

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.02.021

基于 CPT 的合肥老黏土土性波动范围计算分析

吴杰, 吴道祥, 林飞, 李文修

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章选取合肥市 2 处相距较远的典型场地进行静力触探试验(cone penetration test, CPT), 对合肥老黏土层 CPT 数据进行去趋势化处理, 并对其进行平稳性和各态历经性检验, 确定随机场模型的适用性。分析探究取样间距和取样范围对合肥老黏土土性波动范围的影响, 并采用空间递推平均法对合肥老黏土层竖向土性波动范围进行计算统计。结果表明:随着取样间距的增大, 土性波动范围计算结果随之增大, 标准差也呈增大趋势;随着取样范围增大, 土性波动范围计算结果呈先增大后逐渐平稳的趋势;根据两场地的计算结果得出合肥地区老黏土波动范围的均值变化范围为 0.57~0.68 m。该研究成果可为合肥地区岩土工程设计和稳定性评价提供参考。

关键词:静力触探试验(CPT);波动范围;随机场模型;空间递推平均法

中图分类号:TU442;TU443

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2025)02-0283-06

Calculation and analysis of the scale of fluctuation of soil properties of old clay in Hefei based on CPT

WU Jie, WU Daoxiang, LIN Fei, LI Wenxiu

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract:In this paper, the cone penetration test(CPT) was carried out at two typical sites far away from each other in Hefei. The trend removal methods were used for the CPT data of Hefei old clay layer, and then the stationarity and ergodicity tests were carried out on the processed data to verify the applicability of the random field model in the region. On this basis, the effect of sampling spacing and sampling range on the scale of fluctuation of soil properties of Hefei old clay was discussed, and the spatial recurrence average method was used to calculate the vertical scale of fluctuation of soil properties of Hefei old clay layer. The results show that with the increase of sampling spacing, the calculation results of the scale of fluctuation of soil properties increase, and the standard deviation of the calculation results also tends to increase; with the increase of sampling range, the calculation results of the scale of fluctuation of soil properties increase first and then gradually smooth; based on the calculation results of the two sites, the mean range of scale of fluctuation of soil properties of old clay in Hefei area is 0.57-0.68 m. The research results can provide a reference for geotechnical engineering design and stability evaluation in Hefei area.

Key words:cone penetration test(CPT); scale of fluctuation; random field model; spatial recurrence average method

收稿日期:2023-03-23; **修回日期:**2023-04-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42372302);合肥工业大学产学研校企合作资助项目(W2019JSFW0733)

作者简介:吴杰(1997—),男,河南新县人,合肥工业大学硕士生;

吴道祥(1975—),男,湖北洪湖人,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail:daoxiang_w@126.com.

土体作为一种天然材料,其性质具有空间变异性^[1]。而土工试验所得到的数据只能表现土体中某一点的性质,无法表现土体的空间平均特性。为解决该问题,文献[2]建立土体剖面随机场模型,利用方差折减函数将土体“点特性”转换为“空间平均特性”,并提出用波动范围来量化土体的空间平均特性。研究表明,波动范围的大小直接影响岩土工程设计和可靠度评价的结果^[3-5]。为准确合理得到土体的波动范围,学者针对波动范围计算方法和计算过程中遇到的问题展开研究。文献[6-7]讨论样本取样间距对土性波动范围计算结果的影响;文献[8]对各种波动范围计算方法进行比较,发现空间递推平均法和相关函数法是最可靠的计算方法;文献[9]提出一种同时满足随机场法和地质统计学法的数据点拟合方法;文献[10]研究认为建立随机场模型前要对土性参数进行平稳性和各态历经性检验,并提出相应的检验方法,在此基础上,文献[11]对西安黄土进行随机场模型适用性检验。

