

DOI: 10.11779/CJGE201507014

# 基于随机场理论的江苏海相黏土空间变异性评价研究

林 军<sup>1, 2</sup>, 蔡国军<sup>\*1, 2</sup>, 邹海峰<sup>1, 2</sup>, 刘松玉<sup>1, 2</sup>

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 土体空间变异性分析是进行岩土工程可靠度设计的理论基础。采用随机场理论, 提出了典型江苏海相黏土的随机场特征及参数, 对基于孔压静力触探 (CPTU) 测试数据的空间变异性进行了系统分析。由于竖直方向上 CPTU 锥尖阻力数据的样本容量较高, 通过对锥尖阻力进行一次多项式去趋势来获得平稳的波动分量, 并利用常用的 5 种自相关模型拟合波动分量的自相关系数。采用修正的 Bartlett 统计公式来检验波动分量的平稳性, 选取最优的竖直波动范围。竖直变异系数由波动分量和去趋势函数来确定。鉴于水平方向上的 CPTU 锥尖阻力数据的样本容量较小, 采用平均零跨距法估计水平波动范围, 水平变异系数由总体变异系数来表示。结果表明, 竖直向和水平向上江苏海相黏土较报道值显示出更强的空间变异性。

**关键词:** 空间变异性; 海相黏土; 孔压静力触探; 随机场理论

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)07-1278-10

**作者简介:** 林 军(1987-), 男, 山东烟台人, 博士研究生, 从事现代原位测试技术等方面研究。E-mail: aslinjun@163.com。

## Assessment of spatial variability of Jiangsu marine clay based on random field theory

LIN Jun<sup>1, 2</sup>, CAI Guo-jun<sup>1, 2</sup>, ZOU Hai-feng<sup>1, 2</sup>, LIU Song-yu<sup>1, 2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering & Environmental Safety (Southeast University), Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Analysis of soil spatial variability is the basis for the reliability study of geotechnical engineering. Based on the CPTU data, the random field model parameters of Jiangsu marine clay are determined employing the random field theory, and the spatial variability is also discussed. Given the relatively high sampling frequency of the cone tip resistance in the vertical direction, the cone tip resistance data is processed by the linear trend removal method to get fluctuation components. The coefficient of autocorrelation is estimated by using five autocorrelation models, and the stationarity of fluctuation components is verified by the modified Bartlett's statistics. The optimum vertical scale of fluctuation is selected from the five verified autocorrelation functions. The vertical coefficient of variation is assessed by the fluctuation components and trend removal functions. In light of lack of CPTU data in the horizontal direction, the horizontal scale of fluctuation is generated using the Vanmarcke's expeditive method. The horizontal coefficient of variation is expressed as the total coefficient of variation. The study shows that Jiangsu marine clay exhibits greater variability than the clay previously reported in other sites in both the vertical and horizontal directions.

**Key words:** spatial variability; marine clay; piezocone penetration test; random field theory

## 0 引 言

天然沉积土是在漫长的地质年代中形成的, 由于形成过程中受搬运、沉积和风化等各种作用产生复杂的物理化学反应, 使得土体岩土工程参数具有显著的空间变异性。对土体岩土工程参数的空间变异性分析是进行岩土工程可靠度设计的理论基础, 目前常采用随机场理论对岩土工程参数的空间变异性进行分析, 定量研究其变化规律。

国内外许多学者基于随机场理论对各种不同场地条件或地质成因土体的空间变异性进行广泛的研究。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (41202203); 国家科技支撑计划项目 (2012BAJ01B02); 全国优秀博士学位论文作者专项资金项目 (201353); 江苏省杰出青年基金项目 (BK20140027); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-13-0118); 中央高校基本科研业务费 (2242013R30014)

收稿日期: 2014-11-04

\*通讯作者

Vanmarcke<sup>[1-2]</sup>首先系统地阐述了随机场理论并将其应用于岩土工程参数的空间变异性研究中。Phoon 等<sup>[3-5]</sup>基于大量的室内试验、现场测试和文献资料,将常用的岩土工程参数指标的空间变异性进行汇总并提出了修正的 Bartlett 检验。Jaksa 等<sup>[6-7]</sup>给出了 5 种最适合岩土参数的自相关函数模型并研究了 Keswick 黏土在不同取样间距下的波动范围的变化规律。Uzielli 等<sup>[8]</sup>对土耳其和北美 5 个试验场地的 CPTU 测试资料进行了不同土类的空间变异性研究,利用线性回归方法拟合趋势项,采用自相关函数方法计算波动范围,并对波动分量平稳性进行修正的 Bartlett 检验。Stuedlein 等<sup>[9]</sup>对贝城干燥黏土的 CPTU 数据进行分析研究了趋势项函数和自相关模型对波动范围的影响,并获得贝城干燥土空间变异性参数。高大钊<sup>[10]</sup>研究了岩土参数的变异性及其分布规律,包承纲<sup>[11]</sup>、冷伍明等<sup>[12]</sup>和李小勇等<sup>[13]</sup>分别对不同地区岩土参数空间变异性参数进行了研究和统计归纳。闫澍旺等<sup>[14-15]</sup>采用静力触探曲线对土体参数随机场模型的平稳性和各态历经性进行了检验并研究了计算土体参数波动范围的方法。刘润等<sup>[16-17]</sup>将空间随机场模型应用于海洋结构物地基可靠度分析中,并研制了“海洋土地基可靠度分析系统”。Liu 等<sup>[18]</sup>对园林液化地区的 CPT 测试资料进行了分析,采用自相关函数方法绘制不同间距的样本自相关函数,求解水平向波动范围,随后采用 Monte-Carlo 模拟未采样点的数据,利用自相关函数方法求解水平向波动范围。李典庆等<sup>[19]</sup>、祁小辉等<sup>[20]</sup>、蒋水华等<sup>[21]</sup>采用数值模拟方法模拟岩土工程参数的空间变异性并分析了不同空间变异性参数对边坡稳定性的影响。

在进行岩土工程可靠性分析时,参考已有文献资料提出的相似土体空间变异性参数<sup>[3,9]</sup>,对于一般的岩土工程来说,这种工程类比经验是合理的。但是对于具有特殊性质的地区性土体,如江苏地区典型的海相黏土等,这种工程类比经验往往会带来较大误差。本文基于 CPTU 现场测试数据,采用随机场理论对江苏地区的海相黏土进行空间变异性研究,计算分析了竖直方向和水平方向江苏海相黏土的随机场模型参数及其变化规律,为相似工程条件下的岩土工程可靠度设计理论提供有益的空间变异性参数。

