij}$均处于标准正态分布的空间内.假定变换后的等效自相关系数$\rho^*(p_i, p_j) = \rho(p_i, p_j)k_{1,ij}$,其中$k_{1,ij}$为等效修正系数.蒋水华等[30]的研究表明,变换前后的自相关系数差异可忽略不计($k_{1,ij} = 1$).同样地,对于变换后的等效互相关系数$\psi_{ij}^* = \psi_{ij}k_{2,ij}$,而该系数则对相关非Gauss随机场具有一定影响.中心点离散法离散随机场过程分为3步:

1)将等效变换后的互相关系数矩阵$\boldsymbol{\psi}^*$进行Cholesky分解,得到

$$\boldsymbol{\psi}^* = \boldsymbol{L}_1\boldsymbol{L}_1^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \chi_{11}^* & 0 & \cdots & 0 \\ \chi_{21}^* & \chi_{22}^* & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \chi_{m1}^* & \chi_{m2}^* & \cdots & \chi_{mm}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \chi_{11}^* & \chi_{12}^* & \cdots & \chi_{1m}^* \\ 0 & \chi_{22}^* & \cdots & \chi_{2m}^* \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \chi_{mm}^* \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中:$\boldsymbol{L}_1^{\mathrm{T}}$为等效变换后互相关系数矩阵$\boldsymbol{\psi}^*$的上三角矩阵.再把通过LHS法得到的独立标准正态分布随机参数矩阵$\boldsymbol{\beta}$与$\boldsymbol{L}_1^{\mathrm{T}}$相乘,便得到考虑变异土体参数互相关性影响的相关标准正态随机样本矩阵$\boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{D}}$.

$$\boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{D}} = \boldsymbol{\beta} \cdot \boldsymbol{L}_1^{\mathrm{T}} = \left[\boldsymbol{\beta}_1^{\chi}, \boldsymbol{\beta}_2^{\chi}, \cdots, \boldsymbol{\beta}_i^{\chi}, \cdots, \boldsymbol{\beta}_m^{\chi}\right] \tag{11}$$

式中:$\boldsymbol{\beta}_i^{\chi} = \left[\alpha_1^{\chi}, \alpha_2^{\chi}, \cdots, \alpha_i^{\chi}, \cdots, \alpha_l^{\chi}\right]$,$\alpha_i^{\chi}$为考虑互相关性后变异土体的一个参数样本.

2)由于忽略了变换前后自相关系数的差异,则自相关系数矩阵$\boldsymbol{\rho} = \boldsymbol{\rho}^*$.同样,对自相关系数矩阵$\boldsymbol{\rho}$进行Cholesky分解得到

$$\boldsymbol{\rho} = \boldsymbol{L}_2\boldsymbol{L}_2^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \eta_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ \eta_{21} & \eta_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \eta_{l1} & \eta_{l2} & \cdots & \eta_{ll} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_{11} & \eta_{12} & \cdots & \eta_{1l} \\ 0 & \eta_{22} & \cdots & \eta_{2l} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \eta_{ll} \end{bmatrix} \tag{12}$$

式中:$\boldsymbol{L}_2$为自相关系数矩阵$\boldsymbol{\rho}$的下三角矩阵.

再把自相关系数矩阵的下三角矩阵$\boldsymbol{L}_2$与矩阵$\boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{D}}$相乘,进而得到考虑互相关性和自相关性的相关标准Gauss随机场$\boldsymbol{H}_i^{\mathrm{D}}(x, y)$.

$$\boldsymbol{H}_i^{\mathrm{D}}(x, y) = \boldsymbol{L}_2 \cdot \boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{D}} = \boldsymbol{L}_2 \cdot \boldsymbol{\beta} \cdot \boldsymbol{L}_1^{\mathrm{T}} \tag{13}$$

3)将式(13)中考虑互相关性和自相关性的相关标准Gauss随机场$\boldsymbol{H}_i^{\mathrm{D}}(x, y)$,通过逆函数转换为相关非Gauss随机场$\boldsymbol{H}_i(x, y)$.

$$\boldsymbol{H}_i(x, y) = G_i^{-1}\left[\boldsymbol{H}_i^{\mathrm{D}}(x, y)\right] \tag{14}$$

式中:$G_i^{-1}(\cdot)$为非Gauss分布边缘累积分布的逆函数.

值得注意的是,当土体参数遵循对数正态分布规律时,则可通过等概率转换方法[38],将式(13)中的相关标准Gauss随机场$\boldsymbol{H}_i^{\mathrm{D}}(x, y)$进一步转化为所选

土体模型参数$\alpha_i$的相关非Gauss随机场$\boldsymbol{H}_i(x,y)$.

$$\boldsymbol{H}_i(x,y)=\exp\left\{\left(\ln\mu_i-\sigma^2_{\ln i}/2\right)+\sqrt{\ln\left[1+\left(\sigma_i/\mu_i\right)^2\right]}\cdot\boldsymbol{H}_i^{\mathrm{D}}(x,y)\right\} \tag{15}$$

式中:$\sigma_{\ln i}$为相应正态随机参数$\ln i$的标准差.

## 2 随机场有限元的实现

随机场理论在有限元软件中的实现方法多样,主流平台如Abaqus、COMSOL、FLAC3D和Ansys均支持相关分析.其中,Abaqus凭借其用户自定义材料(UMAT)功能,可灵活定义复杂本构模型,同时结合Matlab和Python的协同计算,能高效实现随机场分析.具体流程包括:首先利用Matlab生成参数随机场,再通过Python脚本驱动Abaqus完成建模、批量计算及结果提取.图2展示了完整的4步计算流程,具体实施步骤如下:

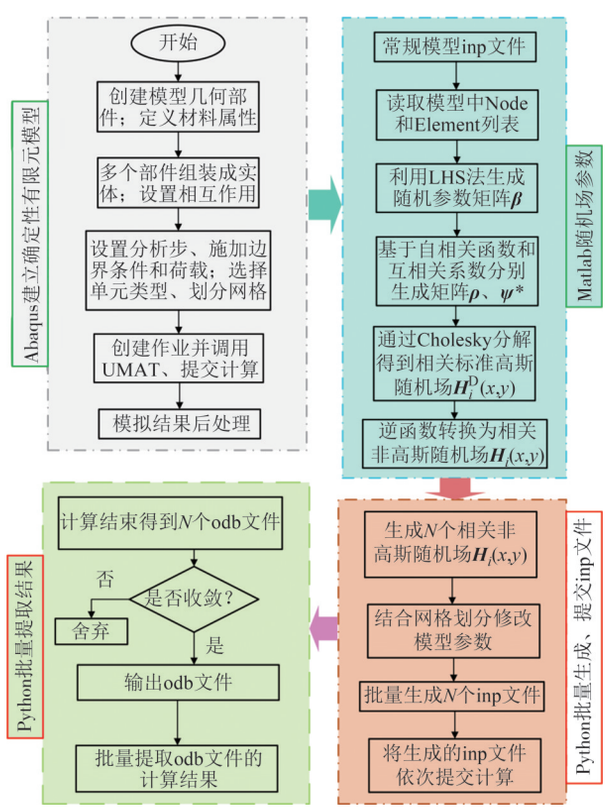



图2 随机场理论实现流程

Fig.2 Random field theory realization process

1)在Abaqus中建立确定性有限元模型的流程包括:几何建模、材料属性定义(支持UMAT自定义本构)、分析步设置、边界条件与荷载施加、单元类型选择与网格划分,以及求解器配置.

2)Matlab随机场参数生成:从确定性模型的inp文件中提取Node和Element列表,分别存储为NodeList.txt和ElementList.txt;假设需要生成的随机场数量为$N$个,利用Matlab软件读取ElementList.txt文件中的网格单元数量$l$.并采用LHS法生成与每个网格单元相关的随机参数$\alpha_i$的矩阵$\boldsymbol{\beta}$,该矩阵的维度为$l\times N$;利用式(2)的自相关函数,结合网格单元的数量$l$以及模型中的随机参数数目$m$,分别生成自相关系数矩阵$\boldsymbol{\rho}$和互相关矩阵系数$\boldsymbol{\psi}$.再对互相关系数矩阵$\boldsymbol{\psi}$进行变换,得到等效互相关系数矩阵$\boldsymbol{\psi}^*$;基于式(10)和式(12)对自相关系数矩阵$\boldsymbol{\rho}$和等效互相关系数矩阵$\boldsymbol{\psi}^*$分别进行Cholesky分解.再依据式(13)矩阵运算生成相关标准Gauss随机场$\boldsymbol{H}_i^{\mathrm{D}}(x,y)$;采用非Gauss分布边缘累积分布的逆函数$G_i^{-1}(\cdot)$,将$\boldsymbol{H}_i^{\mathrm{D}}(x,y)$转换为相关非Gauss随机场$\boldsymbol{H}_i(x,y)$.