由于土体的空间变异性具有一定的区域性差异,还有学者计算统计不同区域土体波动范围代表值。文献[12]计算得到宁波地区典型淤泥质黏土层竖向波动范围代表值为 0.44 m,淤泥层竖向波动范围代表值为 0.35 m;文献[13]计算得到太原地区粉质黏土层土工参数的波动范围为 0.53 m;文献[14]基于静力触探试验(cone penetration test, CPT)数据计算得到苏中湖相沉积土层的竖向波动范围为 0.21~2.27 m,均值变化范围为 0.41~0.71 m;文献[15]基于 CPTU(CPT with U-tube)试验数据计算,得到江苏海相黏土层的竖向波动范围为 0.27~0.48 m,水平波动范围为 5.0~11.1 m。

目前,有关其他地区典型土体波动范围的研究较多,而关于合肥地区广泛分布的老黏土波动范围的研究较少。若选用其他区域土体波动范围进行合肥地区的岩土工程可靠度评价,其结果可能存在误差。本文利用工程实测 CPT 数据,检验合肥地区老黏土土性剖面的平稳性和各态历经性,建立老黏土随机场模型,分析影响老黏土波动范围的因素,并根据空间递推平均法计算统计合肥地区老黏土的波动范围。

1 试验场地概况

合肥地区地表浅层的覆盖层以第四系沉积为主,其中上更新统黏土(俗称老黏土)分布区域最广,主要分布在南淝河二级阶地,为超固结土,具

弱或中等膨胀性,一般为褐黄色、灰黄色,硬塑或坚硬状态,含氧化铁、铁锰结核、高岭土等。

为保证研究的地区适用性,选取合肥地区两处相距约 35 km 的典型场地,均分布有厚层上更新统黏土。与室内土工试验和其他原位测试方法相比,静力触探能够获得原状土体连续等间距的土性参数,稳定性强、精度高^[16]。因此,本文分别在两处场地各进行了 20 余组静力触探试验,利用实测 CPT 数据计算老黏土的波动范围。

2 随机场基本概念

2.1 方差折减函数

传统的统计学方法常常将试验所得参数作为独立的随机变量,因此用参数统计方法得到的估计量仅仅体现土体参数的点特性,而不是空间平均特性,这也就忽略了岩土体本身的相关性。文献[2]提出的随机场模型利用方差折减函数实现点特性到空间平均特性的转换:

$$\Gamma^e(h) = \frac{\text{Var}[Y_h(z)]}{\sigma^2} \quad (1)$$

其中: $\Gamma^e(h)$ 为方差折减函数; $\text{Var}[Y_h(z)]$ 为空间平均方差; σ^2 为土体参数点方差。

2.2 波动范围

波动范围表示为:在某一距离范围内,土性指标具有强烈相关性,超过这个距离范围土性指标的相关性就逐渐减弱甚至没有^[2,10]。

根据式(1)、随机场数字特征和相关函数的性质有:

$$\lim_{h \rightarrow \infty} h\Gamma^2(h) = 2 \lim_{h \rightarrow \infty} \int_0^h \left(1 - \frac{\Delta z}{h}\right) \rho(\Delta z) d(\Delta z) = 2 \int_0^h \rho(\Delta z) d(\Delta z) = \delta \quad (2)$$

其中: h 为数据的空间范围; Δz 为样本取样间距; $\rho(\Delta z)$ 为数据的相关函数; δ 为波动范围。

目前计算波动范围方法主要包括:空间递推平均法、相关函数法、统计模拟法、半变异函数法、平均零跨距法等^[6,17]。其中空间递推平均法和相关函数法适用性强,应用最广泛。相较于相关函数法,空间递推平均法计算结构稳定,物理意义清晰,其基本计算过程如下。

1) 先将用于计算的空间范围 h 取为取样间距 Δz_0 的整数倍,对离散数据的相邻 j 个样本取均值;

2) 将所得的各样本均值组成一组新的样本数据,并计算该样本数据的方差 $\text{Var}(j)$,根据样本方差得到方差折减函数:

$$\Gamma^2(j) = \text{Var}(j)/\sigma_p^2 \quad (3)$$

其中: σ_p^2 为原始样本数据方差;取 $j=2,3,4,\dots,n$, 分别计算不同 j 值对应的方差折减函数, 根据计算结果绘制 $\Gamma^2(j)-j$ 图, 从 $\Gamma^2(j)-j$ 图中寻找一个使得 $\Gamma^2(j)$ 趋于平稳的点 j^* ;

