

文章编号:1672-3031(2010)02-0114-07

淮河方邱湖大堤地质勘察与空间结构分析

何秉顺¹, 王玉杰², 孙东亚¹

(1. 中国水利水电科学研究院 防洪抗旱减灾研究所, 北京 100038;

2. 中国水利水电科学研究院 岩土工程研究所, 北京 100048)

摘要: 利用RI型静力触探设备, 对淮河方邱湖段堤防进行了地质勘察, 提出了堤防各土层大量物理与力学指标, 并通过钻孔取土室内试验与常规静力触探对测试数据进行了对比验证。在地质勘察分层的基础上, 利用地质统计学理论, 对锥尖阻力、摩阻比、干密度、孔隙比4参数进行了空间结构分析, 发现球形模型可较好模拟堤身、堤基土层参数空间变异性, 土层顺堤轴线方向变程在30~50m之间, 深度方向变程在0.2~0.8m之间。物理指标变程略小于强度指标, 与多数文献提供的变程范围一致, 该分析结果为进一步的土工参数估值与模拟提供了基础依据。

关键词: 地质勘察; 静力触探; 变程; 地质统计学

中图分类号: TV871

文献标识码: A

1 研究背景

空间变异是土工参数的固有属性, 表现为两点间的土性参数随距离增大而相关性减小, 大到一定距离, 两点间土性参数完全不相关。传统上, 对土工参数空间变异性的研究, 均借助于随机场理论进行: 同样, 对具有高度不确定性的自然资源的勘察开发, 人们也在随机场理论的基础上逐渐建立了地质统计学, 并在农业、生态、水文、气象等领域得到了广泛应用。

然而与地质统计学在其它学科的迅猛发展相比, 土工参数空间变异性的研究相对滞后, 这一方面是由于土体本身空间变异性更大, 另一方面是由于岩土工程分析设计的高精度的要求。目前的主要困难来源于无法满足测试的密度要求, 多数土工参数的垂直相关距离小于1m, 水平相关距离在50m以内^[1-2], 这就要求现场测试钻孔布置间距小于水平相关距离, 垂向取样间距小于垂直相关距离。若在实际工作中遵照此类要求, 势必带来测试费用与周期的大幅度增加, 是不现实的。包承纲、高大钊提出了一种论断: 即土性参数的相关距离数值基本相同, 它是土体的一种内在属性, 而与其来源无关, 无论通过强度还是物理参数都能够推求出一致的相关距离^[3]。土体的部分强度指标可通过连续的静力触探曲线获得; 土的物理指标, 如干密度、含水量等参数, 还需要进行室内试验, 无法满足上述取样间距要求, 因而也无法对上述结论进行深入验证。

基于上述主要问题, 作者利用了一种新型静力触探设备, 对淮河方邱湖段堤防进行了集中地质勘察, 提出了堤防各土层大量物理与力学指标, 并通过钻孔取土室内试验与常规静力触探对测试数据进行了对比验证。利用地质统计学理论, 在地质勘察分层的基础上, 对锥尖阻力、摩阻比、干密度、孔隙比4参数进行了空间结构分析, 该分析结果为进一步的土工参数估值与条件模拟提供了基础数据。

2 地质统计学与随机场理论

2.1 地质统计学基本理论 地质统计学处理的对象为区域化变量, 即在空间分布的变量。通常一个

收稿日期: 2010-00-00

基金项目: 国家科技支撑计划(2006BAC05805)

作者简介: 何秉顺(1980-), 男, 河北正定人, 工程师, 博士生, 主要从事堤防工程安全评价方面的研究工作。

E-mail: hebs@iwhr.com

区域化变量具有两个性质：①在局部的某一点，区域化变量的取值是随机的；②对整个区域而言，存在一个总体或平均的结构。区域化变量的两大特点是随机性和结构性。基于此，地质统计学引入随机函数及其概率分布模型为理论基础，对区域化变量加以研究。区域化变量可以看作是随机变量的一个实现。地质统计学的一个基本假设为平稳性假设，假定在某个局部范围内空间分布是均匀的：

(1)假定的局部范围内，变量的数学期望值为一常数，不依赖于点的空间位置

$$E\{Z(x)\} = m, \forall x \quad (1)$$

(2)协方差存在，且依赖于两点之间的距离 h

$$C(h) = E\{Z(x+h) \cdot Z(x)\} - m^2, \forall x \quad (2)$$

这样，在空间某一局部范围内，对空间某一点 x_0 ，相距为 h 的多个点，可以看作是点 Z_{x_0} 的多个实现，即可进行统计推断及估值预测。

地质统计学的主要用途，是研究对象空间自相关结构(或空间变异结构)以及变量值的估计和模拟，其前提是根据样本来确定研究对象(某一变量)随空间位置而变化的规律。这个规律，就是变异函数。样本点的变异函数计算公式为：

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [z(u_\alpha) - z(u_\alpha + h)]^2 \quad (3)$$

式中： $N(h)$ 为距离相隔 h 的所有点对的个数。其核心思想是把所有的点对按照间隔距离的大小、方向进行分组，在每一组内，计算每个点对属性值的差异，最后取平均作为该组属性值的差异(变异值)。这样，将整个空间分为不同大小和方向的组，并有相对应的属性差值。

通常利用式(3)得出样本点的实验变异函数，观察该变异函数的分布图像，寻找地质统计学提供的某一种理论模型或者多个理论模型的线性组合进行拟合。常见的理论模型有线性模型、球状模型、指数模型、高斯模型、指数模型等。理论模型利用块金值 C_0 、基台值 $C(0)$ 以及变程 a 等3个参数来描述研究对象的空间分布结构。