3)Python批量生成和提交随机场的inp文件:将$m$个参数生成的$N$个非Gauss随机场$\boldsymbol{H}_i(x,y)$分别存储为parameter-1.txt至parameter-$m$.txt文件;开发Python脚本,将随机场矩阵转换为Abaqus可识别的材料属性,并根据预定义的网格单元编号实现参数精确分配,生成Job-1.inp文件,再通过循环语句结构批量生成$N$个inp文件;编写专用Python脚本,依次读取Job-1.inp至Job-$N$.inp文件,创建并提交对应计算作业.

4)Python批量提取结果:计算过程中,成功收敛的作业将生成对应的odb文件,未收敛的作业则自动舍弃;开发专用Python脚本,遍历Job-1.odb至Job-$N$.odb文件,批量提取指定节点或单元的计算结果,并存储为xcv格式文件.

## 3 地基模型随机分析

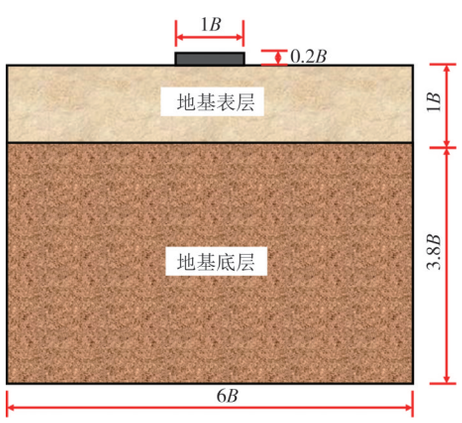
### 3.1 随机场地基模型概况

#### 3.1.1 确定性模型概况

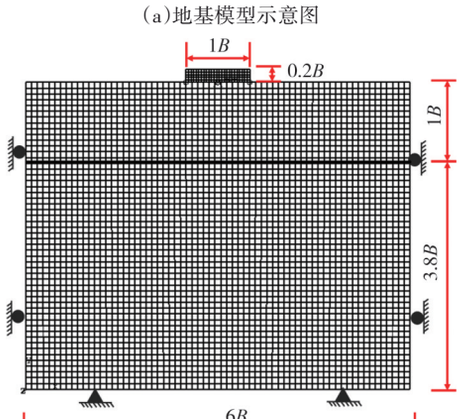
为验证随机场有限元模型的准确性与适用性,本研究参照Tian等[39]建立的二维地基模型[图3(a)],构建了双层地基浅基础分析模型.模型参数设置如下:基础宽度为$B$,表层土厚度取$1B$,底层土厚度设为$3.8B$以确保计算精度并消除边界效应影响,模型总宽度取$6B$.边界条件设置方面:横向采用对称边界,底部施加固定约束以模拟刚性基岩,顶部设为自由

边界以反映实际地表变形特性.该模型设计既保证了计算效率,又充分考虑了工程实际情况.

建模方法与文献[40]保持一致(除了模型尺寸),如图3(b)所示.网格类型为CPE4,网格单元尺寸设定为0.09$B$,满足小于自相关距离1/5的要求[41-42].划分网格3 551个,节点3 672个.为了提升计算效率,简化地基土层复杂性,将表层与底层均设定为具有相同性质的土体,即正常固结的粉质黏土.土体的本构模型采用Duncan-Chang E-B模型,该模型共有8个参数,即体积模量基数$K$、体积模量指数$n$、破坏比$R_f$、黏聚力$c$、内摩擦角$\varphi$、回弹模量基数$K_b$、回弹模量指数$q$和初始卸载模量$K_{ur}$.模型参数直接采用文献[40]中对天然密度为1.94 g/cm$^3$和2.01 g/cm$^3$的重塑粉质黏土进行三轴试验确定的参数值,详见表1.




(a)地基模型示意图




(b)有限元模型图

图3　随机场模型算例示意图

Fig.3　Schematic representation of the random field modeling algorithm

### 3.1.2　参数随机场

依据已有研究统计[30,43-44],对于黏性土的水平相关距离$\delta_h$取值范围为10~62 m,竖直相关距离$\delta_v$取值范围为0.1~8.0 m.综合考虑地基分层填筑压实过程对水平方向强相关性的影响,以及随机场中土体的各向异性特性,最终确定了自相关距离参数$\delta_h$=50 m、$\delta_v$=5 m.

**表1　算例模型参数**

**Tab.1　Parameters of the algorithmic model**

| 天然密度/(g·cm$^{-3}$) | $K$ | $n$ | $R_f$ | $c$/kPa | $\varphi$/(°) | $K_b$ | $q$ | $K_{ur}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.94 | 25.6 | 0.953 | 0.729 | 7.1 | 29 | 6.78 | 0.82 | 62 |
| 2.01 | 52.2 | 0.970 | 0.890 | 4.4 | 31 | 10.44 | 0.93 | 113 |

基于王坤等[24]的研究,Duncan-Chang E-B模型中,参数$K$、$R_f$、$\varphi$和$K_b$对结构强度和变形有显著影响.因此,文中也选取这4个关键参数进行随机场的离散化处理.为了更清晰地观察随机场的结果,通常变异系数建议取0.2或0.3[24,30,36,45].本文,参数$K$和$K_b$的变异系数设为0.3.然而,对于参数$R_f$,若选用0.3的变异系数,其部分随机值将会超出合理范围(即$R_f$>1),这与实际情况不符.因此,本文将天然密度为1.94 g/cm$^3$和2.01 g/cm$^3$的$R_f$变异系数分别调整为0.075、0.03.同时,考虑到参数$\varphi$的变异系数过大会导致不收敛的inp文件数量增加,故将其变异系数调整为0.075.

利用随机场理论分别生成参数$K$、$R_f$、$\varphi$和$K_b$的500组随机场样本.以天然密度为1.94 g/cm$^3$的模型参数为例,其中一组随机场参数在模型中分布,如图4所示.图4揭示了地基土体的分层特性,且参数值随地基深度的增加而逐渐增大.表明中心点离散法构建随机场的合理有效.

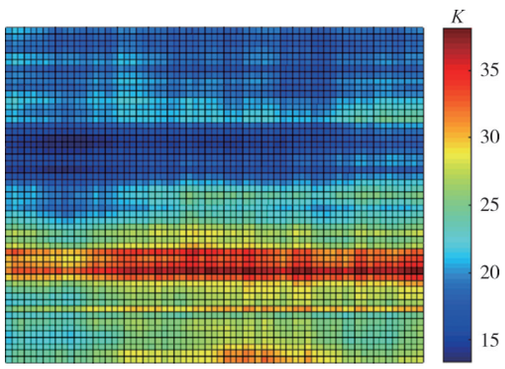
## 3.2　计算结果分析

为了探究确定性模型与随机场模型之间的地基承载力关系,定义$N_{det}$为确定性模型的地基承载力因子;定义$N_{ran}$代表每次随机场模拟所得的地基承载力因子,其表达式为

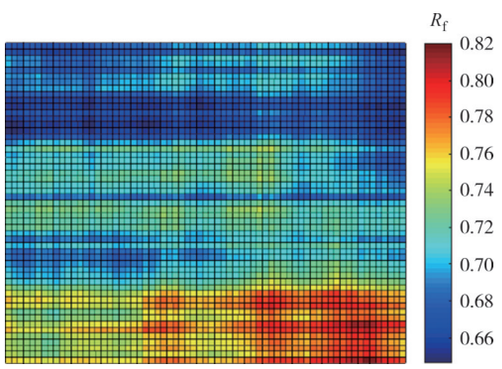
$$\begin{cases} N_{det} = \dfrac{q_u}{c} \\ N_{ran} = \dfrac{q_{ui}}{c} \end{cases} \tag{16}$$

式中:$q_u$和$q_{ui}$分别为确定性模型与随机场模型的地基承载力;$c$为土体黏聚力.