1 场地描述

江苏海相黏土广泛分布于兴华—阜宁—灌南一线以东的苏北滨海平原地区,主要地貌为盐化平原、盐田和海湾低平原。受第四纪以构造影响,地壳剧烈升降;加之古气候频繁周期性冷暖变化,沿海地区发生

了多次海侵、海退现象。相关资料显示,江苏东部沿海地区平原第四系发育 5 个以上海侵层,沉积有厚层的松软黏性土,具有高含水率、高孔隙比、高压缩性、低强度和低渗透性的特点<sup>[22]</sup>。

试验场地位于连云港—盐城铁路(连盐铁路)灌云段 K119+750 处,CPTU 孔沿路基中心线两侧布置,共进行 9 孔 CPTU 试验,布孔位置如图 1 所示。试验设备采用多功能数字式车载 CPTU 系统,探头规格符合国际标准,贯入速率为 2 cm/s,采样间隔 0.05 m。

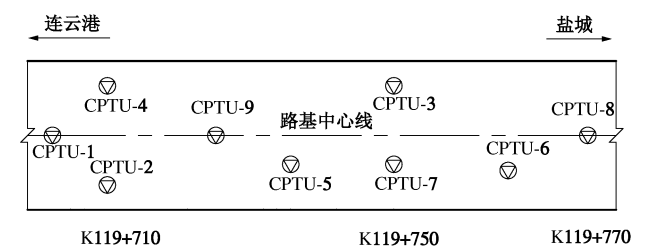


图 1 CPTU 测试孔位布置图

Fig. 1 Distribution of CPTU tests

采用基于 CPTU 试验数据的实用土分类方法<sup>[23-24]</sup>对 CPTU 试验结果进行土层分类,典型 CPTU 测试土层分类结果如图 2 所示,主要物理力学性质指标见表 1。地面表层存在一定厚度的硬壳层;硬壳层以下为淤泥及淤泥质黏土层,以海积沉积作用为主,冲海积为辅,具有含水率高、孔隙比大、低强度、高塑性、黏粒含量高和一定的流变性等特点;其下为强度较高的硬泥层,以黏土、粉质黏土为主并夹有粉细砂。本文主要研究对象为海相沉积和冲海相相沉积形成的淤泥及淤泥质黏土层。

表 1 试验场地土层的主要物理力学性质指标

Table 1 Main physico-mechanical indexes of soils

层号	土层	层厚/m	黏聚力/kPa	有效内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa	不排水抗剪强度/kPa	标贯锤击数 $N_{63.5}$
①	素填土 淤泥及	0.9	2.6	46.3	6.18	66.4	3
②	淤泥质黏土	10.2	2.8	35.7	3	20.9	1
③	黏土	2.4	19.7	43.4	13.7	151.9	8
④	粉细砂 黏土夹	0.9		49.1	20.6		20
⑤	粉砂薄层	—	18.1	43.4	13.2	154.1	9

2 随机场理论

2.1 随机场模型

土体岩土工程参数的空间变异性可以采用统计学

的回归分析、随机场理论和地质统计学模型进行分析<sup>[25]</sup>。由于随机场理论模型及参数可以为岩土工程可靠度分析提供有效的参考依据, 其正成为研究土体空间变异性的有力工具, 目前广泛应用的是 Vanmarcke 提出的有限规模的随机场模型<sup>[1-2]</sup>。

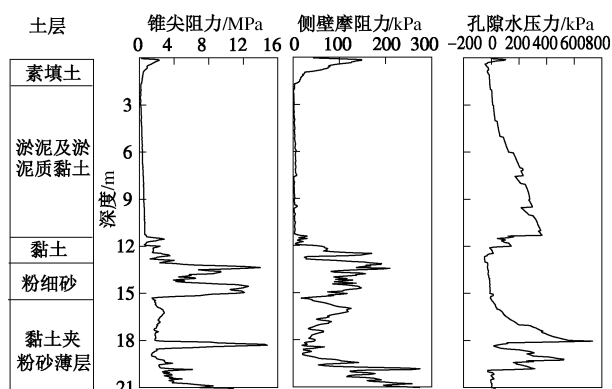


图2 典型 CPTU 测试曲线

Fig. 2 Curves of typical CPTU data

随机场理论利用土体岩土工程参数的空间性, 即在给定场地的空间范围内土体岩土工程参数的变化在一定的波动范围内呈现出自相关性, 对土体岩土工程参数的空间变异性进行建模分析<sup>[7, 26]</sup>。如图 3 所示, 土体岩土工程参数函数  $g(z)$  可表示为<sup>[5, 27]</sup>

$$g(z) = t(z) + x(z), \quad (1)$$

式中,  $z$  为深度坐标,  $t(z)$  为趋势函数,  $x(z)$  为随机波动分量。

土体岩土工程参数的空间变异性可以用随机场模型参数的均值, 波动范围和变异系数来描述。应用随机场理论来获得土体空间变异性特点的先决条件是对原始测试数据进行处理以获得零均值的平稳性或弱平稳性随机数据。去趋势方法是最常用的获得平稳随机场的方法, 一方面满足随机场理论中对零均值平稳性的要求, 另一方面避免由于采用参数总变异性分析而导致高估土层的变异性<sup>[28]</sup>。

通常, 土体岩土工程参数的变异系数定义为其标准差与其平均值的比值。大部分空间变异性文献资料中给出的土体岩土工程参数的变异系数均采用总变异性分析法。总变异性分析法未去除土体参数剖面中潜在确定的趋势项, 使所获得的变异系数值可能远大于其空间变异性的真实值。随机场理论中, Phoon 等<sup>[3]</sup>指出应当通过分量分析法, 即采用波动分量的标准差和趋势函数的平均值来获得更为合理的土体参数的变异系数。波动分量标准差  $\sigma_w$  计算公式为

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [x(z_i) - \bar{x}(z)]^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [x(z_i)]^2}, \quad (2)$$

