

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.055>



考虑地层变异和趋势非线性的海床波速 结构非平稳随机场模拟方法

张 岩¹, 陈国兴^{1,2*}, 赵 凯^{1,2}, 方 怡^{1,3}, 彭艳菊³

1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏南京 210009
2. 江苏省土木工程防震技术研究中心, 江苏南京 210009
3. 国家自然灾害防治研究院, 北京 100085

摘 要: 地层及其剪切波速(V_s)结构的时空变异性对场地地震反应有显著影响. 基于渤海湾海床钻孔资料, 采用与耦合马尔可夫链相比对随机地层模拟范围更广、对地层界限模拟效果更光滑的嵌入式马尔可夫链模型模拟钻孔深度 h 以浅地层的变异性, 模拟结果具有较高的精度. 采用点估计法给出了以幂函数和线性函数描述海床 V_s 随 h 变化的趋势时相应 V_s 的均值和标准差随 h 的变化. 基于实测钻孔的 V_s 剖面, 采用非平稳条件随机场模拟随机 V_s -结构的空间变异性. 发现考虑地层的变异性以及忽略 V_s 沿 h 变化的非线性趋势均显著增大随机 V_s -结构模拟结果的标准差. 采用隶属函数和模糊马尔可夫链模型, 建立海域钻孔深度外延的未知地层和近岸陆地相应深度已知地层的相关性和转移概率, 给出了钻孔深度以深的海床随机地层及其 V_s -结构的可能空间分布. 为开展海洋工程场地地震反应分析提供了合理的随机地层和 V_s -结构资料.

关键词: 海床场地; 剪切波速结构; 空间变异性; 非平稳随机场; 趋势非线性; 地震; 工程地质.

中图分类号: P694

文章编号: 1000-2383(2024)11-4225-13

收稿日期: 2023-02-21

Non-Stationary Random Field Simulation Method of Seabed Site Shear Wave Velocity Structures Considering Stratigraphy Variation and Nonlinear Trend

Zhang Yan¹, Chen Guoxing^{1,2*}, Zhao Kai^{1,2}, Fang Yi^{1,3}, Peng Yanju³

1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China
2. Civil Engineering and Earthquake Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing 210009, China
3. National Institute of Natural Hazards, Beijing 100085, China

Abstract: The spatial variabilities of stratigraphy and S-wave velocity (V_s) structures have significant influence on the results of seismic site response analyses. Based on the borehole data of the seabed of Bohai Bay, the embedded Markov chain model, which has a wider simulation range for random stratigraphy and smoother simulation effect for stratigraphic boundary than the coupled Markov chain, is used to simulate the variabilities of random stratigraphy with depth less than the borehole bottoms, and the simulation results have higher precision. The point estimation method is used to give the change of the means and standard deviations of V_s with h of the seabed when describing the variation trend of V_s with h by power function and linear function. Based

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(Nos.51978334, 51978335).

作者简介: 张岩(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土地震工程研究. ORCID: 0000-0002-6572-1744. E-mail: zzzzyan123@163.com

*** 通讯作者:** 陈国兴, E-mail: gxc6307@163.com

引用格式: 张岩, 陈国兴, 赵凯, 方怡, 彭艳菊, 2024. 考虑地层变异和趋势非线性的海床波速结构非平稳随机场模拟方法. 地球科学, 49(11): 4225—4237.

Citation: Zhang Yan, Chen Guoxing, Zhao Kai, Fang Yi, Peng Yanju, 2024. Non-Stationary Random Field Simulation Method of Seabed Site Shear Wave Velocity Structures Considering Stratigraphy Variation and Nonlinear Trend. *Earth Science*, 49(11): 4225—4237.

on the measured V_s -profiles at the boreholes, the spatial variabilities of random V_s -structures are simulated by using the non-stationary conditional random field method. It is found that considering the spatial variabilities of the random stratigraphy and ignoring the nonlinear variation of V_s along h can significantly increase the standard deviations of the simulated random V_s -structures. The correlations and transfer probabilities between the unknown stratigraphy below the seabed borehole bottoms and the known stratigraphy at the same depth of near-shore land are established using the membership function and fuzzy Markov chain model, the possible spatial variabilities of random seabed stratigraphy and V_s -structures below the borehole bottoms are obtained. It provides reasonable random stratigraphy and V_s -structures for seismic response analysis of offshore engineering site.

Key words: seabed site; S-wave velocity structure; spatial variability; non-stationary random field; nonlinear trend; earthquakes; engineering geology.

0 引言

随着我国建设海洋强国战略的推进,近海海洋工程建设与日俱增.我国海域多为历史强震多发区,海洋工程的地震安全性评价是一个亟需解决的科学问题.地震是造成工程结构破坏的重要因素之一(崔鹏等,2022;张伟丽等,2022;赵飞等,2022).海洋工程设计地震动参数是通过海床场地地震反应分析确定的.海床地层及其剪切波速(V_s)空间结构建模的科学、合理性,则是海床场地地震反应分析结果可信的基础.由于海上岩土勘探难度大、耗时长、费用高、精度低,通常仅能揭示极为有限钻孔处的地层和 V_s 剖面,测试数据有较大的不确定性,据此推测的海床地层和 V_s 剖面存在很大的随机性.通常采用已知钻孔数据的插值方法推测无钻孔处地层和 V_s 剖面(Chen *et al.*, 2018).这种确定性方法无法给出不同钻孔之间地层和 V_s -结构空间分布的不确定性.地震作用下,正确考虑软土地层和土动力参数的空间变异性是保障土体在地震作用下液化概率预测结果合理性的重要前提(Gong *et al.*, 2021).同理,对于海床场地地震反应分析,应考虑地层和 V_s -结构空间分布的不确定性,以为海洋工程地震风险水平评价提供科学依据.

利用既有钻孔数据,采用随机过程理论,可以表征地层的不确定性分布.一些学者采用耦合马尔可夫链模型表征地层的随机分布(Elfeki and Dekking, 2001; Qi *et al.*, 2016; 祁小辉等, 2017; Li *et al.*, 2019).该方法无法考虑边界钻孔外围地层的不确定性,且只能表征地层沿水平向和竖向转移,构建的地层边界是线性的,难以描述不同沉积土的界限明显不规则的地层(Qi *et al.*, 2016; 祁小辉等, 2017; Li *et al.*, 2019; Gong *et al.*, 2021).同时,该方法假定已知钻孔区域内的地表地层是完全确定的.事实上,对尺度较大场地,表层难以直接确

定.为了克服耦合马尔可夫链模型的不足,相继提出了基于嵌入式马尔可夫链模型(Carle and Fogg, 1997, 2020)、马尔可夫随机场(Li *et al.*, 2016)和条件随机场(Gong *et al.*, 2021)的随机地层建模方法.这些方法仅能表征钻孔深度以浅的无钻孔处的地层随机性.地震基岩面的选取是影响场地地震效应分析结果合理性的重要因素(朱姣等, 2015).深软海床场地的基岩埋藏较深(秦蕴珊, 1985),难以获取深达基岩的完整地层钻孔数据.如能用定量的方法将海床钻孔深度以深的未知地层和近岸陆地相应深度处的已知地层建立联系,从而对钻孔深度以深的海床地层作出合理的推测,确定出相应的地震基岩面,这对海洋工程的地震安全性评价具有十分重要的意义.

通常采用无条件随机场表征土体参数的空间变异性(Jiang and Huang, 2018; 仇文岗等, 2021).无条件随机场无法保证钻孔处的土体参数模拟值等于实测值,对土体参数空间变异性的表征不够准确(Gong *et al.*, 2021).以钻孔处的土体参数模拟值等于实测值为限制条件模拟土体参数的空间变异性,则为条件随机场方法.通常采用土体参数均值和标准差不变的平稳随机场(Gong *et al.*, 2021)或土体参数均值随深度 h 线性变化(Griffiths and Yu, 2015; Jiang and Huang, 2018)的非平稳随机场(Jiang and Huang, 2018)模拟参数的空间变异性.事实上,土体参数的均值随 h 的变化常呈非线性趋势,其标准差随 h 的变化亦存在显著的变化,例如: V_s 和动剪切模量比 $G/G_{\max}$ (陈卓识等, 2019; 张岩等, 2023)的标准差均是随 h 变化的.张岩等(2023)采用点估计法分析了渤海海洋土 $G/G_{\max}$ 和阻尼比 λ 的均值和标准差随 h 的非线性变化规律.该方法可为研究随深度非线性变化的土体参数空间变异性的非平稳随机场的模拟提供技术手段.

本文基于渤海湾海床实测钻孔数据,采用嵌入

式马尔可夫链模型描述地层之间的转移概率,构建钻孔深度以浅二维地层的可能分布.结合点估计法和条件随机场方法,建立表征随 h 非线性变化的随机海床地层 V_s -结构空间变异性的非平稳条件随机场.最后,基于隶属函数和模糊马尔可夫链模型,建立海域钻孔深度外延的未知地层和近岸陆地相同深度处已知地层之间的相关性和转移概率,构建出钻孔深度以深的二维随机海床地层及 V_s -结构的可能空间分布.