3) 通过计算得到波动范围, 计算公式为:

$$\delta = j^* \Delta z_0 \Gamma^2(j^*) \quad (4)$$

但在实际运算中, 常常由于计算数据不足或数据质量不好, 导致平稳点 j^* 难以确定。对此文献[18]提出可以直接绘制 $j \Delta z_0 - j \Delta z_0 \Gamma^2(j)$ 曲线图, 以曲线的峰值点作为波动范围值, 并通过理论推导证明了这种方法的合理性。本文后续将采用上述改进的递推空间法进行波动范围计算。

3 数据处理及随机场模型适用性检验

3.1 原始数据去趋势化处理

土体性质参数往往具有沿深度方向的趋势性, 一般而言, 土性参数 $t(x)$ 可表示为:

$$t(x) = m(x) + \omega(x) \quad (5)$$

其中: x 为深度坐标; $m(x)$ 为土性参数趋势分量; $\omega(x)$ 为土性参数波动分量。

利用随机场理论进行波动范围计算前要对原始数据进行去趋势化处理。去趋势化处理需选取合适的拟合多项式对原始数据进行拟合, 并且拟合多项式的阶数不宜过高, 最高可为二阶[5,19]。经曲线拟合分析发现, 场地 1 的 CPT 数据沿深度方向具有线性趋势, 场地 2 的 CPT 数据沿深度方向具有非线性趋势。

因此, 本文对场地 1 的原始 CPT 数据采用线性去趋势方法进行去趋势化处理, 对场地 2 的原始 CPT 数据采用非线性去趋势方法进行去趋势化处理, 即采用二阶函数对原始数据进行拟合去趋势, 如图 1 和图 2 所示。

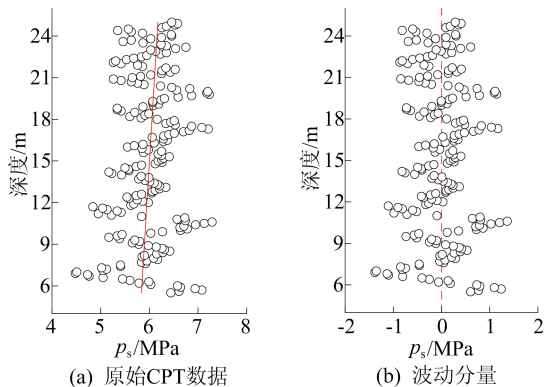


图 1 场地 1 中 4 号孔比贯入阻力 p_s 去趋势化处理

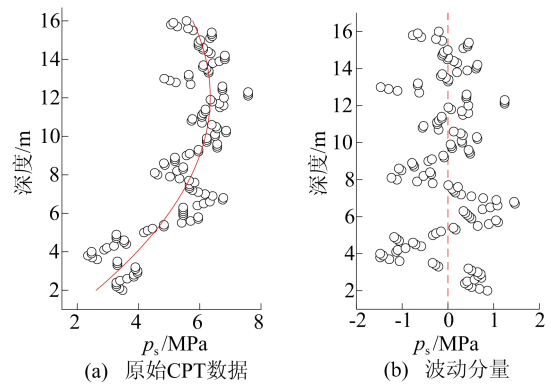


图 2 场地 2 中 20 号孔比贯入阻力 p_s 去趋势化处理

3.2 平稳性和各态历经性检验

随机场模型实质上是用齐次正态随机场去模拟土性剖面, 因此经过去趋势化处理得到的波动分量需在数学意义上符合随机场条件, 即具有平稳性或弱平稳性[11]。

此外, 土体宏观上是一个整体结构, 但从微观角度而言, 土体是由无数单元组合而成的集合体, 如果通过一个孔的数据来反映土体内部空间某一范围的性质, 那么所采用的数据也应具有各态历经性。因此, 在建立合肥地区老黏土土性剖面随机场模型前, 需要对去趋势化处理得到的波动分量进行平稳性和各态历经性检验。