式中,  $z_i$  为第  $i$  个观测点的深度坐标,  $\bar{x}(z)$  为波动分

量的平均值,  $n$  为样本数据容量。

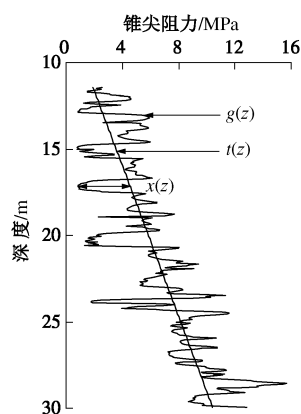


图3 土体空间变异性函数图

Fig. 3 Function graph of soil spatial variability

土体参数平均值应采用趋势函数平均值描述, 而非传统随机变量法或总变异性分析法中简单的土体参数的算术平均值, 则随机场理论中土体岩土工程参数的变异系数  $COV_w$  为

$$COV_w(z) = \frac{\sigma_w(z)}{t(z)}, \quad (3)$$

式中,  $t(z)$  为土体的岩土工程参数测试数据的趋势项,  $\sigma_w(z)$  为相同土体的岩土工程参数波动分量的标准差。

波动范围  $\delta$ , 即在一定的距离范围内的土体岩土工程参数显示较强的自相关性。其值大小表征了土体岩土工程参数自相关性距离的大小。处于波动范围内两点处的土体岩土工程参数的波动分量具有明显的自相关性, 超出波动范围外可以认为土体参数基本不相关<sup>[11]</sup>, 如图 4 所示。对于满足平稳性的波动分量  $x(z)$ , 观测点  $x(z_1)$  与  $x(z_2)$  的相关性可以采用自相关函数来描述, 其值仅取决于观测点的间距  $\tau = |z_1 - z_2|$ , 而与  $z_1$ ,  $z_2$  无关。波动范围可以通过许多计算方法确定<sup>[1, 15, 29]</sup>:

①平均零跨距法, VXP; ②方差折减法, VRF; ③样本自相关函数的 Bartlett 检验法, BLM; ④自相关模型拟合法, AMF。

目前以自相关函数模型拟合法最为常用。该方法对土体参数样本波动分量的自相关系数利用自相关函数模型曲线进行最小二乘法拟合, 以求得土体的随机场模型及参数。常采用样本的自相关函数 (ACF) 模型包括单指数模型 (SNX), 指数平方模型 (SQX), 指数余弦模型 (CSX), 二阶 Markov 模型 (SMK), 二元噪声模型 (BIN), 表 2 所示为常用的自相关模型。

## 2.2 修正的 Bartlett 平稳性检验

早期波动分量的平稳性检验中, 采用直接观察法或经典的统计学方法<sup>[6, 9, 30]</sup>。常用的经典统计检验方法有 F 检验、Hartley 检验和 Kendall 检验等。然而这些

检验方法均假设测试数据之间具有独立性, 这与土体岩土工程参数具有空间相关性的事实不相符。故当采用上述方法对具有相关性的测试数据进行平稳性检验时, 会产生很大程度的偏差, 对测试数据的平稳性产生偏于不保守估计<sup>[28, 31]</sup>。目前广泛采用的是 Phoon 等<sup>[4-5]</sup>提出的修正的 Bartlett 检验, 其适用于岩土工程参数数据的平稳性检验<sup>[9, 32]</sup>。

表 2 常用自相关模型及波动范围<sup>[5, 8]</sup>

Table 2 Autocorrelation models and corresponding scales of fluctuation		
自相关模型	表达式	波动范围
SNX	$R(\tau) = \exp(-\lambda \tau )$	$\delta = 2/\lambda$
SQX	$R(\tau) = \exp[-(a\tau)^2]$	$\delta = \sqrt{\pi}/a$
CSX	$R(\tau) = \exp(-b \tau )\cos(b\tau)$	$\delta = 1/b$
SMK	$R(\tau) = (1 + d \tau )\exp(-d \tau )$	$\delta = 4/d$
BIN	$R(\tau) = \begin{cases} 1 - c \tau  & ( \tau  < 1/c) \\ 0 & (\text{其它}) \end{cases}$	$\delta = 1/c$

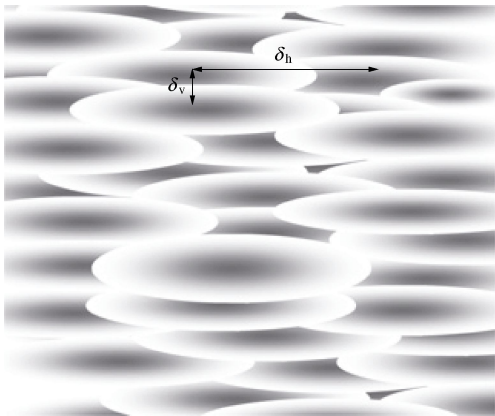


图 4 竖直波动范围  $\delta_v$  和水平波动范围  $\delta_h$ <sup>[9]</sup>

修正的 Bartlett 检验将随机场模型的测试数据去趋势化、波动范围求解、波动分量平稳性检验以及土层边界识别等内容紧密地联系起来。对波动分量进行修正的 Bartlett 检验时, 需要产生 Bartlett 检验统计量。一般采用两个连续且长度相等的样本片段组成两个移动窗口, 窗口在波动分量剖面上移动, 分别计算两个窗口范围内样本片段的样本方差  $s_1^2$  和  $s_2^2$ 。窗口中心处的 Bartlett 检验统计量  $B_{\text{stat}}$  为<sup>[5]</sup>

$$B_{\text{stat}} = \frac{2.30259(m-1)}{C} \left[ 2\lg s^2 - (\lg s_1^2 + \lg s_2^2) \right]. \quad (4)$$

式中  $m$  为用于计算样本方差  $s_1^2$  或  $s_2^2$  的数据点数量;  $s^2$  为窗口样本片段的总体方差,  $s^2 = (s_1^2 + s_2^2)/2$ ;  $C$  为常量,  $C = 1 + 1/(2m - 2)$ 。

当获得波动分量的 Bartlett 统计量后, 需要产生 Bartlett 检验的极限值  $B_{\text{crit}}$  来判断波动分量是否满足平稳性要求。若计算的 Bartlett 统计量在某一位置处大于

Bartlett 检验的极限值, 则说明波动分量在该位置处不平稳。

不同自相关函数模型的 Bartlett 检验的极限值各不相同, 且不同显著水平拒绝准则的 Bartlett 检验的极限值也不相同。由于产生 Bartlett 检验的极限值计算复杂, 故对于常用的五种自相关模型, Phoon 等<sup>[4-5]</sup>提出了修正的 Bartlett 检验的极限值, 如表 3 所示。该极限值的显著水平为 5%, 归一化片段剖面长度  $I_1=1$ 。

$$k = \delta/(\Delta z), \quad (5)$$

$$I_1 = T/\delta = n/k, \quad (6)$$

$$I_2 = W/\delta = m/k. \quad (7)$$

式中  $\delta$  为波动范围;  $\Delta z$  为采样间距;  $k$  为每个波动范围内所包含的采样点数量;  $I_1$  为归一化剖面长度;  $T$  为波动分量的剖面总长度;  $n$  为波动分量剖面所包含的数据点总数量;  $I_2$  为归一化片段长度;  $W$  为片段的长度(窗口的二分之一);  $m$  为单个片段范围内采样数据点的数量。

