

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.S1.033

静力触探参数自相关距离确定方法与影响因素分析

郭林坪^{1,2}, 孔令伟¹, 徐超³, 杨爱武²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 天津城建大学 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 3. 厦门轨道交通集团有限公司, 福建 厦门 361004)

摘 要:在岩土工程可靠性分析中,土性参数空间变异性的分析至关重要,其中土体的固有变异性可以通过随机场理论获取方差折减函数和自相关距离值进行分析。基于天津临港静力触探试验(CPT)得到的锥尖阻力,对波动函数法确定自相关距离过程中所遇到的问题进行深入研究,并分析了去趋势化方法、取样间距、取样范围等影响自相关距离的因素。结合空间递推平均法的改进方法,首次对应用波动函数法确定自相关距离时出现的多个峰值的选择开展分析,结果表明对于所分析场地的地层静力触探数据而言,应选取波动函数曲线中第一个峰值作为该土层的自相关距离值。通过去趋势化后的随机分量统计特性及对应自相关距离计算结果的对比发现,去趋势化方法要依实际情况而定,并不是所有情况都可以使用线性去趋势化方法,建议最高选用二次非线性拟合结果对原始数据去趋势化;当取样范围较大,即触探孔数量较多时自相关距离随取样间距的增大而增大。分析还表明,对于同样的样本间距,随着触探孔数量的增加,自相关距离是逐渐减小的,但这种差距随着取样间距的增大而逐渐缩小。

关键词:自相关距离;波动函数法;去趋势化;取样间距;取样范围

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017) 增 1 - 0271 - 06

A method of calculating scale of fluctuation of soil and its influence factors based on cone penetration test data

GUO Lin-ping^{1,2}, KONG Ling-wei¹, XU Chao³, YANG Ai-wu²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Key Laboratory of Soft Soil Engineering Character and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 3. Xiamen Rail Transit Group Limited Corporation, Xiamen, Fujian 361004, China)

Abstract: The spatial variability of soil properties in reliability analysis is of great importance, of which the inherent variability of soil can be analyzed through random field theory by determination of coefficient of variance and scale of fluctuation. In this paper, efforts have been devoted to the fluctuation function method to determine scale of fluctuation. Meanwhile, factors such as trend removal method, sampling spacing and sampling range are analyzed based on tip resistance from cone penetration test(CPT), modeling as a random field. It turned out that, as to analyzed data in this paper, if more than one peak point exists when employing the fluctuation function method, the first peak point should be taken as the scale of fluctuation of the soil, which has never been analyzed before. As to affecting factors, some very useful conclusions are obtained. Firstly, selection of the trend removal method should be based on the condition of soil properties; and the quadratic trend removal method is suggested if nonlinear method adopted. Secondly, the scale of fluctuation increases with increasing of sampling spacing when the number of CPTs is large. Last but not the least, as to a same sampling spacing, the scale of fluctuation decreases with increasing of the number of penetration tests; but such difference gradually becomes not obvious for large sampling spacing.

Keywords: scale of fluctuation; fluctuation function method; trend removal; sampling spacing; sampling range

1 引 言

如何依据已有的土性资料及工程情况对岩土工

程可靠性做出合理的评价是当前工程设计及可靠性评价中遇到的难题,解决该问题的关键在于土性参数空间变异性的合理评价。Vanmarcke^[1]引入随机场

收稿日期: 2017-05-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.11672320, No.41372291)。

This work was supported by the National Nature Science Foundation of China (11672320, 41372291).

第一作者简介: 郭林坪, 女, 1986 年生, 博士后, 主要从事土性参数空间变异性的研究。E-mail: guolinping1986@163.com

通信作者: 孔令伟, 男, 1967 年生, 博士, 研究员, 主要从事特殊土力学特性与成灾机理研究。E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn

理论,建立土性剖面随机场模型,通过对点方差的折减完成点特性到空间平均特性的过渡,按照 Vanmarcke 建议的折减函数计算方法,用于平均的空间范围 h 和自相关距离 δ_0 的获取是对点方差做出合理折减的关键。朱红霞等^[2]提出完全不相关距离作为用于平均的空间范围值,验证了其合理性,但在折减函数确定过程中发现较常用的相关函数拟合法在应用过程中拟合参数的结果因人而异,将对计算结果的可信度产生严重影响,因此自相关距离的影响因素及确定方法有待于深入研究。