检验时, 波动分量的平稳性可以根据集平均 $\mu(x)$ 和自相关函数 $R(x, x + \Delta x)$ 是否与深度有关来判断, 各态历经性根据深度平均 $\mu(n)$ 和深度自相关函数 $R_n(x, x + \Delta x)$ 是否与各孔水平距离有关来判断。

3.2.1 平稳性检验

在平稳性检验中, $\mu(x)$ 表示各孔 p_s 值在深度 x 下对应的波动分量的均值, $R(x, x + \Delta x)$ 表示各孔 p_s 值在深度 x 和 $x + \Delta x$ 下对应波动分量乘积的均值。两场地 CPT 数据去趋势处理得到的波动分量的平稳性检验结果分别如图 3、图 4 所示。

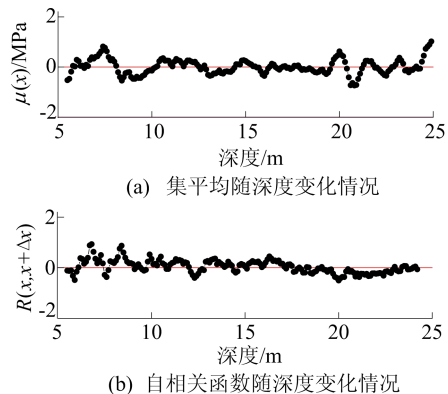


图 3 场地 1 平稳性检验结果

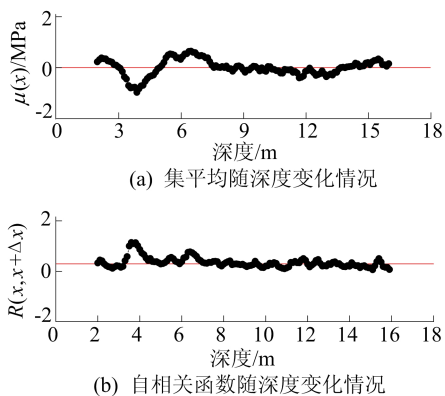


图 4 场地 2 平稳性检验结果

从图 3、图 4 可以看出,除了部分点有轻微摆动外,两场地各孔 CPT 数据经去趋势处理得到的波动分量的集平均和相关函数基本沿着深度坐标轴趋于水平变化,说明被检验波动分量的集平均和相关函数基本不随深度变化而改变,因此两场地 CPT 数据经过去趋势处理得到的波动分量具有平稳性。

3.2.2 各态历经性检验

CPT 孔并不是严格按照等间距排列,因此各态历经性检验时以孔号来代替各孔之间的水平距离。 $\mu(n)$ 表示 n 号孔波动分量的均值, $R_n(x, x + \Delta x)$ 表示 n 号孔在深度 x 和 $x + \Delta x$ 下对应波动分量乘积的均值。

两场地 CPT 数据经去趋势处理得到的波动分量的各态历经性检验结果分别如图 5、图 6 所示。

从图 5、图 6 可以看出,各孔 CPT 数据去趋势处理得到的波动分量的深度集平均和深度相关函数沿水平坐标轴的摆动幅度很小,基本不随钻孔间水平距离的变化而改变,因此两场地 CPT 数据经过去趋势处理得到的波动分量具有各态历经性。