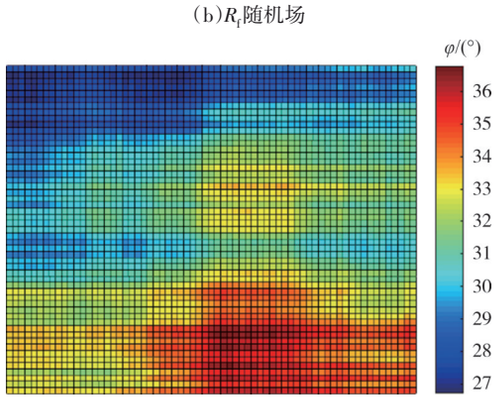
批量提取随机场模拟结果,计算并绘制了确定性模型与随机场模型在有限元分析中的承载力因子-沉降关系曲线,详见图5(a)和5(b).对比分析可知,确定性模型的地基承载力因子介于随机场模型



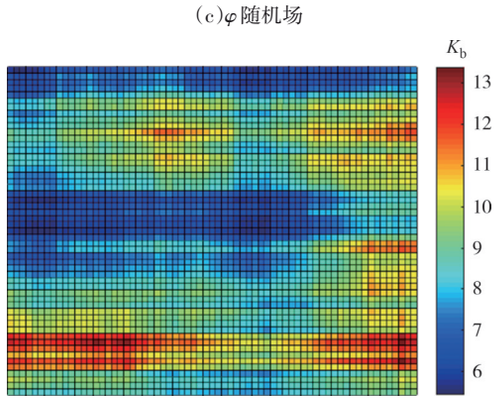

(a)$K$随机场




(b)$R_f$随机场




(c)$\varphi$随机场



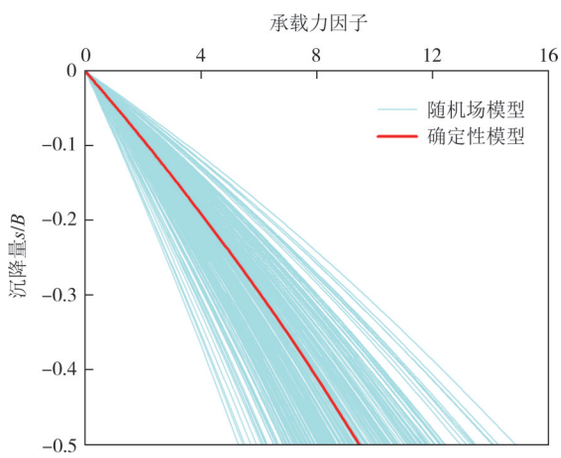

(d)$K_b$随机场

图4 地基随机场材料参数分布

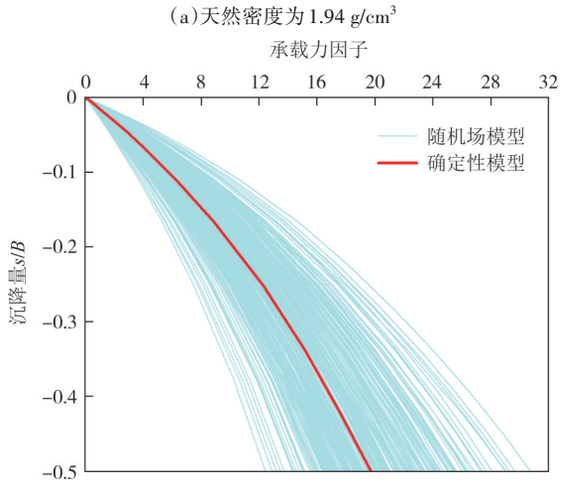
Fig.4 Foundation random field material parameter distribution

结果的中值区间.传统确定性有限元方法无法反映土体参数的空间变异性,可能导致承载力预测偏高,从而影响工程安全.而随机场模型通过考虑参数空间变异性,可提供更全面的承载力上下限参考值,使工程设计更加合理可靠.研究还发现,虽然1.94 g/cm$^3$和2.01 g/cm$^3$两种密度条件下的承载力因子-沉降曲线趋势相似,但后者表现出显著增强的承载性能:承载力因子均值从9.12提升至20.04,增幅达119.7%,充分证实了土体密度对承载力的关键影响.应变云图分析[图5(c)~(f)]进一步显示,随机场模型的应变等高线呈现非均匀分布特征,这种由参数随机性导致的非光滑变形模式更符合实际工程观测结果,与确定性模型的理想化应变分布形成鲜明对比.

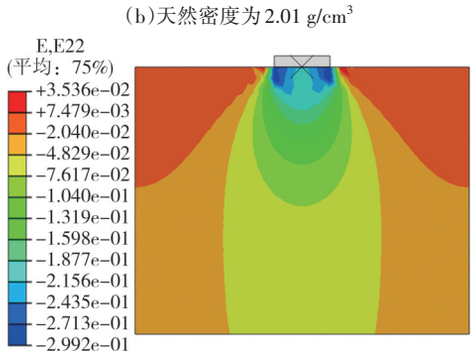
针对地基沉降量$s/B$=-0.5时,绘制了地基极限



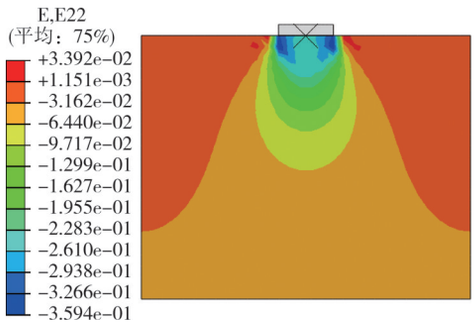

(a)天然密度为1.94 g/cm$^3$



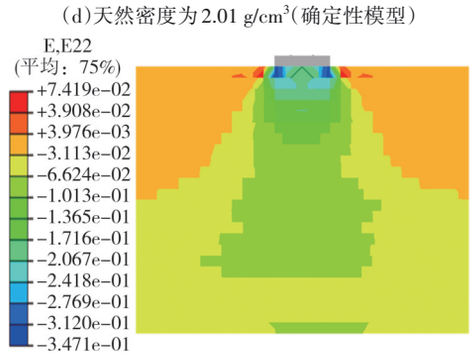

(b)天然密度为2.01 g/cm$^3$



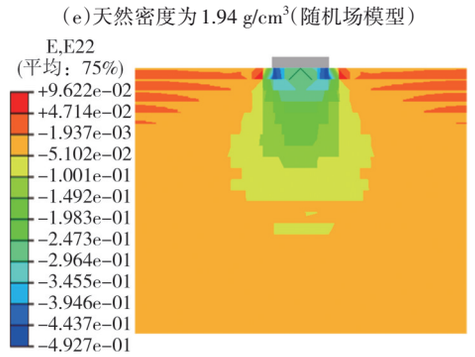

(c)天然密度为1.94 g/cm$^3$(确定性模型)




(d)天然密度为2.01 g/cm³(确定性模型)




(e)天然密度为1.94 g/cm³(随机场模型)



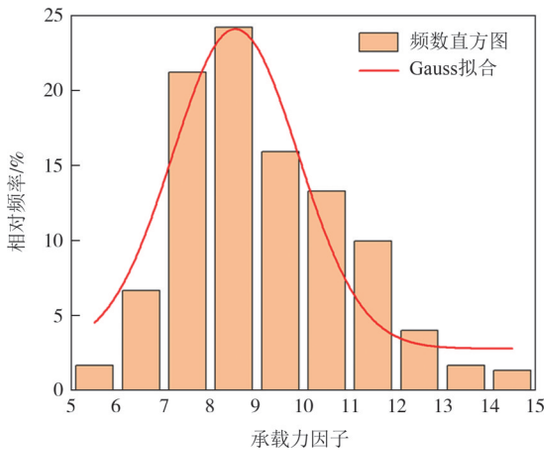

(f)天然密度为2.01 g/cm³(随机场模型)

图5　地基承载力因子-沉降曲线及地基随机场竖向应变云图

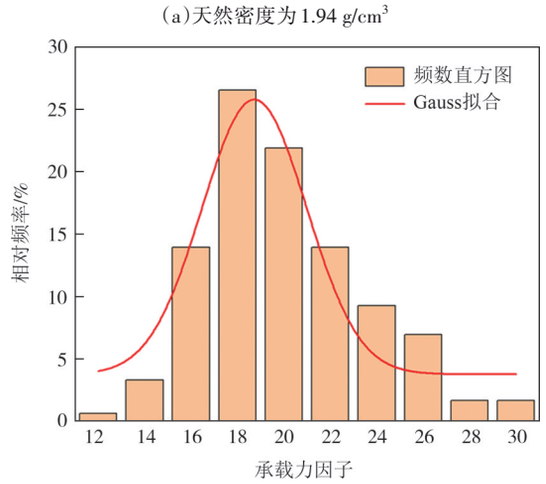
Fig.5　Foundation bearing capacity factor-settlement curve and foundation random field vertical strain contour plots

承载力因子的频率分布直方图,并应用正态分布函数对该频率分布进行了曲线拟合,如图6所示.结果表明,两种密度条件下的承载力因子均服从正态正态分布,但表现出显著差异:1.94 g/cm³密度样本的承载力因子集中分布于6.5~12.5(峰值频率25.25%),而2.01 g/cm³样本则呈现更广的分布范围(14~26,峰值频率26.57%).特别值得注意的是,高密度样本的承载力因子主要分布在16~26的较高区间,显著优于低密度样本的6.5~11.5分布区间.这些发现可为进一步理解土层天然密度与地基承载力之间的关系提供参考.