表 3 修正 Bartlett 检验临界值  $B_{\text{crit}}$ <sup>[4-5]</sup>

Table 3 Critical modified bartlett test statistics		
自相关模型	临界值 $B_{\text{crit}}$	归一化片段长度 $I_2$
SNX	$(0.23k+0.71)\ln I_1+0.91k+0.23$	$I_2 = 1$
	$(0.36k+0.66)\ln I_1+1.31k-1.77$	$I_2 = 2$
SQX	$(0.73k-0.98)\ln I_1+2.35k-2.45$	$I_2 = 1$
CSX	$(0.28k+0.43)\ln I_1+1.29k-0.40$	$I_2 = 1$
SMK	$(0.42k-0.07)\ln I_1+2.04k-3.32$	$I_2 = 1$
BIN	$(0.30k+0.29)\ln I_1+1.15k-0.52$	$I_2 = 1$

### 3 竖直向空间变异性分析

本文以 9 个孔多功能 CPTU 试验的锥尖阻力数据为基础, 采用随机场理论建立江苏海相黏土竖直方向上的随机场模型, 以获得其空间变异性变化规律, 计算步骤如下: ①数据去趋势处理以获得波动分量; ②确定自相关函数及其波动范围; ③采用修正的 Bartlett 检验平稳性; ④估计土体的竖直向变异系数。

#### 3.1 测试数据去趋势处理

对 CPTU 试验数据而言, 通常采用多项式进行趋势函数拟合来获得波动分量(残差), 最常用的是一阶多项式或二阶多项式<sup>[8, 25]</sup>。当趋势函数模型发生改变时, 波动分量的方差及自相关结构也会发生变化<sup>[33]</sup>。许多文献资料指出, 随着多项式的阶数增加, 对样本数据的拟合效果增强, 波动分量的方差和自相关性降低。然而当采用高阶多项式趋势函数时, 阶数越高, 多项式系数样本方差就越大, 从而产生明显的估计误差<sup>[5, 34-35]</sup>。

因此, 在实际计算中, 建议首先采用线性趋势函

数来获得波动分量,当波动分量不满足修正的 Bartlett 检验的平稳性要求时,再采用更高阶的多项式拟合。本文采用一阶多项式进行趋势项拟合来获得波动分量,如图 5 所示。

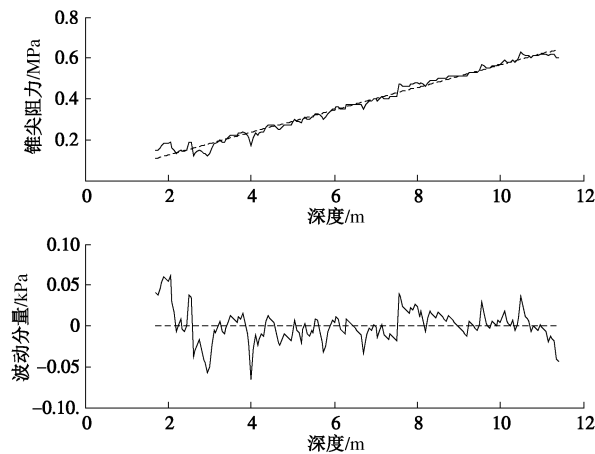


图 5 锥尖阻力去趋势结果

Fig. 5 Trend removal results of cone tip resistance

3.2 自相关函数拟合

随机场理论的自相关函数模型可以采用样本波动分量的自相关系数  $\hat{R}$  进行拟合估计<sup>[5, 6, 28]</sup>:

$$\hat{R}(\tau = j\Delta z) \approx \frac{1}{s^2(n-j-1)} \sum_{i=1}^{n-j} [x(z_i)x(z_{i+j})] \quad (8)$$

式中  $\tau$  为估计距离;  $\Delta z$  为采样间距;  $z_i = i(\Delta z)$ 、 $z_{i+j} = (i+j)(\Delta z)$  为第  $i$ 、 $i+j$  个观测点的深度坐标;  $n$  为样本容量;  $s^2$  为样本方差,取  $j=0$  时  $\hat{R}(\tau)=1$  计算可得。

采用式 (8) 对样本波动分量自相关函数的估计仅对前 1/4 样本长度内的数据具有准确性,对 1/4 样本长度之后的数据估计准确性将降低,因此  $j$  的取值通常不得大于  $n/4$ 。此外,随着估计距离的增大,式 (8) 计算结果的可靠性迅速降低<sup>[36]</sup>,因此,通常建议仅对自相关系数  $\hat{R}(\tau)$  的初始部分 ( $\hat{R}(\tau) \geq r_B = 1.96/\sqrt{n}$ ,  $r_B$  为 Bartlett 极值) 进行拟合<sup>[8, 36]</sup>,表 4 和图 6 所示为五种自相关函数对 CPTU 锥尖阻力的波动分量的拟合结果及对应的波动范围。

表 4 自相关函数拟合的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of autocorrelation functions			
自相关模型	表达式	相关系数	波动范围/m
SNX	$R(\tau) = \exp(-\lambda \tau )$	0.9914	0.37
SQX	$R(\tau) = \exp[-(a\tau)^2]$	0.9114	0.36
CSX	$R(\tau) = \exp(-b \tau )\cos(b\tau)$	0.9716	0.27
SMK	$R(\tau) = (1+d \tau )\exp(-a \tau )$	0.9505	0.34
BIN	$R(\tau) = \begin{cases} 1-c \tau  & ( \tau  < 1/c) \\ 0 & (\text{其它}) \end{cases}$	0.9355	0.33