1 随机地层模拟的马尔可夫链模型

1.1 随机地层模拟原理

随机地层模拟是以钻孔揭示的地层信息为基础,将研究区域网格化(图1),计算地层类型未知处随机地层的累积条件概率分布曲线.设定通过所有网格的随机路径,在概率区间 $[0, 1]$ 上随机抽取数值 U ,将 U 对应的地层类型赋予待估值处.沿随机路径在其他位置处运行这一过程,可得到研究区域内地层的一种可能分布.使用新的随机路径重复以上步骤,又可得到另一种可能的地层分布.

1.2 随机地层的马尔可夫性

随机地层模拟结果的合理性取决于地层累积条件概率分布曲线的计算.通过随机地层的马尔可夫性求取随机地层间的转移概率及地层累积条件概率分布曲线是一种成熟、有效的方法(Carle and Fogg, 1997, 2020; Elfeki and Dekking, 2001; Li *et al.*, 2016, 2019; Qi *et al.*, 2016; 祁小辉等, 2017).转移概率 $t_{ij}(h_\varphi)$ 是指,在点 X 处地层类型是 i 的条件下,沿 φ 方向与点 X 相距 h_φ 的点 $X+h_\varphi$ 处地层类型是 j 的概率:

$$t_{ij}(h_\varphi) = P\{X+h_\varphi \text{ 处是地层 } j | X \text{ 处是地层 } i\}, \quad (1)$$

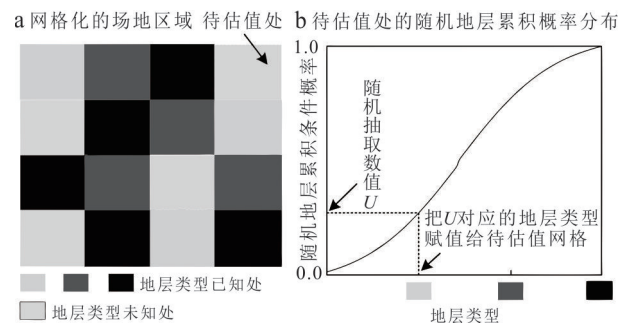


图1 随机地层空间变异性的模拟

Fig. 1 Simulation of spatial variabilities of random stratigraphy

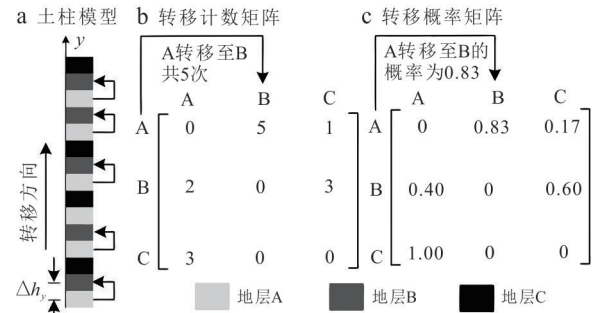


图2 地层转移的一维马尔可夫链模型

Fig. 2 1D Markov chain model of stratigraphy transfers

式中, i 和 j 是两种相同或任意类型的地层.

图2给出了一维空间中地层A、B和C以步长 Δh_y 沿 y 轴正向转移的一维马尔可夫链模型示意图.统计各地层转移至其他地层的次数,可得马尔可夫转移计数矩阵,将该矩阵中每个元素除以该行的和,可得描述地层之间转移可能性的马尔可夫转移概率矩阵.当存在多个钻孔数据时,将多个钻孔数据进行汇总,指定转移距离,统计各地层按照转移距离沿着竖向转移至其他地层的次数,继而确定出一个竖向转移计数和一个竖向转移概率矩阵.

描述不同钻孔之间随机地层的可能性分布时,需给出随机地层沿平面任意方向的转移概率.地层的空间分布是连续的,钻孔数据丰富时,可采用连续马尔可夫链模型计算随机地层之间的转移概率(Carle and Fogg, 1997):

$$T(h_\varphi) = \exp(R_\varphi h_\varphi), \quad (2)$$

式中, $T(h_\varphi)$ 是描述随机地层间转移可能性大小的转移概率矩阵,对于地层类型数为 k 的场地, $T(h_\varphi)$ 中第 i 行、 j ($i, j=1, \dots, k$)列的元素 $t_{ij}(h_\varphi)$ 表示随机地层 i 沿方向 φ 经距离 h_φ 转移至地层 j 的概率; R_φ 为转移速率矩阵, R_φ 中第 i 行、 j 列的元素 $r_{ij, \varphi}$ 表示随机地层 i 沿方向 φ 经单位距离转移至地层 j 的概率,对 R_φ 进行谱分解后可得(Carle and Fogg, 1997):

$$R_\varphi = \sum_{j=1}^k \lambda_{j, \varphi} Z_{j, \varphi}, \quad (3)$$

式中, $\lambda_{j, \varphi}$ 和 $Z_{j, \varphi}$ 分别表示 R_φ 的特征值和谱分量矩阵; $Z_{j, \varphi}$ 可按式求解(Carle and Fogg, 1997):

$$Z_{j, \varphi} = \frac{\prod_{i \neq j} (\lambda_{i, \varphi} I - R_\varphi)}{\prod_{i \neq j} (\lambda_{i, \varphi} - \lambda_{j, \varphi})}, \quad (4)$$

式中, I 为单位矩阵.联合式(3)和式(4),通过迭代求解可计算出 $Z_{j, \varphi}$ 之后,由式(2)可得到 $T(h_\varphi)$.钻孔数量较少时,可选取适当的间距 Δh_φ 按上述过程

计算随机地层的转移概率矩阵。

1.3 嵌入式马尔可夫链模型

由于上述过程求解 R_φ 的主对角线元素 $r_{jj,\varphi}$ 较为困难, Carle and Fogg (1997, 2020) 提出了基于嵌入式马尔可夫链模型求解 $r_{jj,\varphi}$ 的方法. 嵌入式马尔可夫链模型的转移概率矩阵 $S_{ij}(h_\varphi)$ 中第 i 行、 j 列的元素 $s_{ij}(h_\varphi)$ 为:

$$s_{ij}(h_\varphi) = P\{X+h_\varphi \text{ 是处地层 } j | X \text{ 是处地层 } i\}, i \neq j, \quad (5)$$

与式(1)不同的是, 式(5)只关注不同随机地层之间的转移, 相应的 $r_{jj,\varphi}$ 可由式(6)得到 (Carle and Fogg, 1997):

$$r_{jj,\varphi} = -\frac{1}{\bar{L}_{j,\varphi}}, \quad (6)$$

式中, $\bar{L}_{j,\varphi}$ 为随机地层 j 在 φ 方向上的平均长度, 可由 j 在 φ 方向上的总长度除以 j 与其他随机地层相互转移的次数得到 (Carle and Fogg, 1997). 利用式(6)求解 $r_{jj,\varphi}$, 可简化求解过程、提高求解效率. R_φ 非主对角线元素 $r_{ij,\varphi}$ 可根据 1.2 节求解, $r_{ij,\varphi}$ 与 $s_{ij}(h_\varphi)$ 之间存在如下关系 (Carle and Fogg, 1997):

$$r_{ij,\varphi} = \frac{s_{ij}(h_\varphi)}{\bar{L}_{j,\varphi}}, \quad (7)$$

钻孔数据通常不足以描述随机地层沿任意方向的转移概率 $s_{ij}(h_\varphi)$. 此时, 可将竖向 (钻孔深度方向) 和水平向 (垂直于钻孔方向) 作为随机地层转移的主方向, 根据式(2)~式(7)求出随机地层在竖向和水平向的转移速率 $r_{ij,\text{竖向}}$ 和 $r_{ij,\text{水平}}$, $r_{ij,\varphi}$ 可按式(8)确定 (Carle and Fogg, 1997):

$$r_{ij,\varphi} = \sqrt{\left(\frac{h_{\text{竖向}}}{h_\varphi} r_{ij,\text{竖向}}\right)^2 + \left(\frac{h_{\text{水平}}}{h_\varphi} r_{ij,\text{水平}}\right)^2}, \quad (8)$$

式中, $h_\varphi = \sqrt{h_{\text{竖向}}^2 + h_{\text{水平}}^2}$; $h_{\text{竖向}}$ 和 $h_{\text{水平}}$ 分别为随机地层在竖向和水平向的转移距离. 将 $r_{ij,\varphi}$ 代入式(7), 可求出 $s_{ij}(h_\varphi)$.