批量提取了随机场模型地基顶面沉降量数据,得到地基顶面沉降量曲线如图7所示.对比图7(a)(b)发现,1.94 g/cm³和2.01 g/cm³两种天然密度条件




(a)天然密度为1.94 g/cm³

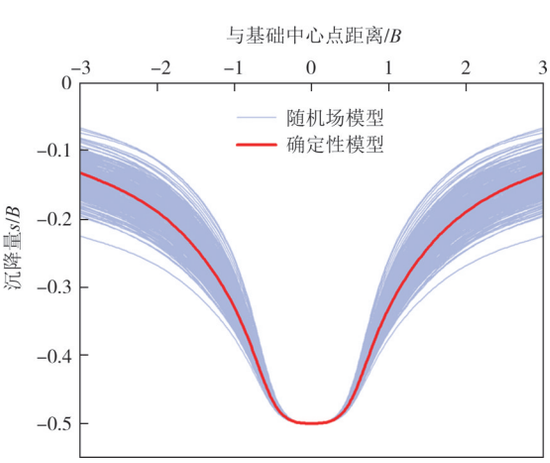



(b)天然密度为2.01 g/cm³

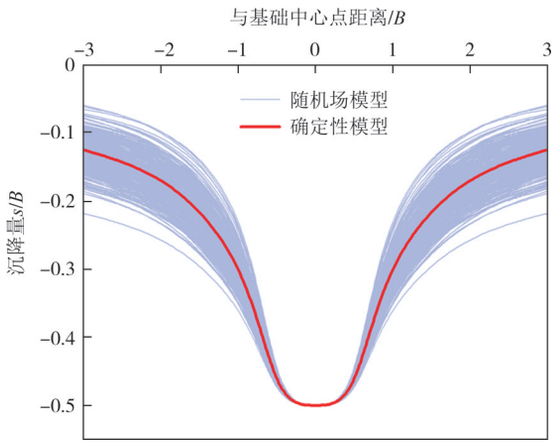
图6　地基极限承载力因子频率分布直方图

Fig.6　Histogram of frequency distribution of foundation ultimate bearing capacity factor

下,随机场模拟的沉降曲线均呈现典型的“中心大、边缘小”的特征,与确定性模型结果一致.值得注意的是,确定性模型的沉降曲线恰好处在500组随机场模拟结果的中间位置,这一现象验证了随机场理论的可靠性.




(a)天然密度为1.94 g/cm³




(b)天然密度为2.01 g/cm³

图7 地基顶面沉降量

Fig.7 Settlement of the top surface of the foundation

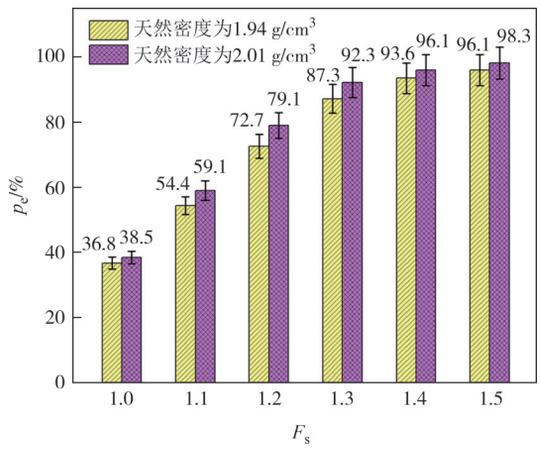



图8 地基承载力有效概率

Fig.8 Effective probability of foundation bearing capacity

### 3.3 地基可靠性分析

以地基承载力有效概率作为可靠性核心评价指标.具体方法为通过500组随机场模拟获得地基承载力因子,将其与经安全系数修正的确定性分析结果进行对比:若模拟值大于修正值,则判定为有效;反之视为失效.最终,通过统计有效次数与总模拟次数的比值(有效次数/500),计算得到地基承载力的有效概率.则有效概率$p_e$的表达式为

$$p_e = P\left(N_{ran} \geqslant \frac{N_{det}}{F_s}\right) \tag{17}$$

式中:$F_s$为设定的安全系数(factor of safety),一般来说安全系数越大,则工程设计越保守.

在地基承载力的有效概率分析中,有必要考虑安全系数的影响.文中$F_s$分别选取1.0、1.1、1.2、1.3、1.4和1.5,对随机场地基进行有效概率分析.不同天然密度条件下地基的有效概率,如图8所示.由图可知,地基的$p_e$随着$F_s$的增加而提升,这是因为$F_s$的增加,使得地基结构增加了冗余度.同时,$F_s$的提高意味着对地基承载能力的评估更为保守,从而提高了结构的安全性.

此外,由图8可得,安全系数的提升可显著改善地基可靠性.当$F_s$=1.0时,1.94 g/cm³和2.01 g/cm³密度地基的有效概率仅为36.8%和38.5%,存在重大失稳风险;$F_s$增至1.2时,有效概率分别跃升至72.7%、79.1%,安全性能显著提高.当$F_s$达到1.4时,失效概率已控制在3.9%~6.4%的较低水平;而$F_s$=1.5时,有效概率高达96.1%~98.3%,地基安全性得到充分保障.值得注意的是,2.01 g/cm³密度地基在各安全系数下的有效概率均优于1.94 g/cm³工况.这表明在施工过程中严格控制地基土体的密度,可有效提升地基承载力的有效概率,进而显著降低地基的失稳风险.

## 4 土工格室加筋地基模型随机分析

### 4.1 加筋地基随机场模型概况

为了进一步验证文中采用的中心点离散法随机场理论的有效性和精确性,在3.1节地基模型的基础上,开展了土工格室加筋地基模型的随机场模拟分析.土工格室加筋地基模型的有限元模型尺寸、加载条件以及边界条件均保持与3.1.1节的相同设定,确保分析的一致性和可比性.在此,将地基表层土体更换为土工格室加筋正常固结的粉质黏土,底层仍保持不变.对于土工格室加筋地基的底层和表层土体,仍选用天然密度分别为1.94 g/cm³和2.01 g/cm³的重塑粉质黏土作为填料(参数见表1).

在本构模型的选取上,地基底层土体仍采用Duncan-Chang E-B模型.针对地基表层的土工格室加筋正常固结粉质黏土,采用了张冰冰等[40]提出的土工格室加筋剪缩类土的复合体模型,该模型在邓肯张模型的基础上,修正了切线模量$E_{tc}$和泊松比$v_{tc}$,与Duncan-Chang E-B模型一致,进而确保与随机场地基模型的可比性.其应力应变增量的表达式为

$$\mathrm{d}\sigma_1 = E_{tc}\mathrm{d}\varepsilon_1 + 2v_{tc}\mathrm{d}\sigma_c \tag{18}$$

式中:$E_{tc}$和$v_{tc}$分别为土工格室加筋土复合体的等效切线模量和等效泊松比,分别由下式确定:

$$E_{tc} = E_t\left[1 + \frac{4v_t^2 M_t A}{D_\varepsilon(1-\varepsilon_1)(1-v_t-2v_t^2)}\right] \tag{19}$$

$$v_{tc} = v_t\left[1 - \frac{2M_t A}{D_\varepsilon(1-\varepsilon_1)}\right] \tag{20}$$

式中:$E_t$和$v_t$分别为内部填土的切线模量和泊松比,

其中 $v_t=\frac{1}{2}-\frac{E_t}{6K_b p_a\left(\sigma_3/p_a\right)^m}$,$p_a$为大气压;$D_\varepsilon$为土工格室网格所对应的变形后直径,$D_\varepsilon=D_0\sqrt{\frac{\left(1-\varepsilon_v\right)}{\left(1-\varepsilon_1\right)}}$;参数$A$的表达式为

$$A=\frac{D_\varepsilon\left(1-\varepsilon_1\right)\left(1-v_t-2v_t^2\right)}{E_t D_\varepsilon\left(1-\varepsilon_1\right)+2M_t\left(1-v_t-2v_t^2\right)} \tag{21}$$

通过对PE材质的土工格室条带拉伸试验结果进行7次多项式拟合求导,得到切线模量$M_t$的表达式为

$$M_t=7\alpha_0\varepsilon_1^6+6\alpha_1\varepsilon_1^5+5\alpha_2\varepsilon_1^4+4\alpha_3\varepsilon_1^3+3\alpha_4\varepsilon_1^2+2\alpha_5\varepsilon_1+\alpha_6 \tag{22}$$

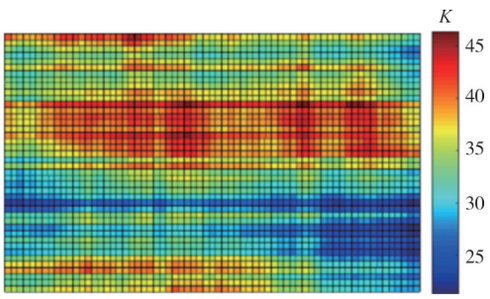
式中:$\alpha_0$~$\alpha_6$为拟合拉伸试验曲线确定的系数,分别为 37 605.76、−59 332.02、38 152.04、−12 991.26、2 575.89、−313.52、24.06.