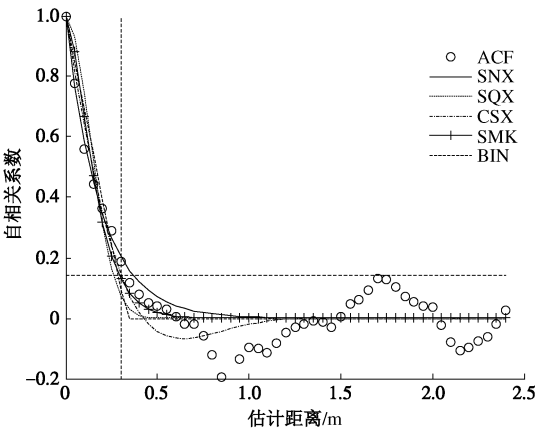


图 6 自相关模型拟合结果

Fig. 6 Fitting results of autocorrelation functions

通过拟合结果表 4 和图 6 可看出,一次多项式去趋势方法已经能获得足够平稳或弱平稳的随机波动分量。锥尖阻力波动分量的自相关系数在  $r_B=0.14$  之前显示为迅速衰减的自相关性,该计算结果也与其他文献资料的计算结果相符合<sup>[5, 9]</sup>,并且在  $\tau_7 = 0.35$  m 处越过 Bartlett 极限值。每个自相关模型对 CPTU 锥尖阻力数据波动分量自相关系数的拟合程度均大于 0.9。

3.3 平稳性检验

土体的均匀性与其岩土工程参数的统计学平稳性等价。从土体物理属性出发,统计学平稳性存在的原因在于测试数据来源于经历了相似的地质历史和成因的均匀土体,具有相似的平稳性。采用修正的 Bartlett 检验用方法进行土体波动分量平稳性检验时,在不均匀土层交界处,由于土性指标存在突变;反映在统计学特征上则是土体岩土工程参数的波动分量在该交界处附近的局部均值不再保持常量,此时不满足平稳性要求。因此, Bartlett 统计量剖面上出现突变点,使得  $B_{stat} > B_{crit}$ ,即该边界处的土体不满足均匀性要求。

表 3 表示的修正 Bartlett 检验的极限值对于 5 个自相关函数模型来说并不统一。通常,对于土体原位测试数据的平稳性要求的严格程度低于对土体变异性理论研究的平稳性要求。因此,在某些情况下可以采用适当放松的修正的 Bartlett 检验的极限值<sup>[5, 9]</sup>。

图 7 为 CPTU 锥尖阻力波动分量自相关系数的 SNX、SQX、CSX、SMK 和 BIN 5 种自相关模型的修正的 Bartlett 检验结果。检验结果表明有 SQX、CSX、SMK 和 BIN 4 种自相关模型通过了平稳性检验,只有 SNX 自相关函数模型没有通过修正 Bartlett 检验。一般的, SNX 模型具有最严格的平稳性检验。这表明 SNX 自相关函数模型可以很好拟合 CPTU 锥尖阻力波动分量的自相关系数,但是,在该自相关函数的条件下, CPTU 锥尖阻力的波动分量表现为非平稳性数据,不能反映土体的岩土工程参数真实的波动变化情况。SQX、CSX、SMK 和 BIN 4 种自相关函数模型则可以

较好反映土体的岩土工程参数真实的波动变化情况。但是 SQX、CSX、SMK 和 BIN 4 种自相关函数模型对 CPTU 锥尖阻力波动分量的自相关系数的拟合程度是不同的。在确定土体竖直向波动范围时, 选择自相关函数拟合程度最好的, 即表 4 中相关系数最大的自相关函数模型所对应的竖直向波动范围。

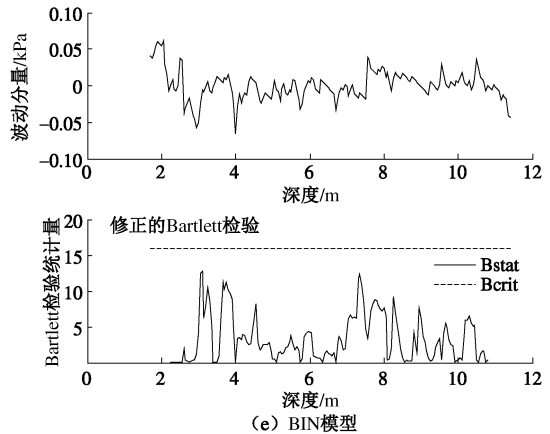
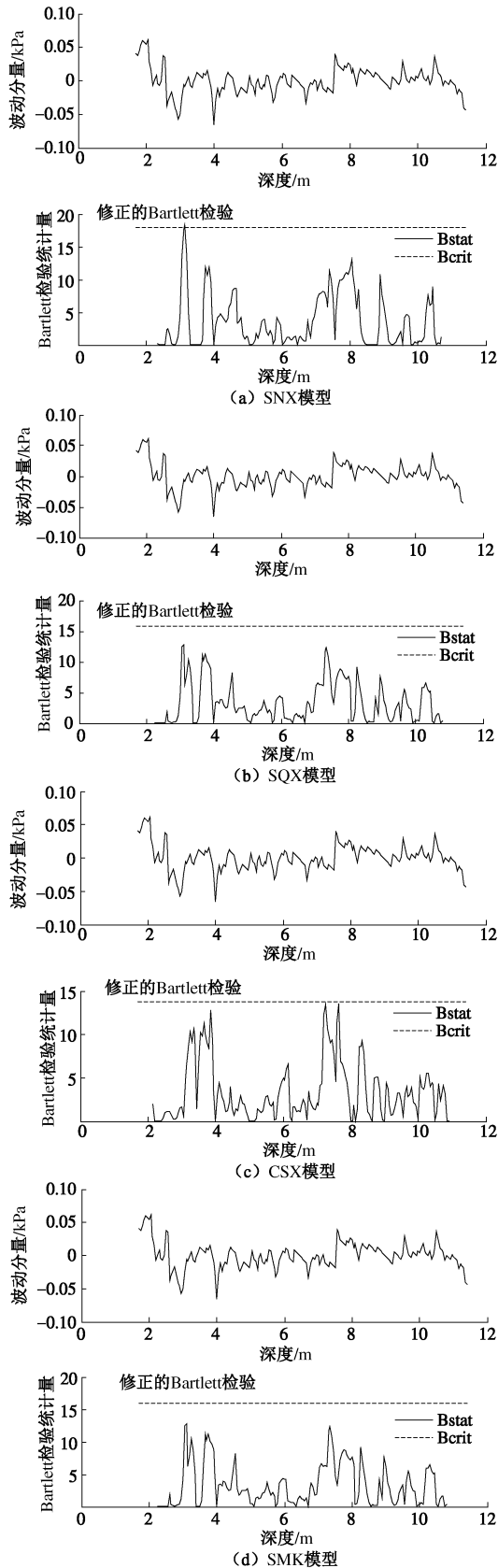