1.4 基于最大熵法的随机地层水平向转移概率求解

地层沿深度是连续分布的, 依据 1.2 节和 1.3 节, 可较准确地计算出地层的竖向转移概率矩阵 $S_{ij}(h_{\text{竖向}})$. 由于钻孔的稀疏性, 水平向没有连续的地层信息, 如何考虑随机地层沿水平向的不确定性, 确定地层水平向转移概率矩阵 $S_{ij}(h_{\text{水平}})$ 将是一个难题. 当钻孔数量稀少时, 可以研究区及其周围地区的既有地质图为依据, 在地质图上布置虚拟钻孔对

水平向转移概率矩阵进行估计 (Elfeki and Dekking, 2001). 亦可采用极大似然估计法 (邓志平等, 2018) 以及最大熵法 (Carle and Fogg, 2020) 对水平向转移概率矩阵进行估计. 本文采用最大熵法对随机地层水平向转移概率矩阵进行求解. 地层 i 沿水平向的不确定性可用熵值 $E_{i,\text{水平}}$ 度量 (Carle and Fogg, 2020):

$$E_{i,\text{水平}} = -\sum_{j=1}^k \bar{L}_{i,\text{水平}} r_{ij,\text{水平}} \ln [\bar{L}_{i,\text{水平}} r_{ij,\text{水平}}], \quad (9)$$

式中, $\bar{L}_{i,\text{水平}}$ 表示 i 在水平方向上的平均长度. 根据 Walther 沉积定律 (Qi et al., 2016; Li et al., 2019), $\bar{L}_{i,\text{水平}}$ 可通过既有钻孔地层 i 的竖向平均厚度 $\bar{L}_{i,\text{竖向}}$ 结合地层倾角 θ 计算 (Qi et al., 2016; Li et al., 2019):

$$\bar{L}_{i,\text{水平}} = \bar{L}_{i,\text{竖向}} \cot \theta, \quad (10)$$

θ 可通过既有钻孔数据进行克里金插值估算 (Gong et al., 2021). 当各地层对应的熵值之和最大时, 地层分布的随机性最强 (Carle and Fogg, 2020):

$$\sum_{i=1}^k E_{i,\text{水平}} = \left(\sum_{i=1}^k E_{i,\text{水平}} \right)_{\max}, \quad (11)$$

钻孔数不足以准确估计 $S_{ij}(h_{\text{水平}})$ 时, 可用 1.2 和 1.3 节方法确定出系统熵值最大的 R_φ 后得到 $S_{ij}(h_{\text{水平}})$.

1.5 随机地层累积条件概率分布的确定

按照 1.2 节~1.4 节, 计算出 $S_{ij}(h_{\text{竖向}})$ 和 $S_{ij}(h_{\text{水平}})$ 和任意方向的转移概率后, 待估值网格 $u_\alpha (\alpha=1, 2, \dots, n)$ 处地层 i 出现的概率 $P_i(u_\alpha)$ 为 (Carle and Fogg, 2020):

$$P_i(u_\alpha) = \{u_\alpha \text{ 处为 } i | g_j(u_\beta); \beta \neq \alpha; \\ j=1, 2, \dots, k\} = \sum_{\beta=1}^n \sum_{j=1}^k g_j(u_\beta) \omega_{ij,\beta}, \quad (12)$$

式中, n 是待估值网格的个数; $g_j(u_\beta)$ 是判断地层 j 是否出现在网格 u_β 处的指示变量, 如地层 j 出现在 u_β 处, 则 $g_j(u_\beta) = 1$, 否则, $g_j(u_\beta) = 0$; $\omega_{ij,\beta}$ 为加权系数, $\omega_{ij,\beta}$ 可通过基于转移概率的协同克里金方程组计算 (Carle and Fogg, 2020):

$$\begin{bmatrix} T(x_1 - x_1) & \dots & T(x_n - x_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ T(x_1 - x_n) & \dots & T(x_n - x_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T(x_\alpha - x_1) \\ \vdots \\ T(x_\alpha - x_n) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式(13)等式左边的第一个矩阵为按照 1.2 节~1.4 节方法计算得到的随机地层之间的转移概率;等式右边为其他位置处土层转移至某待估值位置的概率. 式中:

$$W_{\beta} = \begin{bmatrix} \mathcal{W}_{11,\beta} & \dots & \mathcal{W}_{1k,\beta} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathcal{W}_{k1,\beta} & \dots & \mathcal{W}_{kk,\beta} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

其中 $\beta=1, \dots, n$; 式(14)中矩阵中的元素是衡量不同位置、不同地层转移至待估值位置处的权系数. 将地层 i 赋值给 u_a 的标准为 (Gong *et al.*, 2021):

$$\sum_{j=1}^{i-1} P_j(u_a) < U(u_a) \leq \sum_{j=1}^i P_j(u_a), \quad (15)$$

式中, $U(u_a)$ 和 $P_j(u_a)$ 分别表示在 u_a 处产生的随机数和随机地层的累积条件分布概率.

2 随机 V_s -结构的条件随机场模型

2.1 各类土随机 V_s 的均值和标准差的求解

鉴于钻孔剖面中各类土的 V_s 通常随 h 呈非线性变化, 描述随机 V_s -结构空间变异性的均值和标准差也应是随 h 变化的. 采用点估计法估算各类土的随机 V_s 的均值和标准差随 h 的变化 (张岩等, 2023). 假设钻孔处实测的 V_s 随 h 的变化为幂函数:

$$V_s = ah^b, \quad (16)$$

式中, a 和 b 为同类型土的拟合参数. 对每一类型土, 用式(16)对每个钻孔中该类土的 V_s 与 h 的关系进行拟合, 计算出该类土 a 和 b 的均值 $\bar{a}$ 、 $\bar{b}$ 和标准差 $\sigma[a]$ 、 $\sigma[b]$. 不同深度处该类土 V_s 的均值 $E[V_s]$ 可按式计算:

$$E[V_s] = \begin{cases} p_{++} V_{s++} + p_{+-} V_{s+-} + \\ p_{-+} V_{s-+} + p_{--} V_{s--} \end{cases}, \quad (17)$$

式中, 权函数 $p_{++} = p_{+-} = 1 + \rho/4$, $p_{-+} = p_{--} = 1 - \rho/4$; ρ 为参数 a 和 b 的相关系数; $V_{s\pm\pm}$ 采用式(18)计算:

$$V_{s\pm\pm} = (\bar{a} \pm \sigma[a]) h^{(\bar{b} \pm \sigma[b])}, \quad (18)$$

不同深度处该类土 V_s 的标准差 $\sigma[V_s]$ 为:

$$\sigma[V_s] = \sqrt{E[V_s^2] - E[V_s]^2}, \quad (19)$$

式中, $E[V_s^2]$ 为 V_s 的二阶矩:

$$E[V_s^2] = \begin{cases} p_{++} V_{s++}^2 + p_{+-} V_{s+-}^2 + \\ p_{-+} V_{s-+}^2 + p_{--} V_{s--}^2 \end{cases}, \quad (20)$$

通过式(16)~式(20), 可求出不同深度处该类土随机 V_s 的均值和标准差.

2.2 随机地层 V_s -结构的条件随机场模拟

各钻孔剖面的 V_s -结构已知, 可采用简单、高效的 Hoffman 条件随机场模拟方法模拟随机 V_s -结构的条件随机场, 其过程如下 (Hoffman, 2008; Gong *et al.*, 2018, 2021):

(1) 随机 V_s -结构无条件随机场的模拟. 忽略钻孔剖面 V_s -结构的约束, 采用无条件随机场模拟随机 V_s -结构的条件随机场. 岩土参数的空间变异性符合对数正态分布 (Gong *et al.*, 2018, 2021; Jiang and Huang, 2018). 为了描述不同位置处 V_s 值的相关性, 需离散随机 V_s -结构的对数正态随机场. 采用矩阵分解法离散 V_s -结构的对数正态随机场. V_s -结构的对数正态随机场 $H_{V_s}(x, y)$ 可表示为 (Gong *et al.*, 2018, 2021; Jiang and Huang, 2018):

$$H_{V_s}(x, y) = \exp\{E[\ln V_s] + \sigma[\ln V_s] \ln H_{V_s}(x, y)\}, \quad (21)$$

式中, (x, y) 表示网格几何中心的坐标; $E[\ln V_s]$ 和 $\sigma[\ln V_s]$ 分别表示 $\ln V_s$ 的均值和标准差 (Gong *et al.*, 2018, 2021; Jiang and Huang, 2018):

$$E[\ln V_s] = \ln E[V_s] - 0.5\sigma^2 \ln[V_s], \quad (22)$$

$$\sigma[\ln V_s] = \sqrt{\ln[1 + (\sigma[V_s]/E[V_s])^2]}, \quad (23)$$

$\ln H_{V_s}(x, y)$ 为 $\ln V_s$ -结构的标准高斯随机场 (Gong *et al.*, 2018, 2021; Jiang and Huang, 2018):

$$\ln H_{V_s}(x, y) = LS, \quad (24)$$

S 为独立标准随机样本矩阵; L 为对 $\ln H_{V_s}(x, y)$ 的相关矩阵 R 进行乔列斯基分解得到的下三角矩阵, 且 $LL^T = R$. R 中的第 c 行、 d 列元素 $R_{c,d}$ 表示位置 (x_c, y_c) 和 (x_d, y_d) 处 $\ln H_{V_s}(x, y)$ 之间的相关性, $R_{c,d}$ 可采用指数型自相关函数计算 (Gong *et al.*, 2018, 2021; Jiang and Huang, 2018):

$$R_{c,d} = \exp\left[-2\left(\frac{|x_c - x_d|}{\delta_{\text{水平}}} + \frac{|y_c - y_d|}{\delta_{\text{竖向}}}\right)\right], \quad (25)$$

式中, $\delta_{\text{水平}}$ 和 $\delta_{\text{竖向}}$ 分别为土体参数沿水平和竖向的波动范围, 当 $|x_c - x_d| \leq \delta_{\text{水平}}$ 和 $|y_c - y_d| \leq \delta_{\text{竖向}}$ 时, (x_c, y_c) 和 (x_d, y_d) 处土体参数分别在水平和竖向具有相关性, 反之不具有相关性. 土体参数的 $\delta_{\text{竖向}}$ 通常在 1~20 m (Jiang and Huang, 2018; Phoon *et al.*, 2022), $\delta_{\text{水平}}$ 与用于离散化研究区的网格水平向尺寸也即宽度 S_h 与竖向尺寸也即高度 S_v 有关, $\delta_{\text{水平}} = \delta_{\text{竖向}} \times (S_h/S_v)$ (Gong *et al.*, 2021).