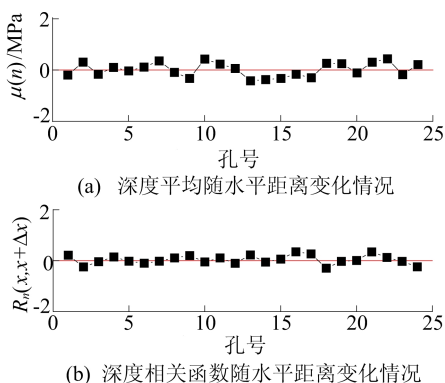


图 5 场地 1 各态历经性检验结果

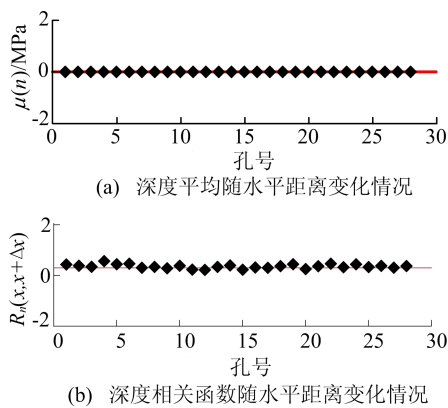


图 6 场地 2 各态历经性检验结果

综上所述,经过去趋势处理得到合肥地区老黏土 CPT 数据的波动分量具有平稳性和各态历经性,符合建立随机场模型的基本条件。

4 老黏土土性波动范围计算分析

4.1 老黏土土性波动范围影响因素分析

4.1.1 取样间距的影响

土性波动范围能够反映土层内部土体变异性的 大小,对于某一具体的土层而言,其波动范围应该相对稳定,不受其他因素的影响而产生较大的变化。但在实际计算时,往往会由于取样间距不同导致计算结果有较大差异。

为了进一步研究取样间距对合肥老黏土土性波动范围计算结果的影响,在场地 1 中随机选取 4 个孔的 CPT 数据,分别以 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 m 的取样间隔来选取数据,然后采用空间递推平均法计算不同取样间距下各孔 CPT 数据对应的土性波动范围。

不同取样间距下土性波动范围的变化情况如图 7 所示。

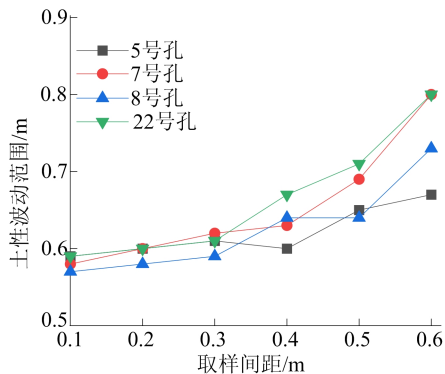


图 7 老黏土土性波动范围随取样间距变化情况

由图 7 可知,合肥老黏土土性波动范围计算结果随取样间距的增大而增大,但明显可以看出

在取样间距为 0.1、0.2、0.3 m 时,土性波动范围计算结果有一个近似稳定阶段,在这个阶段,随取样间距的增大,土性波动范围计算结果的增幅很小,并且各孔计算得到的波动范围相差很小。当取样间距超过 0.3 m 之后,随着取样间距的增大,土性波动范围的增幅也变大,各孔计算得到的波动范围相差更大。

不同取样间距下各孔土性波动范围计算结果标准差如图 8 所示。从图 8 可以看出,随着取样间距的增大,各孔计算结果标准差逐渐增大,且当取样间距超过 0.3 m 时,增大的趋势更加明显,呈陡增趋势。

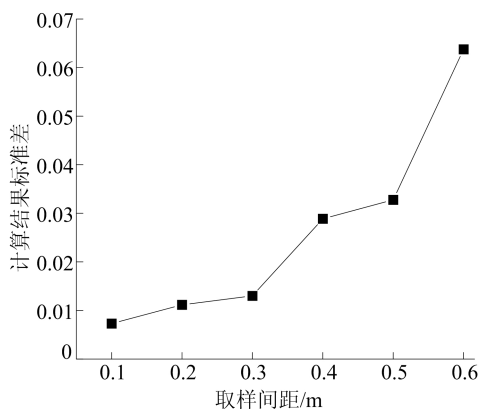


图 8 不同取样间距下各孔土性波动范围标准差

上述研究结果表明,取样间距越大,老黏土土性波动范围的计算结果越大,并且计算结果的稳定性越差。出现这种情况主要是由于对于同一 CPT 孔而言,取样间距的大小直接影响最终取得的样本数量的多少,取样间距越大取得的样本数量就越少,并且当取样间距过于大时,各样本之间的变异性会被均匀化,从而导致最终的波动范围计算结果的增大。