在 Vanmarcke 给出的描述土体自相关性的“自相关距离”计算方法基础上,国内外学者对土体的空间变异性分析方法及其影响因素进行了广泛研究。Jaksa 等^[3-4]给出了 5 种最适合分析岩土参数空间变异性的自相关函数模型,并以 Keswick 黏土为例分析了影响自相关距离的因素。Cafaro 等^[5]通过对黏土竖向强度指标变异性的评价,分析了样本间距对趋势分项及土体变异性的影响,并指出了合适的去趋势化方法的重要性。Dasaka 等^[6]研究了岩石风化等级和样本范围对自相关距离的影响。Lloret-Cabot 等^[7]指出,自相关距离的精度依赖于参数的数量和取样间距,由他提出的相关函数能够在数据量较小的情况下得到精度较高的水平向自相关距离值。Onyejekwe 等^[8]应用自相关函数法和半变异函数法,对 7 个静力触探孔试验数据所对应土层的自相关距离值进行计算。闫澍旺等^[9]提出土性剖面是否符合平稳性和各态历经性,是判定能否应用 Vanmarcke 提出的随机场模型对土性指标空间自相关特性进行分析的前提。丁继辉等^[10]在递推空间平均法的基础上提出了曲线拟合法用于计算自相关距离,克服了平稳点难于确定的弊端,但得到的自相关距离值偏小。李小勇等^[11]对各种自相关距离计算方法的稳定性进行了评价,研究了取样间距对相关距离计算结果的影响。闫澍旺等^[2, 12]对土性参数空间变异性的定量评价方法做了深入研究,提出了相关函数法的改进方法及“完全不相关距离”的概念。杨勇等^[13]以 CPT 数据为样本,研究了空间范围 h 对自相关距离计算结果的影响,提出了适用于计算西安黄土自相关距离的空间范围值。

由于土性参数空间变异性具有明显的区域性,许多学者研究了不同场地条件或不同地质成因土体的空间变异性,对不同地区岩土参数空间变异性参数进行了统计归纳^[14-18]。在已有研究成果的基础上,本文对“完全不相关距离”计算方法做出了改进,通过对天津港 40 个静力触探孔数据^[19-20]的分

析,提出了方差折减函数随自相关函数参数的变化规律,便于方差折减函数在实际工程中的应用。

土性自相关距离的正确估计是可靠度分析的前提,对土性参数自相关距离确定方法及影响因素的研究具有重要的理论意义和工程实用价值。本文基于静力触探所得的锥尖阻力,对波动函数法确定自相关距离过程中所遇到的问题进行深入研究,对去趋势化方法、取样间距、取样范围等影响自相关距离的因素进行深入分析,可为在土性参数空间变异性分析遇到类似问题时提供理论参考。

2 自相关距离确定原则分析

静力触探试验能够连续、快速地测试,试验结果较精确,由双桥静力触探试验可以得到锥尖阻力和侧壁摩阻力,但通常选用锥尖阻力用于分析土层自相关距离值,所得侧壁摩阻力并不是土体摩阻力的真值^[21]。本文用于分析自相关距离确定方法及其影响因素的原始数据均选用锥尖阻力,数据来源于天津临港地区某码头双桥静力触探试验,触探试验及现场周围环境见图 1。



(a) 静力触探试验

(b) 周边环境

图 1 静力触探现场

Fig.1 Locale of static penetration test

Campanella 等^[22]指出,可以应用波动函数法确定土性参数的自相关距离值,即取波动函数 δ 与滞后距 Δz 散点图中的峰值点作为该土层自相关距离值 δ_0 。计算过程中发现, $\delta - \Delta z$ 中的峰值点可能不止一个(见图 2),需要对峰值点的选择做进一步分析,对静力触探数据去趋势,以确定土性参数的随机分量,进而得到图 2 中随滞后距变化的波动函数。图 2 中,波动函数的峰值点有 2 个,分别是 $\Delta z = 0.5$ 时对应的 $\delta = 0.163$ 和 $\Delta z = 1.2$ 时对应的 $\delta = 0.185$,对于该触探孔锥尖阻力所确定的波动函数,虽然两个峰值相差不大,得到峰值时所对应的滞后距 Δz 相差较大,有必要针对应用波动函数法时出现的多个