(2) 随机 V_s -结构条件随机场的确定. 模拟出随机 V_s -结构无条件随机场后, 基于钻孔剖面 V_s -结构

的约束条件校正 V_s -结构的模拟结果,给出 V_s -结构的条件随机场:各类土的剪切波速 $V_{s,cn}$ 可表示为 $V_{s,cn} = [V_{s,BH}, V_{s,Pcn}]$,其中, $V_{s,BH}$ 是实测钻孔处地层的 V_s 值矩阵. $V_{s,Pcn}$ 是由条件随机场模拟的非钻孔处随机地层的 V_s 值矩阵 (Gong *et al.*, 2018):

$$V_{s,Pcn} = V_{s,Pu} + [C_{P,BH}] [C_{BH,BH}]^{-1} (V_{s,BH} - V_{s,BHu}), \quad (26)$$

式中, $V_{s,Pu}$ 和 $V_{s,BHu}$ 分别表示由无条件随机场模拟得到的非钻孔处和钻孔处地层的 V_s 矩阵; $[C_{P,BH}]$ 表示非钻孔处和钻孔处局部平均后的 V_s 协方差矩阵; $[C_{BH,BH}]$ 表示钻孔处地层局部平均后 V_s 之间的协方差矩阵 (Gong *et al.*, 2018).

Hoffman 条件随机场模拟方法的不足之处在于,该方法假定钻孔处土体参数是确定值.受试验人员操作水平和测试仪器误差的影响,钻孔处土体参数的实测值也是具有误差的.因此,在取样和测试时必须严格按照相关试验规范进行操作,以对钻孔处土体参数的真实值进行准确的表征.

2.3 模拟次数 N 的确定

为了充分捕捉非钻孔处随机地层和随机 V_s -结构的各种可能性分布,随机地层和随机 V_s -结构的模拟次数需达一定值 N . 随机地层的空间变异性模拟次数 N 可由钻孔以外网格的平均信息熵的变异系数决

定. 对于第 l 次 ($l=1, 2, \dots, N$) 随机地层模拟,平均信息熵 E_{AE} 为 (Gong *et al.*, 2021):

$$E_{AE} = \sum_{a=1}^n \left[- \sum_{i=1}^k p_i(u_a) \log p_i(u_a) \right] / n, \quad (27)$$

式中, $p_i(u_a)$ 表示随机地层 i 分配给钻孔外网格 u_a 的概率,由模拟结果统计得到. 完成 N 次模拟后,可得 N 个 E_{AE} 值,并计算出 E_{AE} 的变异系数 $COV[E_{AE}]$. u_a 经 N 次随机模拟得到 V_s 的标准差 $\sigma_{V_s}(u_a)$ 为 (Gong *et al.*, 2021):

$$\sigma_{V_s}(u_a) = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^N \left\{ V_s^l(u_a) - \frac{\sum_{l=1}^N [V_s^l(u_a)]}{N} \right\}^2}{N-1}}, \quad (28)$$

式中, $V_s^l(u_a)$ 为第 l 次随机模拟中 u_a 处 V_s 的模拟值. 经 N 次模拟后钻孔外所有网格 $\sigma_{V_s}(u_a)$ 的均值 $E_{A\sigma}$ 为:

$$E_{A\sigma} = \frac{1}{n} \sum_{a=1}^n [\sigma_{V_s}(u_a)], \quad (29)$$

N 取不同的值,可得不同的 $E_{A\sigma}$,进而可计算出 $E_{A\sigma}$ 的变异系数 $COV[E_{A\sigma}]$. 当 $COV[E_{AE}] \leq 0.1\%$ 且 $COV[E_{A\sigma}] \leq 0.1\%$ 时,则认为 N 次模拟能够较全面地给出随机地层及其随机 V_s -结构的可能性分布 (Gong *et al.*, 2021). 图 3 为本文海床和剪切波速结构的随机模拟流程.

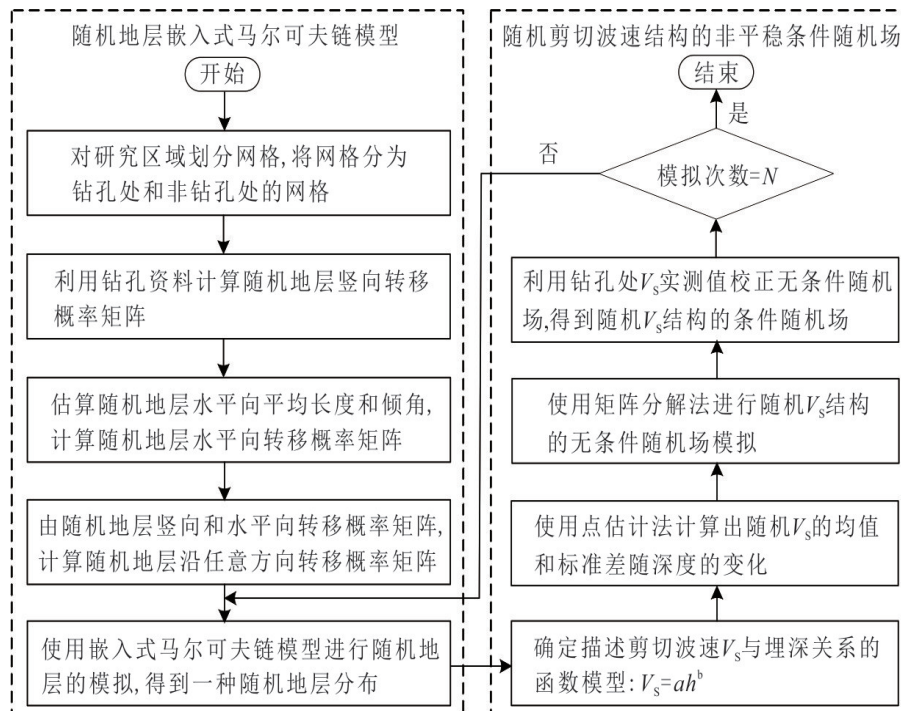


图 3 二维海床和剪切波速结构的随机模拟流程

Fig. 3 Random simulation flow of 2D seabed stratigraphy and S-wave velocity structures

3 海床随机地层和随机 V_s -结构模拟

3.1 嵌入式马尔可夫链模型优势性验证

利用祁小辉等(2017)给出的钻孔资料,使用嵌入式马尔可夫链模型模拟了相关区域随机地层的分布,将模拟结果与祁小辉等(2017)给出的基于耦合马尔可夫链的结果进行对比,如图4所示.耦合马尔可夫链中地层只能沿着水平和竖向转移(Qi *et al.*, 2016; 祁小辉等, 2017),而嵌入式马尔可夫链中地层可沿任意方向转移(Carle and Fogg, 2017, 2020),因此模拟出的地层界限更加光滑自然.同时该模型可对地表和边界钻孔外围地层的变异性进行模拟,对钻孔的利用效率和地层变异性的模拟范围更高和更广.

3.2 渤海湾研究区随机地层的模拟

利用第1节和第2节中的方法,使用渤海湾海床实测钻孔资料,建立海床场地大跨度范围内的二维随机地层及其随机 V_s -结构的可能性分布.图5给出了各钻孔剖面土类和土体 V_s 值的分布.以研究区海平面为水准面建立相对高程,各钻孔的底部均位于相对高程-144 m处.