考虑到表层与底层地基土体采用不同的本构模型,本研究分别构建了对应的两个独立随机场.在网格划分方面,延续使用0.09$B$的单元尺寸标准,将整个地基模型划分为3 551个单元(表层737个,底层2 714个).这种划分方案既保证了计算精度与效率,又保证了与3.1节模型的可比性.其中,底层土体的参数设置严格遵循3.1.2节的既定标准.通过随机场理论,针对各土层参数分别生成了500组随机场样本.同样,以天然密度1.94 g/cm³的工况为例,图9展示了其中一组参数的底层地基随机场空间分布特征.

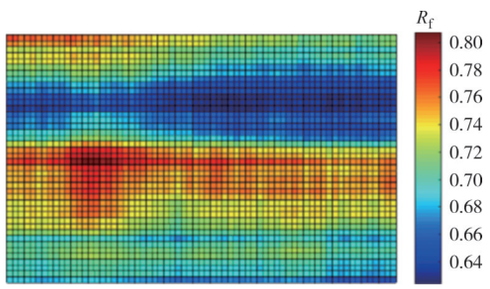
对于表层土工格室加筋地基的复合体本构模型,它除了包含了与Duncan-Chang E-B模型相同的8个参数外,还引入了2个特定参数(土工格室等效直径$D_0$和切线模量$M_t$).在处理与底层土体共有的8个参数时,仍保持与3.1节相同.另外,针对工业中生产的土工格室,其等效直径$D_0$的变异性很小,而切线模量$M_t$则常展现出一定的变异性.鉴于$M_t$是一个6次多项式[式(22)],对此引入参量$P_{Mt}$来表示其变异性,其中$P_{Mt}$=1,变异系数取值0.2.通过考虑$P_{Mt}$的空间变异性,可以得到切线模量的随机场$M_t'$,具体表达式为$M_t'=P_{Mt}\cdot M_t$.在此基础上,对每个考虑变异性的参数分别生成了500组随机场.也以天然密度为1.94 g/cm³的模型参数为例,其中一组表层地基随机场参数的分布情况如图10所示.

### 4.2　计算结果分析

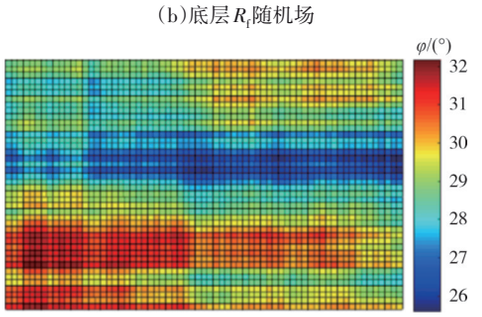
图11对比了两种天然密度下土工格室加筋地基的确定性模型与随机场模型结果,包括承载力因子-沉降曲线及随机场地基应变云图(以其中一组为例).与图5对比,可以看出:随机场模拟结果与确定性模



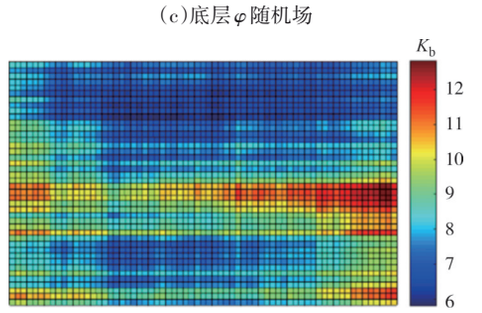
(a)底层$K$随机场



(b)底层$R_f$随机场



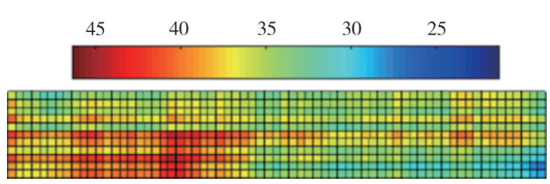
(c)底层$\varphi$随机场



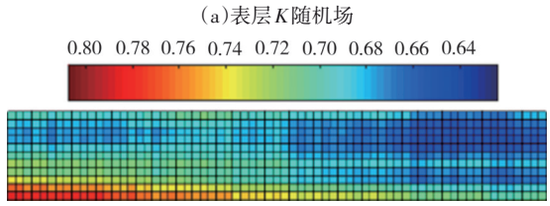
(d)底层$K_b$随机场

图9　地基底层随机场材料参数分布

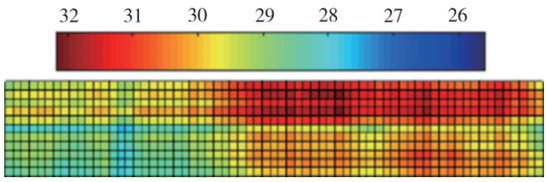
Fig.9　Distribution of material parameters in the basement layer of the foundation random field



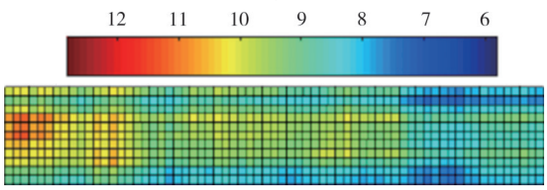
(a)表层$K$随机场



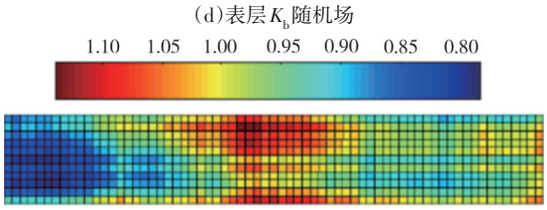
(b)表层$R_f$随机场




(c)表层$\varphi$随机场




(d)表层$K_b$随机场



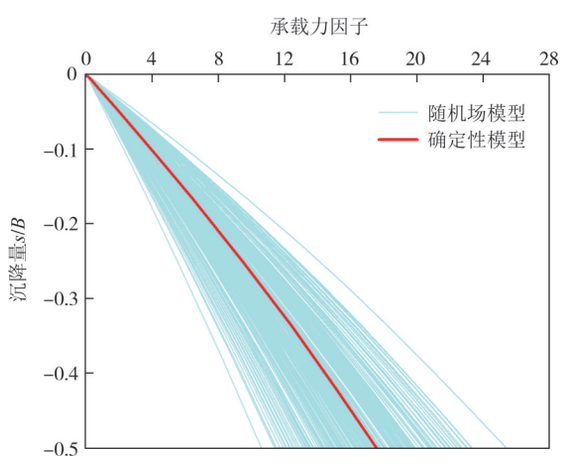

(e)表层$P_{M1}$随机场

图 10 地基表层随机场材料参数分布

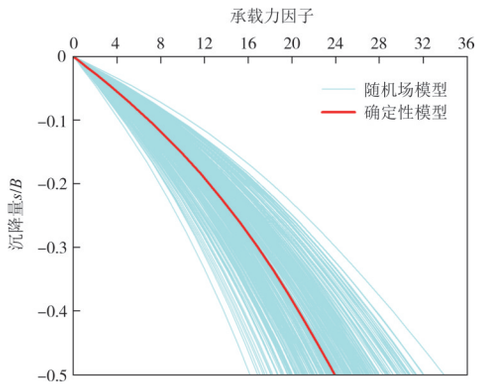
Fig.10 Distribution of material parameters in the surface layer of the foundation random field

型一致,且确定性结果也位于随机场结果的中值区间,这进一步证实了文中随机场理论的有效性;天然密度提升显著增强承载力,当天然密度从 1.94 g/cm$^3$增至 2.01 g/cm$^3$时,承载力因子均值由 17.22 提升至 24.30(增幅 41.1%);加筋效果在密度较低时更显著(1.94 g/cm$^3$时加筋地基承载力为无筋地基的 1.89 倍,2.01 g/cm$^3$时为 1.19 倍),表明加筋地基具有更高的承载力;应变云图显示,土工格室有效阻隔了应变向深层土体的传递,改善了地基整体受力状态. 这些结果充分证实了土工格室加筋技术能够提升地基承载力,尤其在较低密度土体中效果更显著.