图7 5种自相关模型的修正的 Bartlett 平稳性检验

Fig. 7 Profiles of modified Bartlett's test statistics for five autocorrelation functions

### 3.4 变异系数

本文采用分量分析法来获得江苏海相黏土竖直向的变异系数, 通过 CPTU 锥尖阻力波动分量的标准差和趋势项函数平均值来计算土体变异系数。

在给定的 CPTU 锥尖阻力数据剖面, 进行一次多项式去趋势处理后获得波动分量的情况下, 其竖直向锥尖阻力的变异系数为

$$\text{COV}_{w,v} = \frac{\sigma_w(z)}{t(z)} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [x(z_i)]^2}}{\left( a \cdot \sum_{i=1}^n z_i + b \right) / n} \quad (9)$$

式中,  $z_i$  为观测点深度坐标,  $x(z_i)$  为随机波动分量,  $a$ ,  $b$  为一次趋势项函数的拟合系数,  $n$  为随机波动分量的样本容量。

分量分析法获得江苏海相黏土竖直向的变异系数计算结果见表 5。

### 3.5 竖直向随机场模型参数

分别对 9 个孔 CPTU 试验的锥尖阻力数据进行上述的随机场模型参数计算, 可获得江苏海相黏土竖直向空间变异性的变化规律, 计算结果见表 5。计算结果表明, CPTU 锥尖阻力平均值的变化范围为 0.38~0.77 MPa, 平均值为 0.52 MPa; 该结果与文献资料<sup>[3]</sup>所述黏土的范围一致, 且平均值更接近于其所述变化范围的下限。

采用通过修正的 Bartlett 检验的自相关函数模型来确定 CPTU 锥尖阻力的竖直向波动范围。分析 9 个钻孔的计算结果见表 5, 没有单一的自相关函数模型适合江苏海相黏土的随机场结构。在某些情况下, 通过修正的 Bartlett 检验的自相关函数模型不止一个, 则选取最优相关系数的自相关函数来确定竖直方向的波动范围。江苏海相黏土层竖直方向的波动范围的变化

范围为 0.27~0.48 m，平均值为 0.40 m；变化范围落于文献资料[3]所述范围。对于江苏海相黏土来说，其竖直方向的变异系数变化范围为 3.87%~10.92%，平均值为 7.34%，变异程度超出文献资料[3]报道黏土的变异系数变化范围，显示出较强的变异性。

表 5 竖直向随机场模型参数

Table 5 Parameters of vertical random field model

孔号	最优自相关函数模型	锥尖阻力平均值/MPa	最优波动范围/m	变异系数/%
CPTU-1	SMK	0.76	0.45	8.14
CPTU-2	BIN	0.64	0.48	10.92
CPTU-3	SNX	0.41	0.37	3.87
CPTU-4	SQX	0.29	0.34	9.80
CPTU-5	CSX	0.45	0.45	9.25
CPTU-6	CSX	0.37	0.27	5.85
CPTU-7	SMK	0.38	0.46	7.11
CPTU-8	CSX	0.41	0.43	4.94
CPTU-9	BIN	0.42	0.32	6.23
平均值		0.46	0.40	7.34

江苏海相黏土高度的空间变异性可能与其形成的地质背景有关，由于受到多次海侵、海退的影响，该黏土的沉积环境多次发生变化，形成的土体物理力学性质也随之发生改变，从而导致其变异系数增大。

4 水平向空间变异性分析

4.1 CPTU 数据处理

水平向随机场参数也是描述土体空间变异性的重要指标，但获得土体水平方向的波动范围和变异系数比较困难。通常情况下水平方向上的取样间距较大，难以获得大容量的样本数据，不能用严格的自相关函数拟合法来计算其水平随机场模型及参数。因此，确定土体的水平向随机场参数的方法与确定土体的竖直向随机场参数的方法并不相同。

采用平均零跨距法来估算江苏海相黏土的水平波动范围，如图 8 所示，该方法假设自相关函数为指数平方型。利用土体岩土工程参数的趋势函数曲线  $t(r)$  与土体岩土工程参数函数曲线  $g(r)$  交点的平均长度  $\bar{d}$  来求解水平波动范围  $\delta_h$  为

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^6 d_i / 6 \quad (10)$$

$$\delta_h = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \bar{d} \approx 0.8 \bar{d} \quad (11)$$

平均零跨法形象直观且计算简便，当参数样本容量较小时可使用该方法估计土体的岩土工程参数的水平波动范围，其计算结果与其它方法的计算结果相近。

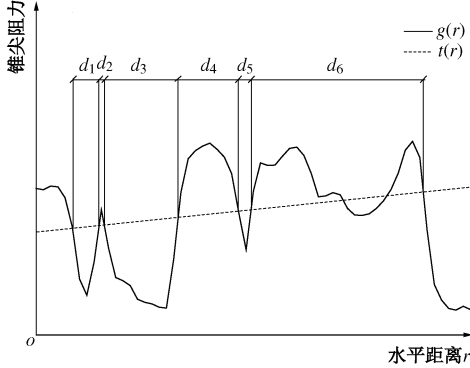


图 8 平均零跨距法计算水平波动范围

Fig. 8 Estimation of vertical scale of fluctuation by VXP method

锥尖阻力水平向趋势函数只用来确定水平波动范围。水平变异系数采用锥尖阻力的总体变异性来表示。如果采用去趋势后的波动分量来确定变异系数，由于较小样本容量的限制，去趋势产生的波动分量可能会导致错误的协方差估计从而低估土体参数样本数据的变异性，高估样本数据的独立性[37]。

水平方向上钻孔间距小于 20 m 即认为锥尖阻力数据有效。由于水平方向上 CPTU 钻孔不处于一条直线上，故将二维分布的锥尖阻力数据转化为转化一维径向表示[9]。径向距离为当前选定钻孔至其它观测值钻孔的水平直线距离。

4.2 水平随机场模型参数

考虑到每个钻孔的土层厚度各不相同和钻孔间距，如图 1 所示，只选用 CPTU-7、3、5、6、8 和 9 孔的 2~10 m 深度内的锥尖阻力数据进行分析。观察 6 个钻孔 161 个相同水平上的锥尖阻力值，其没有显示出随钻孔距离变化的偏差或者异方差性，故认为 CPTU 锥尖阻力数据是平稳性数据，可采用平均零跨距法计算各深度的水平波动范围。图 9 为深度 3 m 处的计算结果。在某些情况下，CPTU 锥尖阻力曲线与趋势项函数只有两个交点，此时会过高估计其水平向波动范围。