首先需确立待模拟的场地范围.为了充分利用边界钻孔剖面(图5),将研究区左、右侧边界到钻孔 ZK1 和 ZK7 的距离分别设置为 1.5 km 和 1.2 km,形成的场地跨度为 25 km.然后,需以一定尺寸的网格对区域进行离散. S_v 通常由同一网格内地层类型的唯一性为原则确定(Elfeki and Dekking, 2001). S_v 不能超过钻孔揭示的最薄层的厚度(Gong *et al.*, 2021),结合图5中各钻孔地层的厚度,取 $S_v = 0.5$ m. S_h 除了应保证同一网格内水平向地层类型是唯一的,还应保证模拟出的地层界限光滑、地层之间过渡自然.对数十公里跨度的地层模拟, S_h 可取数百米(Gong *et al.*, 2021).在保证模拟效率的前提下 S_h 应尽量选取较小值(Qi *et al.*, 2016).本文取 $S_h = 100$ m.依据1.3节和1.4节中的方法,即可计算出 $S_{ij}(h_{\text{竖向}})$ 和 $S_{ij}(h_{\text{水平}})$.

图6给出了网格尺寸 $S_v=0.5$ m、 $S_h=100$ m 时模拟的研究区随机地层和随机 V_s -结构的 $\text{COV}[E_{\text{AE}}]$ 和 $\text{COV}[E_{\text{Ao}}]$ 随 N 的变化.当 $N \geq 3\ 000$ 时 $\text{COV}[E_{\text{AE}}]$ 和 $\text{COV}[E_{\text{Ao}}]$ 均小于 0.1%.因此,本文取 $N=3\ 000$ 次.

图7给出了采用 100 m 和 500 m 作为 S_h , 0.5 m

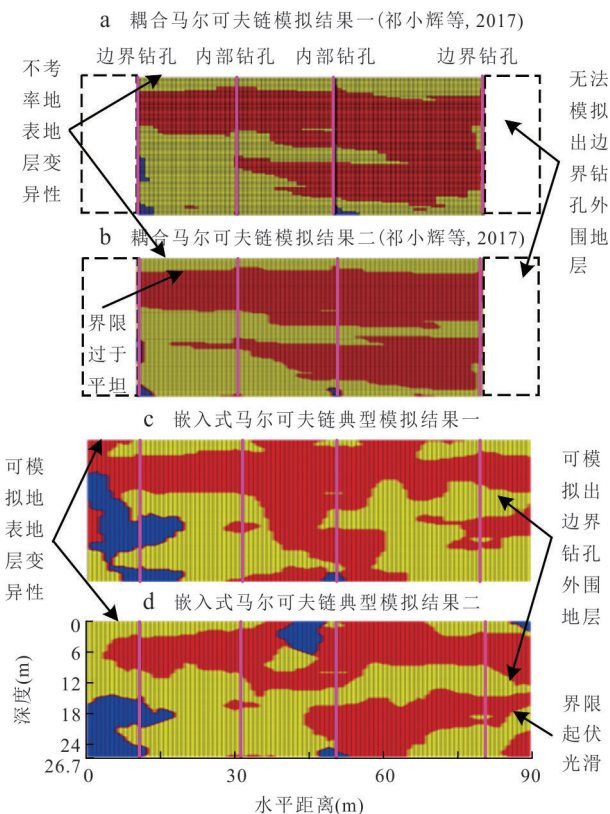


图4 耦合和嵌入式马尔可夫链模型模拟效果对比[基于(祁小辉等, 2017)的钻孔资料]

Fig. 4 Comparison of simulation effects of coupled and embedded Markov chain models (based on borehole data given by Qi *et al.*, 2017)

作为 S_v 所得到的随机地层的分布. $S_h=500$ m 时,地层界限的光滑性差、地层之间的过渡突兀. $S_h=100$ m 时,地层界限的光滑性得到了明显的改善.因此,本文取 $S_h=100$ m 是合理的.从图7可知,使用嵌入式马尔可夫链模型进行随机地层模拟,可以给出边界钻孔剖面外侧的随机地层分布.两次模拟结果得到的海床表面的随机地层具有明显的差异;而基于耦合马尔可夫链模型的方法无法给出边界钻孔剖面以外区域随机地层的分布,且只能给出地表地层类型唯一一种分布(Elfeki and Dekking, 2001; Qi *et al.*, 2016; 祁小辉等, 2017).

3.3 研究区随机地层模拟结果的精度

为了证明研究区随机地层模拟的准确性,将钻孔 ZK4 单独保留作为验证钻孔之间地层模拟准确性的验证数据;将钻孔 ZK7 单独保留作为边界钻孔外围地层模拟准确性的验证数据.地层模拟的精度可通过下式计算(Gong *et al.*, 2021):

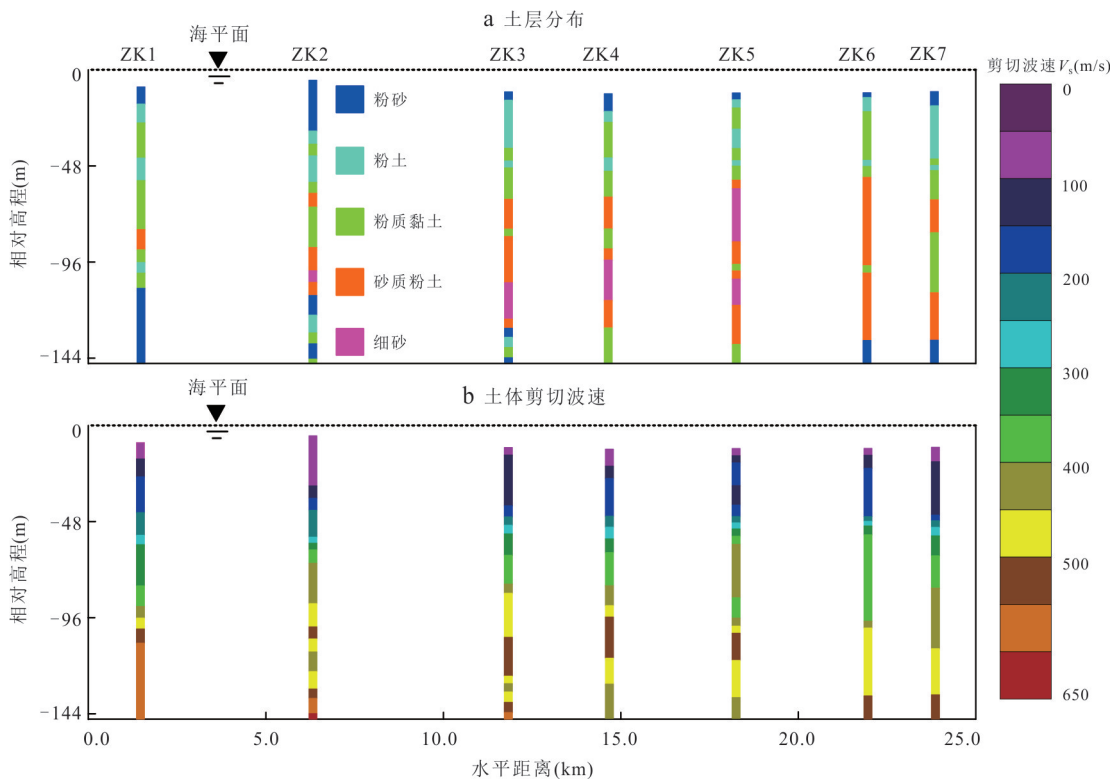


图 5 各钻孔剖面中的土类和剪切波速值

Fig. 5 Soil profiles and the corresponding S-wave velocity values in each borehole

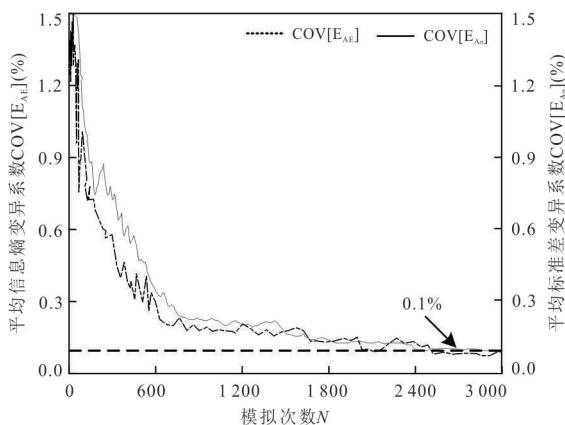


图 6 随机地层和随机 V_s -结构的变异性 和模拟次数关系

Fig.6 Variabilities of random stratigraphy and random V_s -structures with simulation times

$$S_A(u_a)=\frac{\sum_{l=1}^N \text{IndexStra}(u_a)^l}{N}, \tag{30}$$

式中, $S_A(u_a)$ 为钻孔 ZK4 或 ZK7 中网格 u_a 处地层模拟结果的精度; $\text{IndexStra}(u_a)^l$ 是第 l 次模拟的指示函数, 当 u_a 处模拟的地层与图 5 中钻孔 ZK4 或 ZK7 中相应位置处的真实值相同时, 其值为 1.0, 否则为 0. 图 8 给出了 $S_A(u_a)$ 的频数分布图. 钻孔之间地层 (以 ZK4 为验证数据) 和