峰值的选择进行深入分析。为了分析此法确定自相关距离时的取值原则，结合空间递推平均法的改进方法，即

定义方差折减系数为

$$\Gamma^2(\Delta z) = \frac{D^2(i)}{\sigma^2} \quad (1)$$

式中： $\Gamma^2(\Delta z)$ 为方差折减系数； $D^2(i)$ 为空间平均方差； σ^2 为试验点方差。

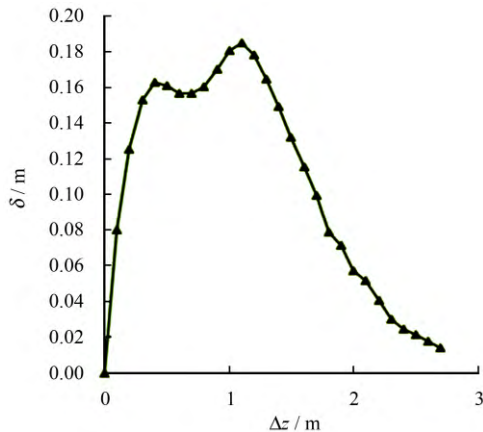


图 2 波动函数法
Fig.2 Wave function method

$\Gamma^2(\Delta z)$ 的理论值表达式为

$$\Gamma^2(\Delta z) = \frac{\delta_u}{\Delta z} \quad (2)$$

假定自相关距离为 δ_u ，对应该假定值可以得到一条 $\Gamma^2(\Delta z)$ 的理论曲线，当由式 (1) 所计算的 $\Gamma^2(\Delta z)$ 值接近由式 (2) 得到的理论曲线时，假定的 δ_u 即为所求^[2]。据此，应用计算的折减函数值分别检验由两个峰值点所对应的波动函数值 δ 所确定的折减函数曲线，如图 3 所示。对比图中拟合结果可知，应用第一个峰值点拟合的结果较好，在应用波动函数法确定自相关距离值时如果出现多个峰值，建议选取第一个峰值作为该土层土性参数的自相关距离值。

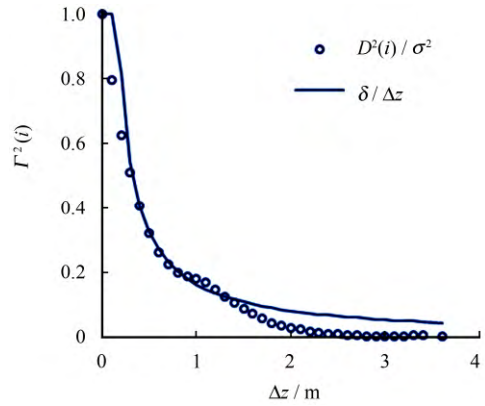
3 自相关距离影响因素分析

3.1 去趋势化

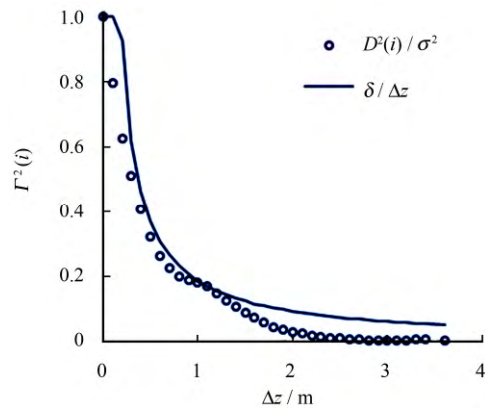
应用随机场理论获得土体空间变异性，首先对原始测试数据进行处理，进而获得 0 均值、具有平稳性或弱平稳性的随机数据。土体岩土工程参数函数 $g(z)$ 可以被分为两部分：

$$g(z) = t(z) + w(z) \quad (3)$$

式中： z 为测试深度； $t(z)$ 为趋势函数； $w(z)$ 为随机分量，表明了土体固有的变异性。



(a) $\delta = 0.163$



(b) $\delta = 0.185$

图 3 自相关距离确定原则分析
Fig.3 Determination regulation analysis of scale of fluctuation

去趋势方法是最常用的获得平稳随机场的方法，满足了随机场理论中对参数平稳性的要求，避免了因直接采用试验参数分析土层变异性而使变异评价结果过高的现象。Cafaro 等^[5]的研究中既有线性去趋势方法，又有非线性去趋势方法，下文将开展去趋势化方法对自相关距离影响的分析。