综上所述,取样间距大小对老黏土土性波动范围计算结果有显著影响,取样间距为 0.1~0.3 m 时,各孔波动范围计算结果均比较稳定。因此,本文建议计算合肥地区老黏土土性波动范围时,取样间距应小于 0.3 m。

4.1.2 取样范围的影响

为探讨取样范围对老黏土波动范围计算结果的影响,现随机选取场地 2 中 11 个孔的 CPT 数据为样本(取样间距为 0.1 m),沿深度方向以 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, ..., 14.0 m 为取样范围选取样本数据,共计 286 组数据。

对上述各组数据进行去趋势化处理并检验数据平稳性和各态历经性,然后采用空间递推平均

法计算各组数据对应的波动范围。根据各组数据的计算结果绘制不同取样范围下对应的土性波动范围散点图如图 9 所示。由图 9 可知,随着取样范围增大,波动范围值先是呈逐渐增大的趋势,然后逐渐趋于平稳。

不同取样范围下各孔计算得到的土性波动范围的均值变化曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出,波动范围均值随着取样范围的增大而增大,当取样范围达到 10.5 m 后,波动范围均值的变化逐渐平稳。

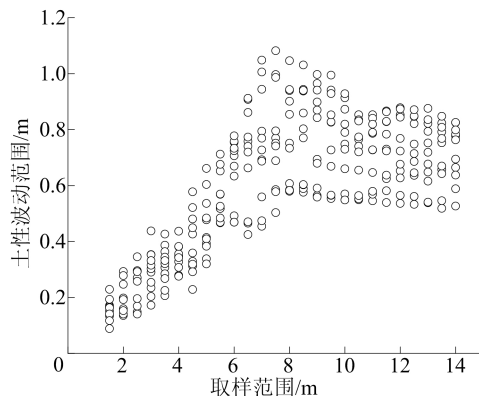


图 9 波动范围随取样范围变化情况

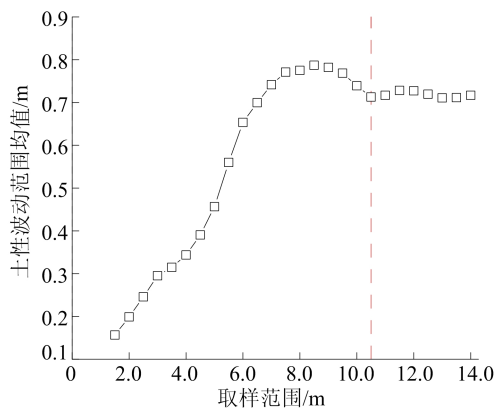


图 10 波动范围均值随取样范围变化情况

上述结果表明,当取样范围较小时,土性波动范围的计算结果并不稳定,但随着取样范围的增大,波动范围计算结果逐渐趋于稳定。

合肥地区的老黏土层厚度比较大,一般可达 15~25 m。根据上述分析结果,本文建议对于合肥地区厚层老黏土而言,在计算其波动范围时,若样本取样间距为 0.1 m,则样本的取样范围需达到 10.5 m 以上。