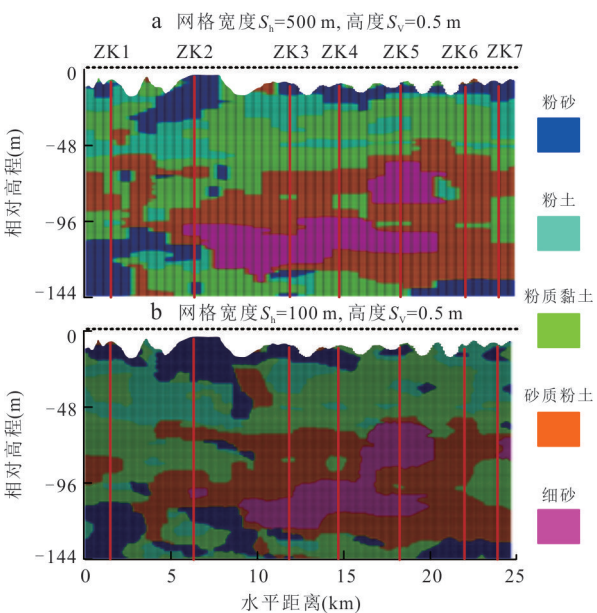


图 7 网格尺寸对随机地层模拟效果的影响

Fig.7 Influences of grid sizes on the simulation effects of random stratigraphy

边界钻孔外围地层 (以 ZK7 为验证数据) 模拟结果的 $S_A(u_a)$ 平均值分别为 0.91 和 0.88, 表明研究区随机地层模拟结果具有较好的精度.

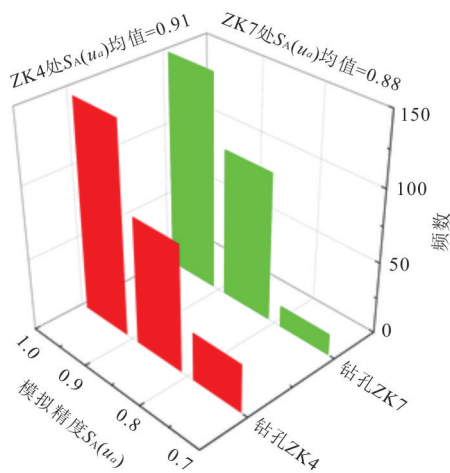


图8 随机地层模拟精度的频数分布

Fig. 8 Frequency distribution of random stratigraphy simulation accuracy

表1 土体剪切波速拟合参数的统计特征

Table 1 Statistical characteristics of S-wave velocity fitting parameters of soils

土类	参数 a		参数 b	
	均值	标准差	均值	标准差
粉砂	25.13	3.48	0.65	0.06
粉土	23.02	4.24	0.58	0.05
粉质黏土	33.14	4.00	0.56	0.03
砂质粉土	73.35	7.78	0.40	0.04
细砂	111.59	12.47	0.33	0.02

3.4 研究区随机地层的随机 V_s -结构的模拟

3.4.1 使用幂函数作为趋势函数 使用式(16)拟合图5中各钻孔剖面内土体 V_s 和 h 关系所得的可决系数均在 0.90 以上,表明幂函数可以合理描述研究区内土体 V_s 与 h 的关系.表1给出了各类土的拟合参数 a 和 b 的统计特征.

图9给出了使用幂函数作为描述 V_s 随 h 变化的趋势函数对图7b中的地层分布进行随机 V_s -结构空间变异性模拟的一种结果.总体上,地层 V_s 值随 h 的增大而增大,遵循海洋沉积物在自重作用下逐渐压实、 V_s 逐渐增大的规律.

图10a给出了不考虑地层变异性时,使用幂函数作为趋势函数对图7b中的地层分布进行3 000次随机 V_s -结构模拟得到的 V_s 标准差的分布.图10b给出了考虑地层变异性时,使用幂函数作为趋势函数对研究区3 000个可能的地层分布结果逐一进行随机 V_s -结构模拟得到的 V_s 标准差的分布.考虑地层变异性时 V_s 的标准差的最大值提高30%.由于采用

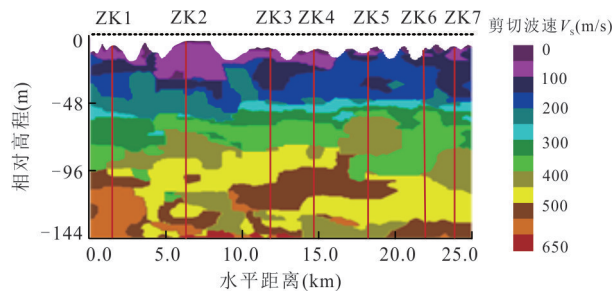
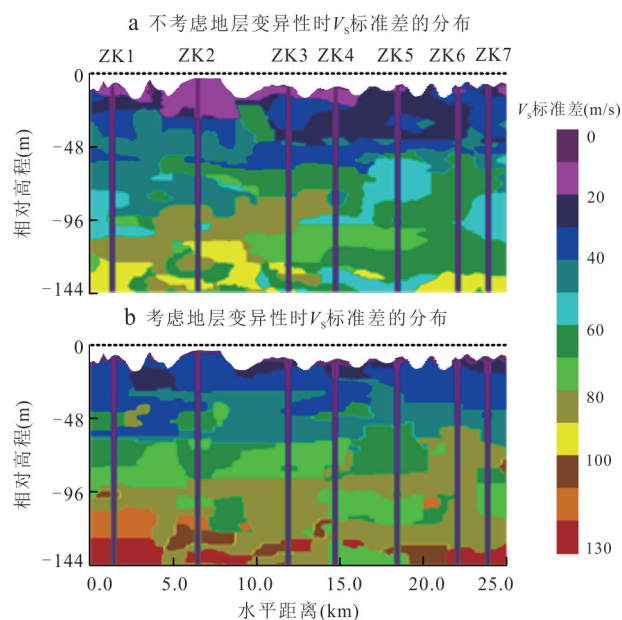


图9 图7b地层剪切波速结构的一种可能分布

Fig.9 A possible distribution of S-wave velocity structure of the stratigraphy shown in Fig. 7b

图10 随机地层空间变异性对随机 V_s -结构空间变异性的影响Fig.10 Influence of random stratigraphy spatial variabilities on random V_s -structure spatial variabilities

了非平稳条件随机场模拟方法,钻孔处 V_s 的标准差为0,非钻孔处随机 V_s 的标准差随 h 变化,符合土体参数的标准差随深度变化的事实(Griffiths and Yu, 2015; Jiang and Huang, 2018; 陈卓识等, 2019; 张岩等, 2023).

3.4.2 使用线性函数作为趋势函数 现有研究中多采用线性函数描述土体参数沿深度方向的趋势性继而得到土体参数的非平稳随机场(Jiang and Huang, 2018).现以式(31)所示的线性函数作为描述 V_s 随 h 变化的趋势函数:

$$V_s = a_1 h + b_1, \quad (31)$$

使用式(31)拟合图5中各钻孔剖面内土体 V_s 和 h 关系,确定出参数 a_1 和 b_1 的均值和标准差后,按照

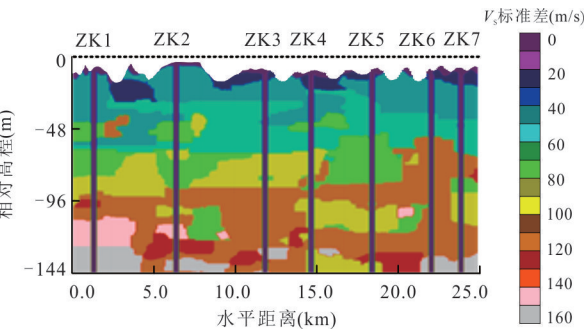


图 11 以线性函数为趋势函数得到的随机 V_s -结构模拟结果的标准差

Fig. 11 Standard deviation of random V_s -structure simulation results obtained with linear function as trend function

2.1 节和 2.2 节的方法,对研究区 3 000 个可能的地层分布逐一进行随机 V_s -结构的模拟,得到的随机 V_s -结构模拟结果的标准差如图 11 所示.对比图 10b 可知,以线性函数作为趋势函数得到的随机 V_s -结构模拟结果的标准差显著增大.这是因为土体 V_s 值与 h 呈现非线性关系,幂函数较之线性函数可以更加准确地描述 V_s 值在深度方向的非线性趋势.

3.5 钻孔深度以深随机地层和随机 V_s -结构的模拟

渤海海域第四纪覆盖层厚 300~500 m(秦蕴珊,1985).自晚更新世以来,海水随着冰期和间冰期的交替依次退出和进入渤海,导致海相与陆相地层重叠,海底地层和近岸陆地地层具有一定的相关性.秦蕴珊(1985)给出了渤海湾西岸向西 800 km 跨度内 500 m 以浅的地层分布图.为了确定研究区钻孔实测深度以深的随机地层和近岸陆地相同深度地层之间的相关性,在秦蕴珊(1985)给出的地层分布图中自海岸向西 25 km、自地表到相对高程 -270 m 的范围内每隔 500 m 设置一个虚拟钻孔,如图 12 所示.将虚拟钻孔中的地层视为真实的地层.