应用不同去趋势化方法对静力触探孔的触探曲线进行去趋势化，并由各去趋势方法得到的随机分量确定所对应的自相关距离值。

(1) 线性

以 2 号触探孔为例，当此触探孔数据选用线性方式去趋势化时得到的随机分量如图 4 所示。

(2) 非线性

当 2 号触探孔数据选用非线性方式去趋势化时得到的结果如图 5 所示。本次静力触探数据的间距为 0.1 m，为降低样本数量过少对计算结果的影响，以间距为 0.1 m 的原始静力触探数据为基础，通过不同去趋势化方法得到其随机分量。但是仅通过随机分量的均值、标准差判断去趋势化方法的优劣并不完善，应进一步确定去趋势得到随机分量所对应的自相关距离值，通过对比不同去趋势方法得到的自相关距离值，最终判断去趋势化方法的优劣，统计结果见表 1。

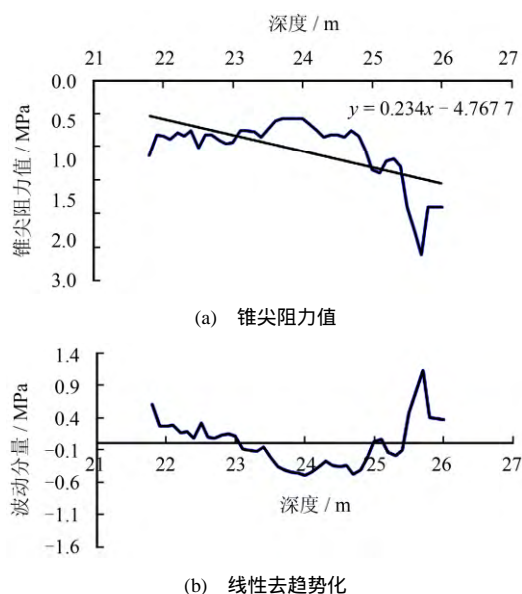


图4 锥尖阻力和线性去趋势化结果

Fig.4 Cone tip resistance and random perturbations by linear trend removal results

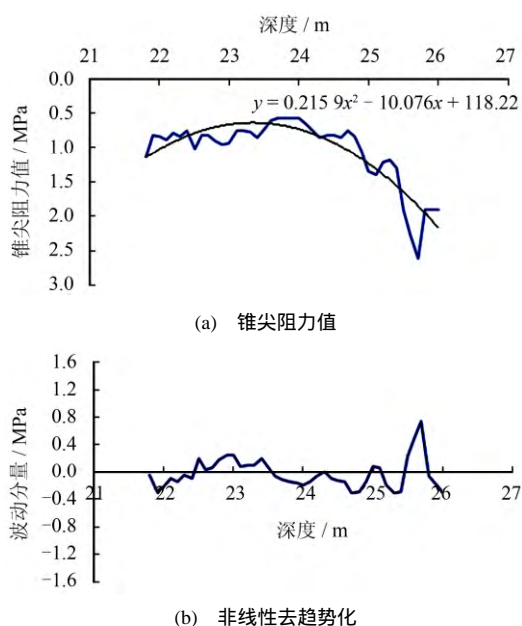


图5 锥尖阻力非线性去趋势化结果

Fig.5 Cone tip resistance and random perturbations by nonlinear trend removal results

表1 随机分量统计特征

Table 1 Statistical properties of random perturbation

触探孔 编号	去趋势化 方法	统计参数		
		均值	标准差	自相关距离值
2	线性	0	0.37	0.367
	非线性	0	0.21	0.180
11	线性	0	0.42	0.234
	非线性	0	0.29	0.340
12	线性	0	0.39	0.279
	非线性	0	0.31	0.153