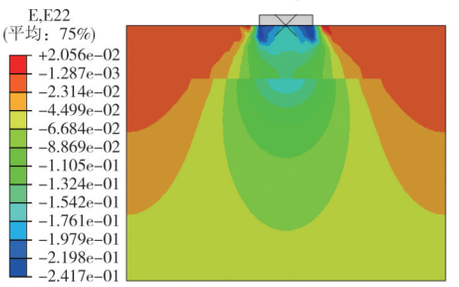
同样地,图 12 为土工格室加筋地基在沉降量$s/B$=−0.5 时的极限承载力因子分布. 与未加筋地基



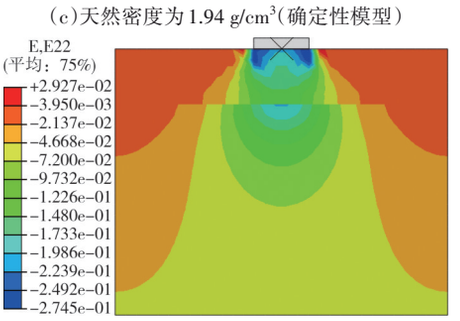

(a)天然密度为 1.94 g/cm$^3$



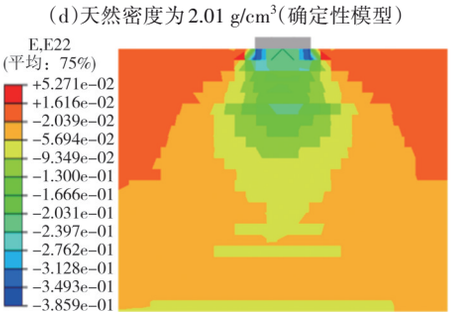

(b)天然密度为 2.01 g/cm$^3$



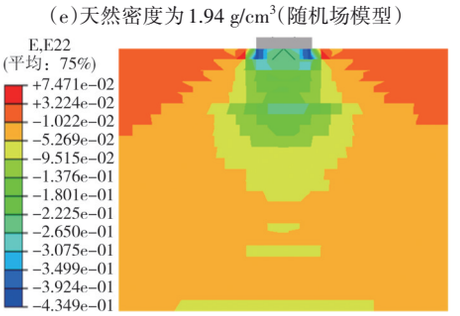

(c)天然密度为 1.94 g/cm$^3$(确定性模型)




(d)天然密度为 2.01 g/cm$^3$(确定性模型)




(e)天然密度为 1.94 g/cm$^3$(随机场模型)

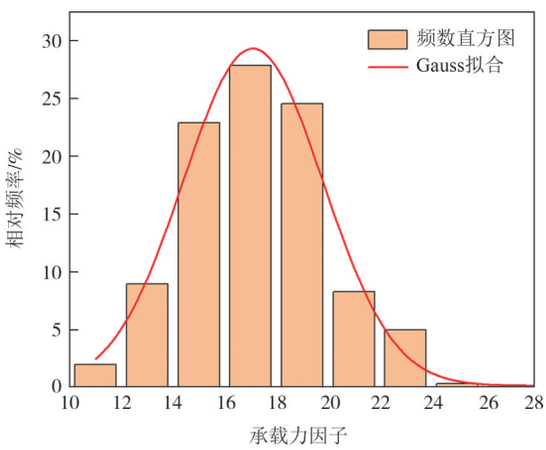



(f)天然密度为 2.01 g/cm$^3$(随机场模型)

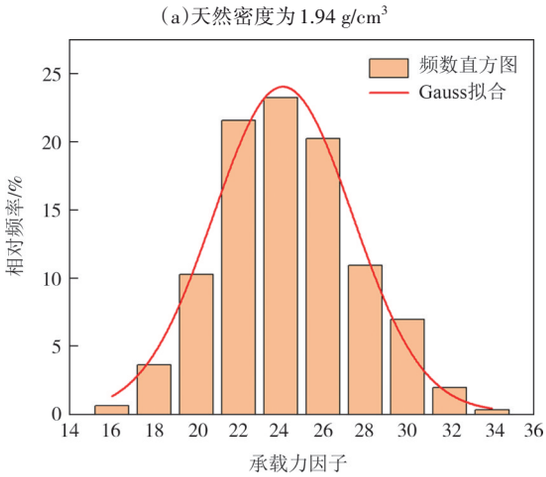
图 11 土工格室加筋地基承载力因子−沉降曲线及地基应变云图

Fig.11 Geocell-reinforced foundation bearing capacity factor-settlement curves and foundation strain contour plots

(图 6)类似,两种密度(1.94 g/cm³和 2.01 g/cm³)下的承载力因子均符合正态分布,且加筋后显著提升:1.94 g/cm³密度样本的承载力因子主要分布在 13~21 区间(峰值频率 27.91%),而 2.01 g/cm³样本则提升至 18~30 区间(峰值频率 23.26%). 分析表明,高密度样本的承载力因子在 22~26 区间显著聚集(累计频率 65.12%),优于低密度样本在 15~19 区间的集中分布(累计频率 75.41%).




(a)天然密度为 1.94 g/cm³

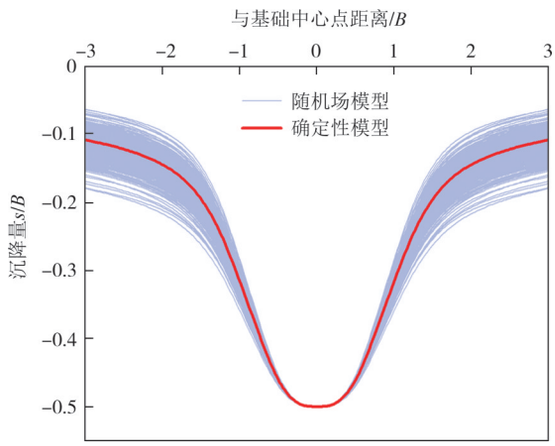



(b)天然密度为 2.01 g/cm³

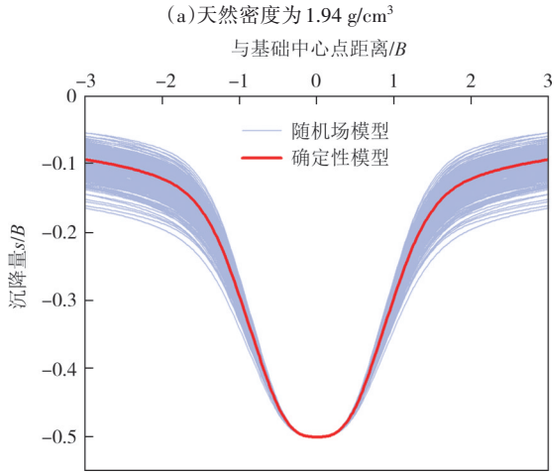
图 12　土工格室加筋地基极限承载力因子频率分布直方图

Fig.12　Histogram of frequency distribution of ultimate bearing capacity factor for geocell-reinforced foundation

图 13 为确定性模型与随机场模型下土工格室加筋地基顶面的沉降量图. 从图中可见,在两种天然密度下,土工格室加筋地基的随机场沉降量曲线的变化趋势一致,且与图 7 中无土工格室加筋地基的沉降量曲线变化趋势一致. 同时,确定性模型的沉降量曲线大致位于随机场模型模拟结果的分布带中间,进一步验证了文中随机场理论分析的准确性和合理性. 此外,分别与天然密度为 1.94 g/cm³和 2.01 g/cm³的无加筋地基沉降量曲线相比,土工格室加筋地基的沉降量略小于无加筋地基,表明土工格室加固在一定程度上可减少地基的沉降量,能够在工程中发挥积极作用.