将图 5 给出的研究区向下延伸至相对高程 -270 m 处,每隔 500 m 设置一个虚拟钻孔.如图 13 所示,以研究区内虚拟钻孔 BH1 为例,计算出 BH1 与图 12 给出的近岸陆地上所有虚拟钻孔之间的距离,确定出与 BH1 距离最小的虚拟钻孔 ZJ1,二者之间的距离记作 $L_{\min i}$,则可认为 BH1 中深度超出图 5 中钻孔实测深度的随机地层和 ZJ1 中相应深度的地层相关性最大.同理,可计算出任意虚拟钻孔 $BH_i(i=1, 2, \cdots, 50)$ 至渤海湾西岸虚拟钻孔的最短距离 $L_{\min i}$.

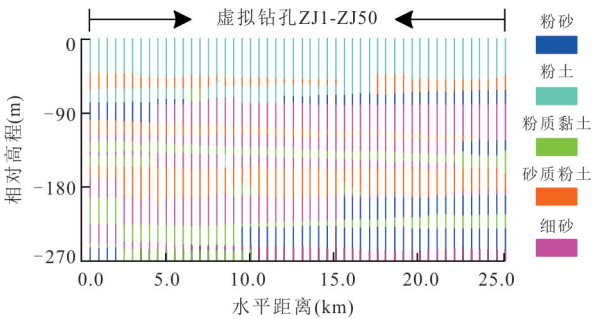


图 12 从近岸陆地剖面[秦蕴珊(1985)给出]中提取的虚拟钻孔

Fig. 12 Virtual boreholes extracted from the near-shore land cross-section given by Qin (1985)

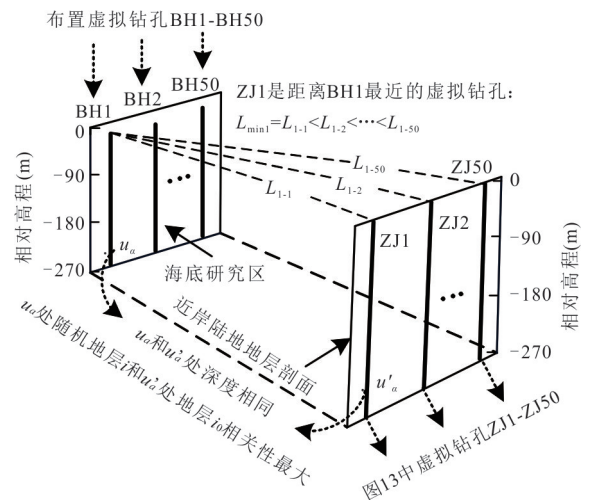


图 13 研究区和近岸陆地虚拟钻孔之间距离的计算

Fig. 13 Calculation of distance between virtual boreholes in the investigation region and the nearshore land

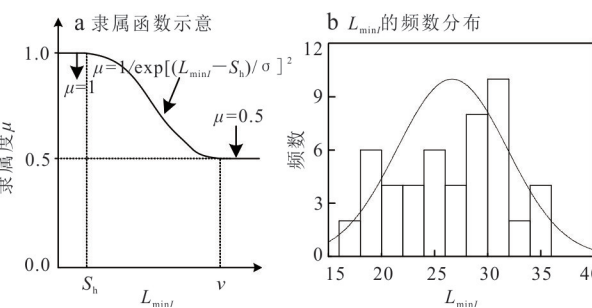


图 14 研究区内和近岸陆地虚拟钻孔之间隶属关系的确定

Fig. 14 Determination of affiliation between virtual boreholes in the investigation region and the nearshore land

嵌入式与耦合马尔可夫链均无法对钻孔实测深度以深的随机地层进行模拟(祁小辉等, 2017; Carle and Fogge, 2020).如图 14,不同位置处随机地层之间的相关性大小可用高斯隶属

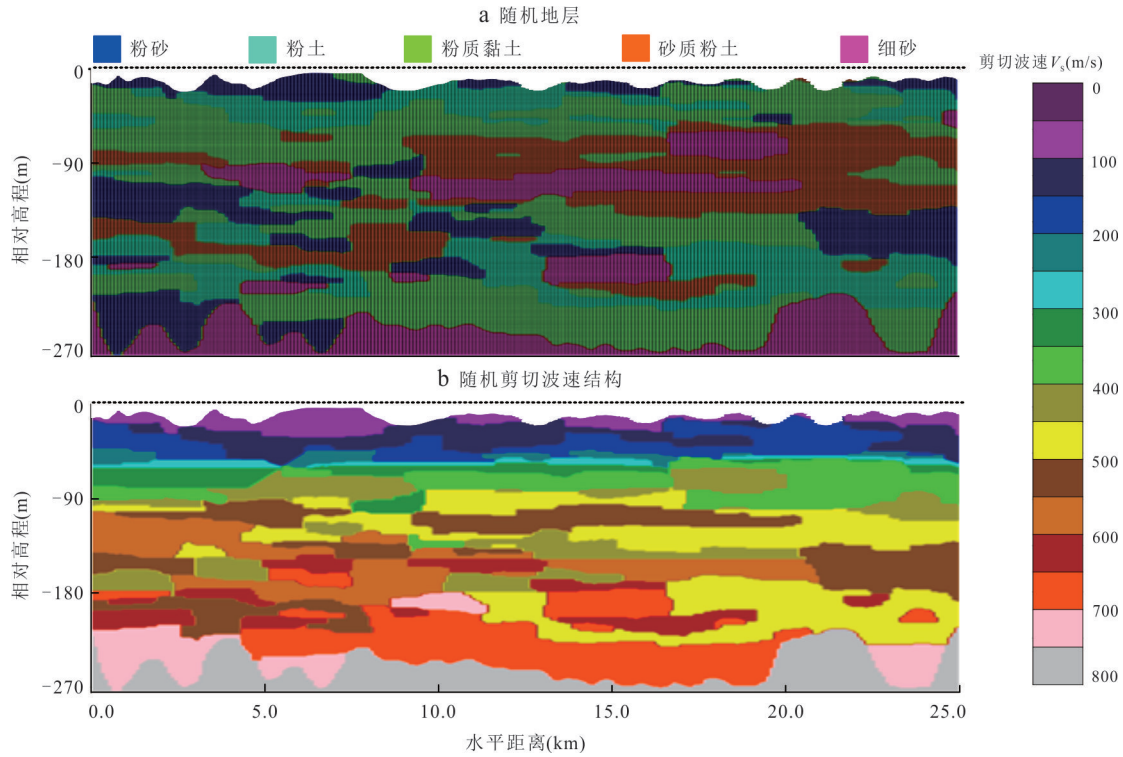


图 15 模拟的研究区自海床表面到相对高程-270 m 范围内随机地层(a)和随机 V_s -结构(b)的一种可能分布

Fig. 15 A possible distribution for random stratigraphy (a) and random V_s -structure (b) from the seabed surface to the relative elevation of -270 m in the investigation region

函数 μ 描述(孙倩, 2019). μ 值越大, 表示地层之间的相关性越大. 模拟随机地层时, 同一网格内地层类型是唯一的. 因此, 距离小于 S_h 时, 地层类型是相同的, $\mu=1$. μ 值随距离的增大而减小, 且 $\mu=1/\exp[(L_{\min}-S_h)/\sigma]^2$, 参数 $\sigma=(v-S_h)/[(\ln 2)^{0.5}]$ (孙倩, 2019). 当距离大于 v 时 $\mu=0.5$, 表示两处的随机地层类型相同和不同的概率相等, 地层间的相关性是完全模糊的(孙倩, 2019). 本文计算的 $L_{\min}$ 范围为 15~35 km, 因此, $v=35$ km. 研究区虚拟钻孔上 u_a 处 i 分布的概率 $P_i'(u_a)$ 为(孙倩, 2019):

$$P_i'(\mu_a) = \begin{cases} \mu, & i = i_0, \\ \frac{p_i}{\sum_{i=1}^k p_i} (1 - \mu), & i \neq i_0, \end{cases} \quad (32)$$

式中, i_0 为与 u_a 所属海底虚拟钻孔距离最近的近岸陆地虚拟钻孔中 u'_a 处的地层类型, u'_a 和 u_a 处深度相同, 如图 13 所示; p_i 为随机地层 i 的平均比例, 可由马尔可夫链的平稳性得到(Carle and Fogg, 2020).