由表 1 可见, 通过线性去趋势化方法处理, 3 个触探孔锥尖阻力得到的随机分量标准差要高于非

线性方法得到的随机分量标准差。对比两种不同去趋势化方法得到的随机分量所对应的自相关距离值可知, 非线性去趋势化方法得到的自相关距离值与前人得到的结论更为相符, 因此, 去趋势化方法要依实际情况而定, 并不是所有情况都可以使用线性去趋势化方法。上文所说的非线性去趋势化方法指的是二次非线性, 如果采用更高次非线性, 去趋势后的随机分量标准差会更低, 但对应的均值却不再是 0, 且次数越高, 随机分量的均值与 0 的差值越大, 对试验数据去趋势时建议最高选用二次非线性拟合结果。

为分析取样间距对自相关距离计算结果的影响, 分别计算取样间距 $\Delta z_0 = 0.1$ 、0.3、0.5、0.7、0.9 m 时随机分量所对应的自相关距离值, 以某一触探孔数据为例, 分析过程如图 6 所示。

3.2 取样间距

为分析取样间距对自相关距离计算结果的影响, 应用上述方法统计了取样间距为 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 m 时触探孔的自相关距离值, 为了检验结果的普遍性, 分别给出触探孔数为 6、7、10、15 时的自相关距离变化规律, 如图 7 所示。

触探孔数量较少时, 自相关距离并没有随样本间距变化而呈现出应有的变化规律, 而触探孔数量较多时, 自相关距离基本符合随样本间距的变化规律, 即自相关距离随样本间距的增大而增大, 与文献[11]结果相符。

3.3 取样范围

图 8 为不同取样范围所对应的自相关距离变化规律。从图中可以看出, 对于相同的样本间距, 随着触探孔数量的增加, 自相关距离是逐渐减小的, 但是这种差距随样本间距的增大而逐渐缩小。

4 结 论

(1) 应用波动函数法确定自相关距离时, 若出现多个峰值, 应选取第一个峰值作为自相关距离值。此结论是否具有普适性, 将继续开展其他场地试验数据的分析。

(2) 线性去趋势化方法得到的随机分量标准差要高于非线性方法得到的随机分量标准差。更重要的是, 非线性去趋势化方法得到的自相关距离值与前人得到的结论更为相符。去趋势化方法要依土性而定, 线性去趋势化方法并不适用于所有情况, 且对试验数据去趋势化时, 建议最高选用二次非线