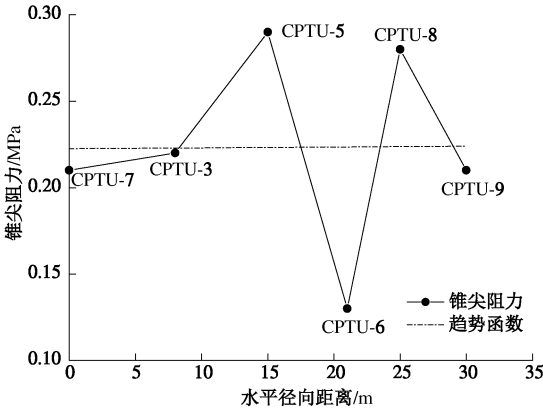


图 9 深度 3 m 处水平波动范围计算结果

Fig. 9 Horizontal scale of fluctuation at depth of 3 m



通过计算可得到江苏海相黏土水平向随机场模型参数, 结果如图 10 所示。水平波动范围变化范围为 5.0~11.1 m, 均值为 7.8 m, 小于文献报道值<sup>[3]</sup>, 且没有明显的沿深度方向变化趋势。江苏海相黏土的水平变异系数的变化范围为 11.5%~39.0%, 均值为 19.86%, 也没有明显的沿深度方向变化趋势。但是, 对比图 10 (b) 和图 10 (c) 可发现水平向波动范围变化与变异系数变化无明显相关性关系。

江苏海相黏土形成过程中多次遭受海侵、海退影响, 受海积和冲海积双重作用, 沉积环境发生变化, 沉积不均匀; 其空间结构变异性明显可能与此有关。

江苏海相黏土水平随机场参数的确定基于相对较少的勘察点因而具有相对的不确定性。通常观测范围在确定土体随机场参数过程中扮演了重要角色, Jaksa 等<sup>[6, 38]</sup>对 Keswick 硬黏土的空间变异性研究表明取样间距对波动范围的有着重要影响。当取样间距过小时, 统计结果受测试误差的影响显著增加<sup>[34]</sup>; 当取样间距过大时, 统计结果主要表现为土体沉积历史或沉积环境的影响<sup>[39]</sup>。

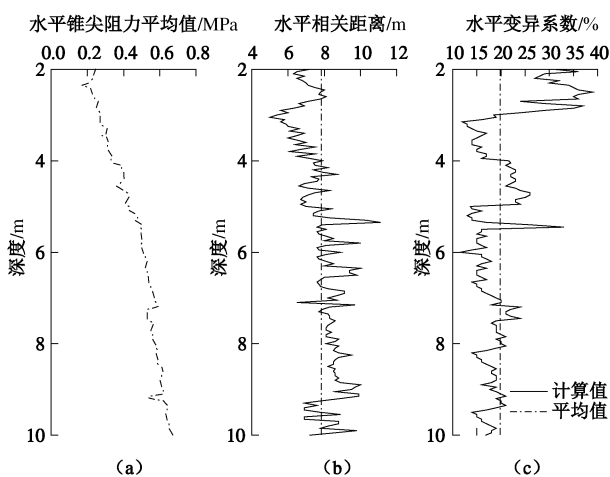


图 10 水平随机场参数

Fig. 10 Parameters of horizontal random field model

## 5 结 论

本文采用随机场理论和修正的 Bartlett 检验, 以 CPTU 现场测试数据为基础, 获得了江苏海相黏土的空间变异性结构参数, 分析其变化规律得出如下结论:

(1) 对锥尖阻力数据进行一次多项式去趋势所获得波动分量的平稳性是足够的, 可以通过严格的修正的 Bartlett 平稳性检验。

(2) 江苏海相黏土的竖直向的锥尖阻力平均值和波动范围的变化范围与文献报道值相一致, 但变异系数要大于报道值。水平向的波动范围小于报道值, 变异系数大于报道值。

(3) 尽管 9 个 CPTU 钻孔内的江苏海相黏土层地质成因相接近, 但没有特定的自相关函数模型可以统一描述江苏海相黏土的随机场特点。

(4) 江苏海相黏土空间结构变异性特点可能与其形成地质背景有关, 受海积沉积和冲海积双重作用控制, 沉积不均匀所致。

## 参考文献:

- [1] VANMARCKE E H. Probabilistic modeling of soil profiles[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, **103**(11): 1227 - 1246.
- [2] VANMARCKE E H. Probabilistic characterization of soil profiles[C]// Site Characterization & Exploration. ASCE, 1978: 199 - 219.
- [3] PHOON K K, KULHAWY F H. Characterization of geotechnical variability[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, **36**(4): 612 - 624.
- [4] PHOON K K, QUEK S T, AN P. Assessment of spatial variability using modified Barlett test[C]// Geotechnical Engineering-Meeting Society Needs. Hong Kong, 2001: 167.
- [5] PHOON K K, QUEK S T, AN P. Identification of statistically homogeneous soil layers using modified Bartlett statistics[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(7): 649 - 659.
- [6] JAKSA M B, KAGGWA W S, BROOKER P I. Experimental evaluation of the scale of fluctuation of a stiff clay[C]// Proc 8th Int Conf on the Application of Statistics and Probability. Sydney, 1999: 415 - 422.
- [7] JAKSA M B, BROOKER P I, KAGGWA W S. Inaccuracies associated with estimating random measurement errors[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, **123**(5): 393 - 401.
- [8] UZIELLI M, VANNUCCHI G, PHOON K K. Random field characterisation of stress-normalised cone penetration testing parameters[J]. Géotechnique, 2005, **55**(1): 3 - 20.
- [9] STUEDLEIN A W, KRAMER S L, ARDUINO P, et al. Geotechnical characterization and random field modeling of desiccated clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, **138**(11): 1301 - 1313.
- [10] 高大钊. 地基土力学性质指标的可靠性分析与取值 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 1985, **25**(4): 59 - 67. (GAO Da-zhao. The reliability of the mechanics properties of foundation soil index analysis and value[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 1985, **25**(4): 59 - 67. (in Chinese))