研究区虚拟钻孔之间随机地层的转移概率可用模糊马尔可夫链模型的转移概率矩阵 $T'(h_\varphi)$ 描述. $T'(h_\varphi)$ 中第 i 行、 j 列的元素 $t'_{ij}(h_\varphi)$ 表示在 u_a 处随

机地层类型有 $P_i'(u_a)$ 的可能性是 i 的条件下, 沿 φ 方向与 u_a 相距 h_φ 的 u_β 处随机地层类型有 $P_j'(u_\beta)$ 的可能性是 j 的概率(孙倩, 2019). 如果 u_a 恰好位于图 5 中实测钻孔中, 则 $P_i'(u_a)=1$. 利用 1.3 节和 1.4 节中的方法, 可求得 $T'(h_\varphi)$, 进而进行随机地层的模拟. 图 15a 给出了研究区自海床表面到相对高程 -270 m 范围内随机地层的一种可能的分布. 以图 15a 中的地层分布为基础, 采用 2.1 节和 2.2 节中的方法使用幂函数作为趋势函数进行随机 V_s -结构的模拟, 得到随机 V_s -结构的一种可能分布, 如图 15b 所示.

4 结论

利用渤海湾海床钻孔资料, 对研究区二维海床地层和 V_s -结构进行随机模拟, 主要结论如下:

(1) 使用嵌入式马尔可夫链模型对钻孔实测深度以浅的海床地层进行模拟, 模拟结果具有较高的精度. 与耦合马尔可夫链相比: 随机地层之间可沿任意方向转移, 对地层界限模拟效果更光滑; 模拟结果能够体现钻孔之间地层和边界钻孔剖面以外地层以及地表地层的变异性, 对随机地层的模拟范围更广.

(2) 采用点估计法给出了以幂函数和线性函数描述海床 V_s 随 h 变化的趋势性时相应 V_s 的均值和标准差随 h 的变化。基于非平稳条件随机场模拟得到的随机 V_s -结构体现了钻孔处土体 V_s 值和实测值的相等以及非钻孔处随机 V_s 标准差随深度的变化。考虑地层的变异性以及忽略 V_s 沿 h 变化的非线性均显著增大随机 V_s -结构模拟结果的标准差。

(3) 采用隶属函数和模糊马尔可夫链描述研究区钻孔深度以深的未知地层和近岸陆地相应深度处已知地层之间的相关性和转移概率, 得到了超出钻孔实测深度的随机地层和相应的随机 V_s -结构的可能分布, 为科学开展海洋工程场地地震反应分析提供了保障。

References

- Carle, S. F., Fogg, G. E., 1997. Modeling Spatial Variability with One and Multidimensional Continuous-Lag Markov Chains. *Mathematical Geology*, 29(7): 891—918. <https://doi.org/10.1023/A:1022303706942>
- Carle, S. F., Fogg, G. E., 2020. Integration of Soft Data into Geostatistical Simulation of Categorical Variables. *Frontiers in Earth Science*, 8: 565707. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.565707>
- Chen, G. X., Zhu, J., Qiang, M. Y., et al., 2018. Three-Dimensional Site Characterization with Borehole Data—A Case Study of Suzhou Area. *Engineering Geology*, 234: 65—82. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.12.019>
- Chen, Z.S., Yuan, X.M., Sun, R., et al., 2019. Impact of Uncertainty in In-Situ Shear-Wave Velocity on the Judgement of Site Stiffness. *Rock and Soil Mechanics*, 40(7): 2748—2754, 2798 (in Chinese with English abstract).
- Cui, P., Wang, J., Wang, H., et al., 2022. How to Scientifically Prevent, Manage and Prewarn Catastrophic Risk? *Earth Science*, 47(10): 3897—3899 (in Chinese with English abstract).
- Deng, Z.P., Li, D.Q., Qi, X.H., et al., 2018. Simulation of Geological Uncertainty Using Modified Generalized Coupled Markov Chain. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 40(11): 2041—2050 (in Chinese with English abstract).
- Elfeki, A., Dekking, M. A., 2001. Markov Chain Model for Subsurface Characterization: Theory and Applications. *Mathematical Geology*, 33(5): 569—589.
- Gong, W. P., Juang, C. H., Martin, J. R., et al., 2018. Probabilistic Analysis of Tunnel Longitudinal Performance Based upon Conditional Random Field Simulation of Soil Properties. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 73: 1—14. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.11.026>
- Gong, W. P., Zhao, C., Juang, C. H., et al., 2021. Coupled Characterization of Stratigraphic and Geoproperties Uncertainties—A Conditional Random Field Approach. *Engineering Geology*, 294: 106348. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106348>
- Griffiths, D. V., Yu, X., 2015. Another Look at the Stability of Slopes with Linearly Increasing Undrained Strength. *Geotechnique*, 65(10): 824—830. <https://doi.org/10.1680/geot.14.t.030>
- Hoffman, Y., 2008. Gaussian Fields and Constrained Simulations of the Large-Scale Structure. *Lecture Notes in Physics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg: 565—583. https://doi.org/10.1007/978-3-540-44767-2_17
- Jiang, S. H., Huang, J. S., 2018. Modeling of Non-Stationary Random Field of Undrained Shear Strength of Soil for Slope Reliability Analysis. *Soils and Foundations*, 58(1): 185—198. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.11.006>
- Li, J. H., Cai, Y. M., Li, X. Y., et al., 2019. Simulating Realistic Geological Stratigraphy Using Direction-Dependent Coupled Markov Chain Model. *Computers and Geotechnics*, 115: 103147. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103147>
- Li, Z., Wang, X. R., Wang, H., et al., 2016. Quantifying Stratigraphic Uncertainties by Stochastic Simulation Techniques Based on Markov Random Field. *Engineering Geology*, 201: 106—122. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.12.017>
- Phoon, K. K., Cao, Z. J., Ji, J., et al., 2022. Geotechnical Uncertainty, Modeling, and Decision Making. *Soils and Foundations*, 62(5): 101189. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101189>
- Qi, X. H., Li, D. Q., Cao, Z. J., et al., 2017. Uncertainty Analysis of Slope Stability Considering Geological Uncertainty. *Rock and Soil Mechanics*, 38(5): 1385—1396 (in Chinese with English abstract).
- Qi, X. H., Li, D. Q., Phoon, K. K., et al., 2016. Simulation of Geologic Uncertainty Using Coupled Markov Chain. *Engineering Geology*, 207: 129—140. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.04.017>
- Qin, Y. S., 1985. Geology of the Bohai Sea. Science Press, Beijing (in Chinese with English abstract).

- Sun, Q., 2019. Improvement and Application of Groundwater Flow Stochastic Simulation Method Based on TPOGS (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W.G., Wang, Q., Chen, F.Y., et al., 2021. Reliability Analysis of Slope and Random Response of Anti-Sliding Pile Considering Spatial Variability of Rock Mass Properties. *Rock and Soil Mechanics*, 42(11): 3157—3168 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W.L., Deng, L., Pang, Y.T., et al., 2022. CIHA Method for Rapid and Accurate Vulnerability Analysis of Embankment Dams under Strong Earthquakes. *Earth Science*, 47(12): 4390—4400 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Chen, G.X., Zhao, K., et al., 2023. Uncertainties of Shear Modulus Reduction and Damping Ratio Curves of Marine Soils. *Engineering Mechanics*, 40(5): 161—171 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, F., Yu, S.B., Li, B., et al., 2022. Research Advances on Large-Scale Shaking Table Test for Rock Slopes under Earthquake. *Earth Science*, 47(12): 4498—4512 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, J., Chen, G.X., Xu, H.G., 2015. Effect of Seismic Bed-rock Interface Depth on Surface Motion Parameters of Deep Site. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 37(11): 2079—2087 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 陈卓识, 袁晓铭, 孙锐, 等, 2019. 土层剪切波速不确定性对场地刚性判断的影响. *岩土力学*, 40(7): 2748—2754, 2798.
- 崔鹏, 王姣, 王昊, 等, 2022. 如何科学防控与预警巨灾风险? *地球科学*, 47(10): 3897—3899.
- 邓志平, 李典庆, 祁小辉, 等, 2018. 基于广义耦合马尔可夫链的地层变异性模拟方法. *岩土工程学报*, 40(11): 2041—2050.
- 祁小辉, 李典庆, 曹子君, 等, 2017. 考虑地层变异的边坡稳定不确定性分析. *岩土力学*, 38(5): 1385—1396.
- 秦蕴珊, 1985. 渤海地质. 北京: 科学出版社.
- 孙倩, 2019. 基于T-PROGS的地下水流随机模拟方法改进和应用(博士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 仇文岗, 王琦, 陈福勇, 等, 2021. 考虑岩体空间变异性的边坡可靠度分析及抗滑桩随机响应研究. *岩土力学*, 42(11): 3157—3168.
- 张伟丽, 邓黎, 庞于涛, 等, 2022. 强震作用下土石坝易损性快速精准分析的CIHA方法. *地球科学*, 47(12): 4390—4400.
- 张岩, 陈国兴, 赵凯, 等, 2023. 海洋土动剪切模量比和阻尼比预测不确定性特性. *工程力学*, 40(5): 161—171.
- 赵飞, 俞松波, 李博, 等, 2022. 地震作用下岩质边坡大型振动台试验研究进展. *地球科学*, 47(12): 4498—4512.
- 朱姣, 陈国兴, 许汉刚, 2015. 地震基岩面的选取对深厚场地地表地震动参数的影响. *岩土工程学报*, 37(11): 2079—2087.