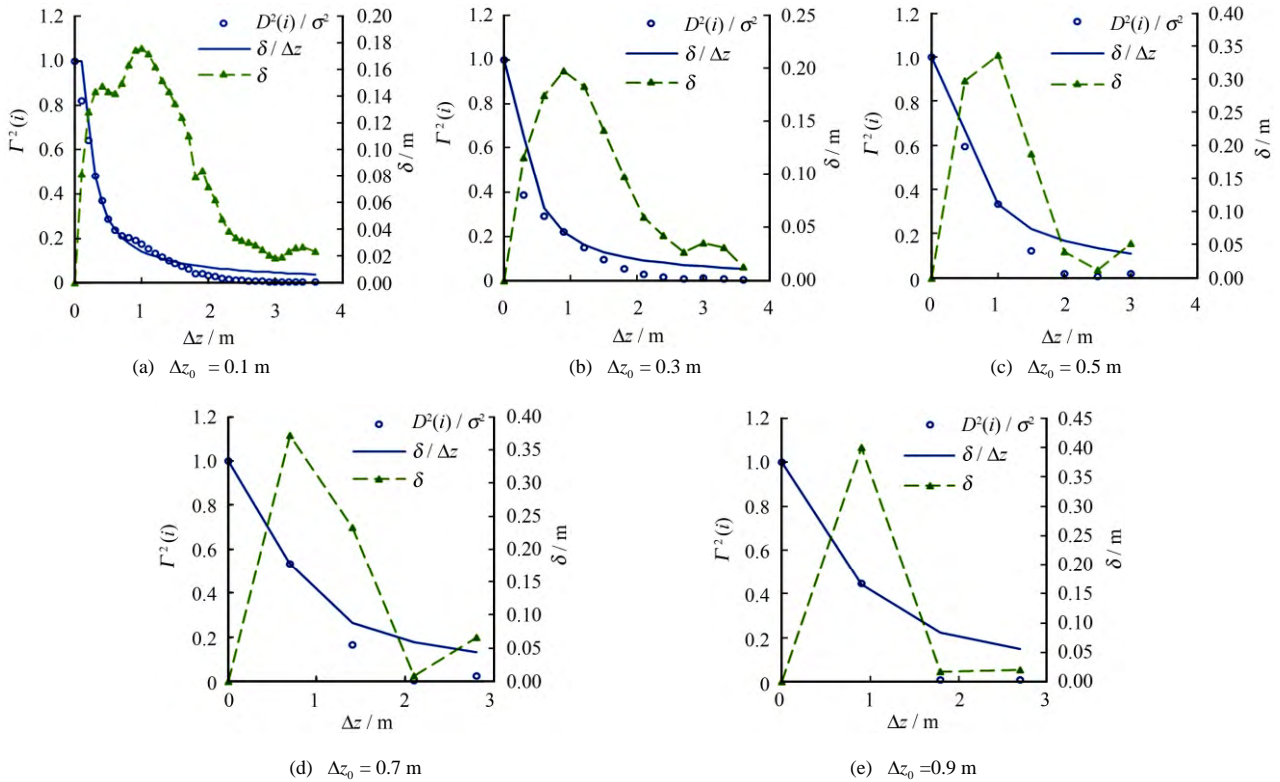


图 6 不同取样间距时自相关距离的确定

Fig.6 Determination of scale of fluctuation for different sampling spacings

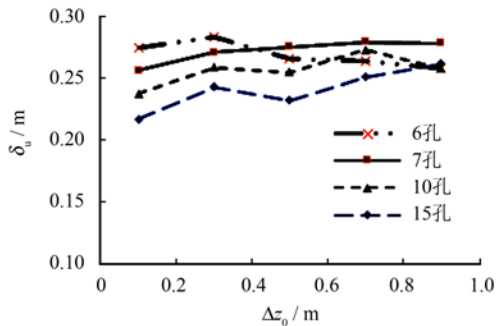


图 7 取样间距对自相关距离的影响

Fig.7 Influence of sample spacing on scale of fluctuation

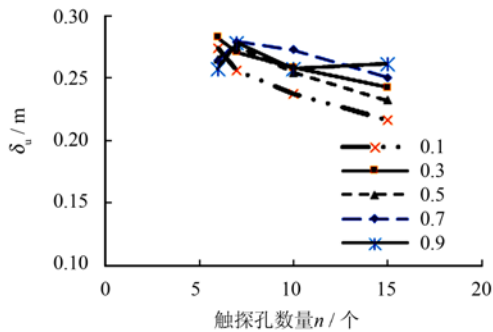


图 8 取样范围对自相关距离的影响

Fig.8 Influence of sampling range on scale of fluctuation

性拟合结果对原始数据去趋势化。

(3) 取样范围较小时自相关距离并没有随样

本间距变化而呈现出应有的变化规律，当取样范围较大，即触探孔数量较多时自相关距离基本符合随样本间距的变化规律，即自相关距离值随样本间距的增大而增大。

(4) 对于相同的样本间距，随着触探孔数量的增加，自相关距离是逐渐减小的，但差距随样本间距的增大而逐渐缩小。

参考文献

[1] VANMARCKE E H. Probabilistic modeling of soil profiles[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering*, 1977, 103(GT11): 1227 - 1246.

[2] 朱红霞. 随机场理论在地基可靠度分析中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.

ZHU Hong-xia. Study of using random field theory in soil foundation reliability analysis[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.

[3] JAKSA M B, KAGGWA W S, BROOKER P I. Experimental evaluation of the scale of fluctuation of a stiff clay[C]//International Conference on Applications of Statistics and Probability. Sydney: [s. n.], 1999.