(a)天然密度为 1.94 g/cm³




(b)天然密度为 2.01 g/cm³

图 13　土工格室加筋地基顶面沉降图

Fig.13　Settlement diagram of top surface of geocell-reinforced foundation

### 4.3　土工格室加筋地基可靠性分析

针对土工格室加筋地基,仍然采用了安全系数 $F_s$ 分别为 1.0、1.1、1.2、1.3、1.4 和 1.5 的设定,对其随机场进行了有效概率 $p_e$ 分析,并对比了两种天然密度下的结果,如图 14 所示. 由图可知,当 $F_s$ 为 1.0 时,两种天然密度下土工格室加筋地基承载力的有效概率均处于较低水平,仅为 36.5% 和 29.6%,这表明加筋地基的失效风险较高,安全性难以保证. 随着 $F_s$ 提升至 1.2,有效概率分别提升至 76.7% 和 76.1%,相应地,地基的失效概率降至 25% 以下. 当 $F_s$ 达到 1.4 时,加筋地基承载力的有效概率显著提升至 95%~96.3%,加筋地基的有效概率达到了较高水平. 当 $F_s$ 增至 1.5 时,承载力的失效概率极低,仅为 1.7%~

2.3%,加筋地基的稳定性更高.

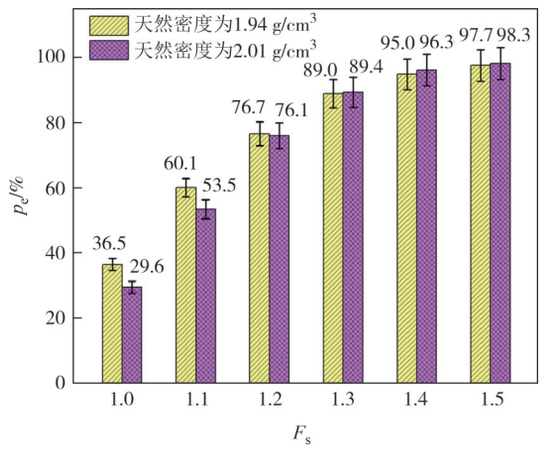



图14 土工格室加筋地基承载力有效概率

Fig.14 Effective probability of bearing capacity of geocell-reinforced foundations

与图8相比,发现土工格室加筋地基与无加筋地基的有效概率变化相似,均随$F_s$的增大而显著上升.当$F_s$≤1.2时,两类地基的有效概率均低于60%,安全性较差;而$F_s$>1.4时,失效概率均降至5%以内,地基稳定性显著提升.但两者存在明显差异:对于无加筋地基,密度1.94 g/cm³工况的有效概率始终低于2.01 g/cm³工况;而加筋地基则表现出更复杂的特征,$F_s$≤1.2时,1.94 g/cm³工况有效概率更高,但当$F_s$>1.2后,2.01 g/cm³工况的有效概率实现反超并保持优势.

上述研究表明,随着安全系数的逐步提升,有无土工格室加筋地基承载力的有效概率呈现显著增强的趋势.特别地,当$F_s$达到1.5时,地基承载力的失效概率将大幅度降低,趋于0,这表明地基在此条件下的安全性较高.然而,在实际工程设计中,若仅采用确定性分析方法评估地基极限承载力,而忽略土体参数的空间随机性,可能导致地基承载力的有效概率低于60%.这种设计方法会大幅增加工程风险,使地基在实际荷载作用下更易产生过量变形甚至破坏,进而危及上部结构的安全稳定.因此,为了确保地基设计的合理性和安全性,有必要在工程设计中充分考虑土体参数的空间随机性,并采用更为精确和全面的分析方法来确定地基承载力.

## 5 结 论

1)与传统的确定性有限元方法相比,随机场模型能够有效考虑土体参数的空间变异性,从而给出更合理的地基承载力预测范围,为工程安全设计提供更科学的依据.

2)在随机分析中,地基极限承载力因子的概率分布均符合正态分布特征,且在较高的天然密度下,其分布范围明显扩大,承载能力显著提升.

3)土工格室加固后地基的承载力因子显著提升,尤其在较低密度(1.94 g/cm³)时效果更显著.此外,土工格室加筋地基的沉降量略小于无加筋地基.

4)土工格室加筋地基与无加筋地基的有效概率均随安全系数的增大而显著提高,且当$F_s$≥1.4时,二者的稳定性均能得到保证.而在低$F_s$区间($F_s$≤1.2)表现出明显的密度效应差异:加筋地基在较高天然密度(2.01 g/cm³)下的有效概率反而降低,而无加筋地基则呈天然密度越大有效概率越高的正相关关系.

## 参考文献

[1] 易顺, 林伟宁, 陈健,等. 基于随机场理论的基坑开挖地表及围护墙变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2021,40(增刊2): 3389-3398.
YI S, LIN W N, CHEN J, et al. Deformation analysis of surface and retaining wall induced by braced excavation based on random field theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(Sup.2): 3389-3398.(in Chinese)

[2] 张卫杰,张炜,陈宇,等. 黏聚力随机场波动范围的各向异性对流态性滑坡滑动距离的影响[J]. 岩土力学,2024,45(4): 1039-1050.
ZHANG W J, ZHANG W, CHEN Y, et al. Influence of anisotropy of fluctuation scale of cohesion random field on the Run-out distance of flow-like landslides[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024,45(4): 1039-1050.(in Chinese)

[3] RAFIEI RENANI H, MARTIN C D, VARONA P, et al. Stability analysis of slopes with spatially variable strength properties[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(10): 3791-3808.

[4] 蒋水华, 熊威,朱光源,等. 暴雨及水位骤降条件下渗流参数空间变异的水库滑坡概率分析[J]. 地球科学,2024,49(5): 1679-1691.
JIANG S H, XIONG W, ZHU G Y, et al. Probabilitic analysis of reservoir landslides considering the spatial variation of seepage parameters under the conditions of rainstorm and sudden drop of water level [J]. Earth Science, 2024, 49(5): 1679-1691.(in Chinese)

[5] 吴高桥, 聂建国. 考虑地层空间变异性的岩溶区基础可靠度分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2022, 49(7): 45-53.
WU G Q, NIE J G. Reliability analysis of footings lying on Karst area considering spatially variability of stratum [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(7): 45-53.(in Chinese)

[6] JOHARI A, MAROUFI M. System reliability analysis of geogrid reinforced retaining wall using random finite element method[J]. Transportation Geotechnics, 2024, 48: 101316.

[7] 郑俊杰,卢嘉泰,刘洋. 考虑土体空间变异性的加筋路堤变形特征分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2023,51(7):7-12.
ZHENG J J, LU J T, LIU Y. Analysis of deformation characteristics of reinforced embankment considering spatial variability of soil mass [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(7): 7-12. (in Chinese)

[8] ZHANG W G, WU J H, GU X, et al. Probabilistic stability analysis of embankment slopes considering the spatial variability of soil properties and seismic randomness [J]. Journal of Mountain Science, 2022, 19(5): 1464-1474.

[9] DENG Z P, PAN M, NIU J T, et al. Slope reliability analysis in spatially variable soils using sliced inverse regression-based multivariate adaptive regression spline[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(9): 7213-7226.

[10] GUO X F, DIAS D, PAN Q J. Probabilistic stability analysis of an embankment dam considering soil spatial variability [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 113: 103093.

[11] 邓友生,张克钦,李文杰,等. 卷积神经网络与随机场分析桩梁基础承载力[J]. 哈尔滨工业大学学报,2024,56(9):124-130.
DENG Y S, ZHANG K Q, LI W J, et al. Convolutional neural network and random field analysis for analyzing the bearing capacity of coupling beam pile foundation[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(9): 124-130. (in Chinese)

[12] VANMARCKE E H. Probabilistic modeling of soil profiles[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(11): 1227-1246.