- [11] 包承纲. 谈岩土工程概率分析法中的若干基本问题[J]. 岩土工程学报, 1989, **11**(4): 94 - 98. (BAO Cheng-gang. Talk about some basic problems in probability analysis method in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, **11**(4): 94 - 98. (in Chinese))
- [12] 冷伍明, 赵善锐. 土工参数不确定性的计算分析[J]. 岩土工程学报, 1995, **17**(2): 68 - 74. (LENG Wu-ming, ZHAO Shan-rui. Calculation analysis of geotechnical parameter uncertainty[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(2): 68 - 74. (in Chinese))
- [13] 李小勇, 谢康和. 土性参数相关距离的计算研究和统计分析[J]. 岩土力学, 2000, **21**(4): 350 - 353. (LI Xiao-yong, XIE Kang-he. Numerical studies and statistic analyses on correlation distance of soil character parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(4): 350 - 353. (in Chinese))
- [14] 闫澍旺, 朱红霞, 刘润. 关于随机场理论在土工可靠度计算中应用的研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(12): 2053 - 2059. (YAN Shu-wang, ZHU Hong-xia, LIU Run, et al. Study on methods for estimating correlation distance of soil layers[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(12): 2053 - 2059. (in Chinese))
- [15] 闫澍旺, 朱红霞, 刘润, 等. 关于土层相关距离计算方法的研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(8): 1581 - 1586. (YAN Shu-wang, ZHU Hong-xia, LIU Run, et al. Study on methods for estimating correlation distance of soil layers[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(8): 1581 - 1586. (in Chinese))
- [16] 刘润, 闫澍旺. 渤海湾地基土随机场特性及可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(4): 464 - 467. (LIU Run, YAN Shu-wang. Random field model and reliability analysis of foundation soil in Bohai gulf[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(4): 464 - 467. (in Chinese))
- [17] 刘润, 闫澍旺, 周宏杰, 等. 空间随机场模型的建立与桩基竖向承载力的可靠度分析[J]. 岩土力学, 2004, **25**(10): 1603 - 1608. (LIU Run, YAN Shu-wang, ZHOU Hong-jie, et al. Random field modeling and reliability analysis of vertical bearing capacity of pile foundation of ocean structures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(10): 1603 - 1608. (in Chinese))
- [18] LIU C N, CHEN C. Spatial correlation structures of CPT data in a liquefaction site[J]. Engineering Geology, 2010, **111**(1): 43 - 50.
- [19] 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 Dian-qing, JIANG Shui-hua, ZHOU Chuang-bing, 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))
- [20] 祁小辉, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑土体空间变异性的边坡最危险滑动面随机分析方法[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(4): 745 - 753. (QI Xiao-hui, LI Dian-qing, ZHOU Chuang-bing, et al. Stochastic analysis method of critical slip surfaces in soil slopes considering spatial variability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(4): 745 - 753. (in Chinese))
- [21] 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. (in Chinese))
- [22] 蔡国军, 张涛, 刘松玉, 等. 江苏海相黏土电阻率与岩土特性参数间相关性研究[J]. 岩土工程学报, 2013(8): 1470 - 1477. (CAI Guo-jun, ZHANG Tao, LIU Song-yu, et al. Relationship between electrical resistivity and geotechnical characteristic parameters for Jiangsu marine clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013(8): 1470 - 1477. (in Chinese))
- [23] 刘松玉, 蔡国军, 邹海峰. 基于 CPTU 的中国实用土分类方法研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(10): 1765 - 1776. (LIU Song-yu, CAI Guo-jun, ZOU Hai-feng. China standard soil classification method based on piezocone penetration testing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(10): 1765 - 1776. (in Chinese))
- [24] 刘松玉, 蔡国军, 童立元. 现代多功能 CPTU 技术理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (LIU Song-yu, CAI Guo-jun, TONG Li-yuan. Research and engineering application of the digital multifunctional piezocone penetration test system (CPTU)[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [25] JAKSA M B, YEONG K S, WONG K T, et al. Horizontal spatial variability of elastic modulus in sand from the dilatometer[C]// Proc 9th Australia New Zealand conference on geomechanics. Auckland, 2004: 289 - 294.
- [26] 傅旭东. 土工参数相关范围及相关距离的计算方法[J]. 西南交通大学学报, 1996, **31**(5): 510 - 515. (FU Xu-dong.

- Scale of fluctuation calculation methods about geotechnical parameters[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1996, **31**(5): 510 - 515. (in Chinese))
- [27] DEGROOT D J, BAECHER G B. Estimating autocovariance of in-situ soil properties[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **119**(1): 147 - 166.
- [28] FENTON G A. Random field modeling of CPT data[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, **125**(6): 486 - 498.
- [29] UZIELLI M. Variability of stress-normalized CPT parameters and application to seismic liquefaction initiation analysis[D]. Florence: University of Florence, 2004.
- [30] 闫澍旺, 贾晓黎, 郭怀志, 等. 土性剖面随机场模型的平稳性和各态历经性验证[J]. 岩土工程学报, 1995, **17**(3): 1 - 9. (YAN Shu-wang, JIA Xiao-li, GUO Huai-zhi, et al. Examination of stationarity and ergodicity on soil profile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(3): 1 - 9. (in Chinese))
- [31] UZIELLI M, VANNUCCHI G, PHOON K K. Assessment of weak stationarity using normalized cone tip resistance[C]// Proceedings of the ASCE Joint Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability. Albuquerque, 2004 (CD-ROM).
- [32] 汪莹鹤, 王保田, 安彦勇. 基于 CPT 资料的土性参数随机场特性研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(9): 2753 - 2758. (WANG Ying-he, WANG Bao-tian, AN Yan-yong. Study of random field characteristics of soil parameters based on CPT measurements[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(9): 2753 - 2758. (in Chinese))
- [33] BAECHER G B, CHRISTIAN J T. Reliability and statistics in geotechnical engineering[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [34] CAFARO F, CHERUBINI C. Large sample spacing in evaluation of vertical strength variability of clayey soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, **128**(7): 558 - 568.
- [35] AKKAYA A D, VANMARCKE E H. Estimation of spatial correlation of soil parameters based on data from the Texas A&M University NGES[C]// Probabilistic Site Characterization at the National Geotechnical Experimentation Sites. ASCE, 2003: 29 - 40.
- [36] PHOON K K, QUEK S T, AN P. Geostatistical analysis of cone penetration test (CPT) sounding using the modified Bartlett test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, **41**(2): 356 - 365.
- [37] FENTON G A. Estimation for stochastic soil models[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, **125**(6): 470 - 485.
- [38] JAKSA M B. The influence of spatial variability on the geotechnical design properties of a stiff, overconsolidated clay[D]. Adelaide: University of Adelaide, 1995.
- [39] FENTON G A, GRIFFITHS D V. Probabilistic foundation settlement on spatially random soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, **128**(5): 381 - 390.