[4] 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.
- [5] 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.
- [6] DAsAKA, S M, ZHANG, L M. Spatial variability of in situ weathered soil[J]. **Geotechnique**, 2012, 62(5): 375 - 384.
- [7] LLORET-CABOT M, FENTON G A, HICKS M A. On the estimation of scale of fluctuation in geostatistics[J]. **Georisk**, 2014, 8(2): 129 - 140.
- [8] ONYEJEKWE S, KANG Xin, GE Louis. Evaluation of the scale of fluctuation of geotechnical parameters by autocorrelation function and semivariogram function[J]. **Engineering Geology**, 2016, 9(14): 43 - 49.
- [9] 闫澍旺, 贾晓黎, 郭怀志. 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. Inspection of stationary and ergodicity of random field model of soil profile[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 17(3): 1 - 9.
- [10] 丁继辉, 宇云飞, 张庆宏, 等. 土性相关距离计算的非线性曲线拟合法[J]. 勘察科学技术, 2000, 17(3): 13 - 22.
DING Ji-hui, YU Yun-fei, ZHANG Qing-hong, et al. Nonlinear curve fitting method of the soil property correlative distance calculation[J]. **Site Investigation Science and Technology**, 2000, 17(3): 13 - 22.
- [11] 李小勇, 谢康和, 虞颜. 土性指标相关距离性状的研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(8): 91 - 95, 108.
LI Xiao-yong, XIE Kang-he, YU Yan. Research on the characteristics of correlation distance on soil properties indexes[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2003, 36(8): 91 - 95, 108.
- [12] 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.
- [13] 杨勇, 范文, 赵治海, 等. 用于计算西安黄土相关距离的空间范围的探讨[J]. 土木工程学报, 2014, 47(11): 92 - 97.
YANG Yong, FAN Wen, ZHAO Zhi-hai, et al. Investigations of spatial range associated with the calculation of the correlation distance for Xi'an loess[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2014, 47(11): 92 - 97.
- [14] 傅旭东. 静力触探参数相关范围的估算[J]. 岩土力学, 1999, 20(4): 76 - 80.
FU Xu-dong. Estimation on scale of fluctuation of cone penetration test parameters[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(4): 76 - 80.
- [15] 张继周, 缪林昌, 陈俊波. 苏中腹地湖相软土土性参数变异性统计描述[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 471 - 477.
ZHANG Ji-zhou, MIAO Lin-chang, CHEN Jun-bo. Statistical characterization of variability of lacustrine soft soil in central region of Jiangsu Province[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(2): 471 - 477.
- [16] 李新生, 刘超. 相关距离分析与勘察钻孔取样间距的合理确定[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(4): 74 - 77.
LI Xin-sheng, LIU Chao. Analysis on scale of fluctuation and determination of sampling space of borehole[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2011, 38(4): 74 - 77.
- [17] 林军, 蔡国军, 邹海峰, 等. 基于随机场理论的江苏海相黏土空间变异性评价研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1278 - 1287.
LIN Jun, CAI Guo-jun, ZOU Hai-feng, et al. Assessment of spatial variability of jiangsu marine clay based on random field theory[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(7): 1278 - 1287.
- [18] 郭林坪, 杨爱武, 闫澍旺, 等. 天津港地区土层剖面随机场特征参数的估计[J]. 工程地质学报, 2016, 24(1): 130 - 135.
GUO Lin-ping, YANG Ai-wu, YAN Shu-wang, et al. Estimation of random field characteristic parameters of soil layers in Tianjin port[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2016, 24(1): 130 - 135.
- [19] 闫澍旺, 郭林坪, 曹永华. 岩土工程可靠度分析中方差折减函数确定的一般规律[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2286 - 2292.
YAN Shu-wang, GUO Ling-ping, CAO Yong-hua. Regularity of the reduction function of variance in reliability analysis in geotechnical engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(8): 2286 - 2292.
- [20] YAN Shu-wang, GUO Lin-ping. Calculation of scale of fluctuation and variance reduction function[J]. **Transactions of Tianjin University**, 2015, 21(1): 41 - 49.
- [21] 常士骝, 张苏民. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
CHANG Shi-biao, ZHANG Su-min. Manual of engineering geology[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [22] COMPANELLA R G, WICKREMESINGHE D, ROBERTSON P K. Statistical treatment of cone penetrometer test data[C]//The Fifth International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering. Canada; [s. n.], 1987.