4.2 老黏土竖向土性波动范围计算结果

针对上述分析,对场地 1 和场地 2 的实测 CPT 数据(取样间距为 0.1 m),采用空间递推平均法计算老黏土的竖向土性波动范围。

以场地 1 的 3、5、7 号孔为例,土性波动范围计算结果如图 11 所示,3 个孔计算得到的竖向土性波动范围分别为 0.62、0.59、0.58 m。

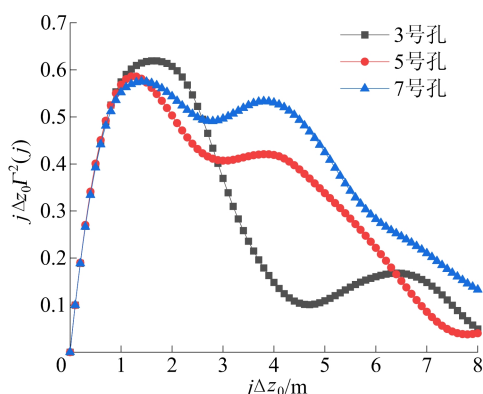


图 11 空间递推平均法计算结果

两场地老黏土竖向土性波动范围计算结果见表 1 所列。虽然两场地相距较远且原始 CPT 数据的趋势性不同,但由表 1 可知:场地 1 计算得到的合肥老黏土竖向土性波动范围均值为 0.68 m,变异系数为 0.21;场地 2 计算得到的合肥老黏土竖向波动范围均值为 0.57 m,变异系数为 0.26;两者比较接近。该结果可用作本区域岩土工程设计以及稳定性评价的参考值。

表 1 竖向土性波动范围计算结果

工程场地	土层深度 范围/m	竖向土性波动范围		
		变化范围/m	平均值/m	变异系数
场地 1	5.5~25.0	0.47~0.90	0.68	0.21
场地 2	2.0~16.0	0.30~0.82	0.57	0.26

5 结 论

1) 合肥地区老黏土层 CPT 数据符合平稳随机场条件,可以运用随机场模型计算波动范围。

2) 老黏土土性波动范围计算结果和计算结果标准差均随取样间距的增大而增大,在计算合肥老黏土土性波动范围时,取样间距应小于 0.3 m。

3) 样本取样范围对老黏土波动范围计算结果有一定的影响,对于合肥地区厚层老黏土而言,在计算其土性波动范围时,若取样间距为 0.1 m,则取样范围应达到 10.5 m 以上。

4) 根据空间递推平均法计算得出本次研究场地的老黏土土性波动均值变化范围为 0.57 ~ 0.68 m,该结果可作为本研究区域岩土工程设计以及稳定性评价的参考值。

[参 考 文 献]

[1] 张征,刘淑春,鞠硕华. 岩土参数空间变异性分析原理与最

优估计模型[J]. 岩土工程学报,1996,18(4):43-50.

- [2] VANMARCKE E H. Probabilistic modeling of soil profiles [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(11):1227-1246.
- [3] 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.
- [4] 仇文岗,王琦,陈福勇,等. 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[J]. 岩土力学,2021, 42(11):3157-3168.
- [5] 庞林飞,于晓天. 考虑参数空间变异性的电力工程边坡稳定性分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2021,54(增刊 2): 225-230.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 程强,罗书学,彭雄志. 相关距离与土性参数的关系及计算方法[J]. 西南交通大学学报,2000,35(5):496-500.
- [9] 谭晓慧,杜林枫,费锁柱,等. 土性参数波动范围的计算方法及影响因素[J]. 农业工程学报,2020,36(24):91-98.
- [10] 闫澍旺,邓卫东. 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.
- [11] 杨勇,范文,张海峰,等. 西安黄土土性参数随机场模型的适用性探讨[J]. 工程地质学报,2013,21(3):357-362.
- [12] 王建文,周盛,陈峰,等. 宁波软黏土土性相关距离计算分析[J]. 人民长江,2020,51(1):208-212,220.
- [13] 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.
- [14] 张继周,缪林昌,林飞,等. 苏中腹地湖相沉积土层相关距离的统计分析[J]. 工程地质学报,2014,22(2):348-354.
- [15] 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.
- [16] 吴道祥,单灿灿,钟轩明,等. 静力触探的发展及其在岩土工程中的应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2008,31(2):211-215.
- [17] 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.
- [18] 张梅,丁继辉,宋向东. 对求解土性相关距离的空间递推平均法的分析与改进[J]. 河北农业大学学报,1999,22(1): 87-91.
- [19] 郭林坪,孔令伟,徐超,等. 静力触探参数自相关距离确定方法与影响因素分析[J]. 岩土力学,2017,38(增刊 1): 271-276.

(责任编辑 吴 亮)