[13] 顾鑫,仉文岗,欧强,等. 基于Chebyshev-Galerkin-KL展开的土质边坡稳定可靠度分析[J]. 岩土工程学报,2023,45(12):2472-2480.
GU X, ZHANG W G, OU Q, et al. Reliability analysis of soil slope stability based on Chebyshev-Galerkin-KL expansion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(12): 2472-2480. (in Chinese)

[14] 张轩煜,施成华,孙晓贺,等. 基于随机场理论的顶管隧道施工地表变形特性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(6): 2174-2189.
ZHANG X Y, SHI C H, SUN X H, et al. Analysis of surface deformation characteristics of pipe-jacking construction based on random field theory [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(6): 2174-2189. (in Chinese)

[15] 朱彬,裴华富,杨庆,等. 基于随机有限元法的波致海床响应概率分析[J]. 岩土力学, 2023, 44(5): 1545-1556.
ZHU B, PEI H F, YANG Q, et al. Probabilistic analysis of wave-induced seabed response based on stochastic finite element method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(5): 1545-1556. (in Chinese)

[16] 赵炼恒,董潇阳,胡世红,等. 考虑空间变异性的分层边坡可靠度分析[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(12):3180-3187.
ZHAO L H, DONG X Y, HU S H, et al. Reliability analysis of layered slope considering spatial variability[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(12): 3180-3187. (in Chinese)

[17] 边宏光,王顺,马海善,等. 基于随机场理论的土石混合体边坡稳定性[J]. 地质科技通报,2024,43(6):162-170.
BIAN H G, WANG S, MA H S, et al. Stability of soil-rock mixture slopes based on random field theory [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(6): 162-170. (in Chinese)

[18] 曾勇,李亚军,严俊,等. 考虑土体强度参数深度依赖性的非平稳随机场边坡滑动深度和体积分析[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(3): 174-183.
ZENG Y, LI Y J, YAN J, et al. Sliding depth and volume analysis of non-stationary random field slopes considering depth-dependent soil strength parameters [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(3): 174-183. (in Chinese)

[19] LIAO K, WU Y P, MIAO F S, et al. Probabilistic risk assessment of earth dams with spatially variable soil properties using random adaptive finite element limit analysis [J]. Engineering with Computers, 2023, 39(5): 3313-3326.

[20] CAO V H, GO G H. A novel approach to stability analysis of random soil-rock mixture slopes using finite element method in ABAQUS[J]. Natural Hazards, 2024, 120(15): 14381-14407.

[21] CHAKRABORTY R, DEY A. Random finite element and limit equilibrium methods-based probabilistic stability analyses of a cut slope[J]. Indian Geotechnical Journal, 2022, 52(4): 969-978.

[22] LI J H, TIAN Y H, CASSIDY M J. Failure mechanism and bearing capacity of footings buried at various depths in spatially random soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(2): 04014099.

[23] DAS A, JAYASHREE C, VISWANADHAM B V S. Effect of randomly distributed geofibers on the piping behaviour of embankments constructed with fly ash as a fill material [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(5): 341-349.

[24] 王坤,孙檀坚,杨倩. 参数变异对坝体变形影响的随机有限元敏感性分析[J]. 水利科学与寒区工程,2024,7(5):13-19.
WANG K, SUN T J, YANG Q. Stochastic finite element sensitivity analysis on the influence of parameter variation on dam deformation[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2024, 7(5): 13-19. (in Chinese)

[25] 相彪, 项甘雨, 杨连斌,等. 基于空间随机场理论的邓肯-张E-B模型参数敏感性研究[J]. 中国农村水利水电,2025(1):188-192.
XIANG B, XIANG G Y, YANG L B, et al. Research on parameter sensitivity of Duncan-Chang E-B model based on spatial random field theory[J]. China Rural Water and Hydropower, 2025(1): 188-192. (in Chinese)

[26] 陈朝晖, 黄凯华. 土质边坡可靠性分析的分层非平稳随机场模型[J]. 岩土工程学报,2020,42(7): 1247-1256.
CHEN Z H, HUANG K H. Non-homogeneous random field model for reliability analysis of slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(7): 1247-1256. (in Chinese)

[27] 李健斌,陈健,程红战,等. 考虑空间变异性的盾构隧道地层力学响应敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(8):1667-1676.
LI J B, CHEN J, CHENG H Z, et al. Sensitivity analysis of mechanical parameters to surrounding-soil response induced by shield tunneling considering spatial variability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019,38(8):1667-1676.(in Chinese)

[28] 郜新军,苏庆辉,张浩,等. 洛阳粉质黏土与砂卵石复合地层地铁变形控制指标研究[J]. 铁道科学与工程学报,2024,21(11):4624-4636.
GAO X J,SU Q H,ZHANG H,et al. Subway deformation control index of silty clay and sand-pebble composite strata in Luoyang [J]. Journal of Railway Science and Engineering,2024,21(11):4624-4636.(in Chinese)

[29] 谭晓慧,董小乐,费锁柱,等. 基于KL展开的可靠度分析方法及其应用[J]. 岩土工程学报,2020,42(5):808-816.
TAN X H,DONG X L,FEI S Z,et al. Reliability analysis method based on KL expansion and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2020,42(5):808-816.(in Chinese)

[30] 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 S H,LI D Q,ZHOU C B,et al. Slope reliability analysis considering effect of autocorrelation functions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(3):508-518.(in Chinese)

[31] 韩玺. 基于随机场理论的巷道围岩变形稳定可靠度研究[D]. 焦作:河南理工大学,2023.
HAN X. Research on deformation stability reliability of roadway surrounding rock based on random field theory [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University,2023.(in Chinese)

[32] 何贻海. 基于Monte-Carlo随机有限元方法的自然对流不确定性研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2017.
HE Y H. Uncertainty research of natural convection based on Monte-Carlo stochastic finite element method [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology,2017.(in Chinese)

[33] 张金,陈克坚,曾永平,等. 基于改进拉丁超立方抽样的高墩铁路桥梁地震可靠度分析方法[J]. 铁道学报,2024,46(8):142-151.
ZHANG J, CHEN K J, ZENG Y P, et al. Seismic reliability analysis method for high-pier railway bridges based on improved Latin hypercube sampling [J]. Journal of the China Railway Society,2024,46(8):142-151.(in Chinese)

[34] 俞兵,胡海军,谢国山,等. 熔盐罐罐底角焊缝疲劳可靠性评估方法及应用[J]. 西安交通大学学报,2025,59(1):215-224.
YU B, HU H J, XIE G S, et al. Methodology and application of fatigue reliability assessment fillet welds at the bottom of molten salt tanks[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2025,59(1):215-224.(in Chinese)

[35] 张士朝. 考虑岩土体参数不确定性的隧道变形稳定可靠度分析方法及应用研究[D]. 西安:长安大学,2024.
ZHANG S C. Research on reliability analysis methods and applications of tunnel deformation stability considering the uncertainty of geotechnical parameters [D]. Xi'an: Chang'an University, 2024.(in Chinese)

[36] 李典庆,蒋水华,周创兵, 等. 考虑参数空间变异性的边坡可靠度分析非侵入式随机有限元法[J]. 岩土工程学报, 2013,35(8):1413-1422.
LI D Q, JIANG S H, ZHOU C B, et al. Reliability analysis of slopes considering spatial variability of soil parameters using non-intrusive stochastic finite element method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(8):1413-1422.(in Chinese)

[37] AL-BITTAR T,SOUBRA A H. Bearing capacity of strip footings on spatially random soils using sparse polynomial chaos expansion [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,2013,37(13):2039-2060.

[38] 刘亚栋,刘贤,黎学优,等. 基于强度折减采样与高斯过程回归的空间变异土坡自适应可靠度分析[J]. 岩土工程学报,2024,46(5):978-987.
LIU Y D, LIU X, LI X Y, et al. Adaptive reliability analysis of spatially variable soil slopes using strength reduction sampling and Gaussian process regression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2024,46(5):978-987.(in Chinese)

[39] TIAN Y H, CASSIDY M, UZIELLI M. Probabilistic assessment of the bearing capacity of shallow strip footings on stiff-over-soft clay [C]. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 2013.

[40] 张冰冰, 宋飞. 土工格室加筋正常固结剪缩类土体模型在ABAQUS中的开发与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2025,44(2): 492-504.
ZHANG B B, SONG F. Development and application of a geocell-reinforced normally consolidated shear-contractive soil model in ABAQUS [J] . Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2025,44(2):492-504.(in Chinese)

[41] FENTON G A, GRIFFITHS D V. Risk Assessment in Geotechnical Engineering [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.,2008.

[42] CHO S E. Effects of spatial variability of soil properties on slope stability[J]. Engineering Geology,2007,92(3-4):97-109.

[43] SALGADO R, KIM D. Reliability Analysis of Load and Resistance Factor Design of Slopes [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(1):57-73.

[44] 黄伟. 考虑参数空间变异特性的边坡可靠度随机有限元分析[D]. 西安:长安大学,2023.
HUANG W. The random finite element analysis of slope stability reliability considering spatial variation of parameters[D]. Xi'an: Chang'an University,2023.(in Chinese)

[45] 王建娥, 杨杰, 程琳, 等. 考虑材料参数空间变异性的堆石坝非侵入式随机有限元研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 200-207.
WANG J E, YANG J, CHENG L, et al. Study on the noninvasive stochastic finite element method of rockfill dam considering spatial variability of material parameters[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2019,30(3): 200-207.(in Chinese)