2.2 变程与相关距离之间的关系 与地质统计学具有相同的应用目的，随机场理论主要用于描述土工参数的空间变异性或相关性，在岩土工程领域应用更广。随机场由 Vanmarcke^[4]在1977年提出，主要描述了距离与相关性的反比关系，而地质统计学则注重距离与变异性的正比关系。从这个角度上讲，二者对参数空间变异性的表达是一致的。随机场理论的核心是求解土的相关距离，可采用递推空间法、平均零跨法、相关函数法等方法求解，而地质统计学中通过变异函数求变程的方法也可用于求随机场理论的相关距离，但是与所采用的理论模型有关^[5]，变程与相关距离之间的关系推导如下：

对于二阶平稳的区域化变量，变异函数 $\gamma(h)$ 、协方差函数 $C(h)$ 和基台值 $C(0)$ 三者之间有如下关系：

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (4)$$

根据定义，其相关函数为：

$$\rho(h) = C(h)/C(0) \quad (5)$$

其中， $C(0)$ 为基台，即为 σ^2 ， C 为拱高， C_0 为块金值， $C(0) = C_0 + C$ 。

相关函数可表示为：

$$\rho(h) = \frac{C}{C+C_0} \left[1 - \frac{\gamma(h) - C_0}{C} \right] \quad (6)$$

根据随机场理论中对相关距离的定义，通过积分可以求出相关距离 δ ：

$$\delta = 2 \int_0^\infty \rho(h) dh \quad (7)$$

本文发现方邱湖堤防土层采用球状模型能较好地拟合实验变异函数，球状模型变异函数为：

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left(\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3} \right), & 0 < h \leq a \\ C_0 + C, & h > a \end{cases} \quad (8)$$

根据式(6)

$$\rho(h) = \begin{cases} \frac{C}{C+C_0} \left(1 - \frac{3h}{2a} + \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3} \right), & 0 < h \leq a \\ 0 & h > a \end{cases} \quad (9)$$

推导出地质统计学中球状模型变异函数的变程与随机场理论中相关距离的关系如下:

$$\delta = 2 \int_0^{\infty} \rho(h) dh = 2 \int_0^a \frac{C}{C+C_0} \left(1 - \frac{3h}{2a} + \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3} \right) dh = \frac{3}{4} \left(\frac{C}{C+C_0} \right) a \quad (10)$$

3 方邱湖大堤现场测试

3.1 RI型静力触探设备 RI型静力触探设备由日本SRE株式会社开发,属于一种放射性静力触探设备。在保证辐射剂量对人体绝对安全的前提下,通过发射 γ 、射线和中子射线,直接获取的参数有锥尖阻力(q_c)、侧壁摩阻(f_s)、孔隙水压力(u)、水分、密度,通过进一步推导可得到摩阻比(n)、干密度(ρ_d)、孔隙比(e)等土工参数。图1为RI型静力触探钻杆结构图。该设备的优势是将水分测量、密度测量、强度指标测量三合一,因而减少了室内试验和地质钻孔取样的工作量,降低勘察费用与周期,而且能够有效地提高地基分层的精度,减少误判的可能。

3.2 方邱湖堤防地质基本情况与钻孔布置 方邱湖大堤位于淮河中游下段,堤顶高程22.0~22.5m,坡比1:2.5~1:3.0,局部坡比1:2.0~1:2.5,堤顶宽5m左右,堤防一般高出地面4m左右,堤基主要以黏土、轻粉质壤土、砂壤土、淤泥质中粉质壤土及淤泥为主。

在方邱湖大堤上共计布置了7个钻孔,钻孔平面布置见图2,其中Z1—Z5为3阶段钻孔,即先后开展RI型静力触探、常规静力触探、地质钻孔3阶段地质勘察;Z6与Z7仅开展后两项测试工作。图3给出了Z4钻孔RI型静力触探的测试曲线,图3a为物理指标随钻探深度变化关系,图3b为强度指标曲线。在地表8m以下,存在较厚的淤泥质黏土层,锥尖阻力和侧壁摩阻较小。但由于钻探速度保持不变,产生了很大的超孔隙水压力。若单独采用常规静力触探设备,仅依据较小的锥尖阻力和侧壁摩阻,有可能将淤泥质黏土层误判为松砂层,因此使用RI型静力触探设备可以有效地提高地质分层精度,减少误判的可能。图3b还绘制了常规静力触探曲线(虚线部分),二者最大偏差不得超过10%,排除机器误差后,证明使用RI型静力触探设备所获得的堤身、堤基物理力学指标可靠,可用于进一步空间结构分析。

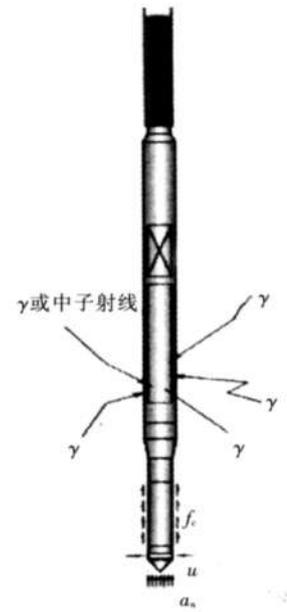


图1 RI CPT结构

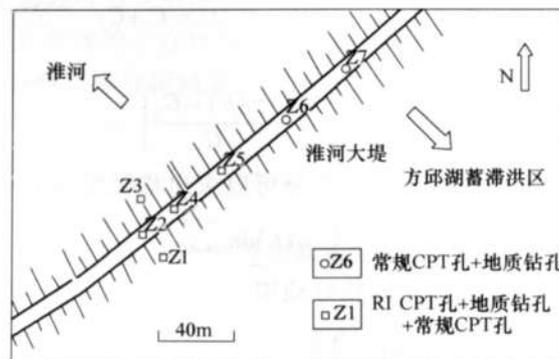
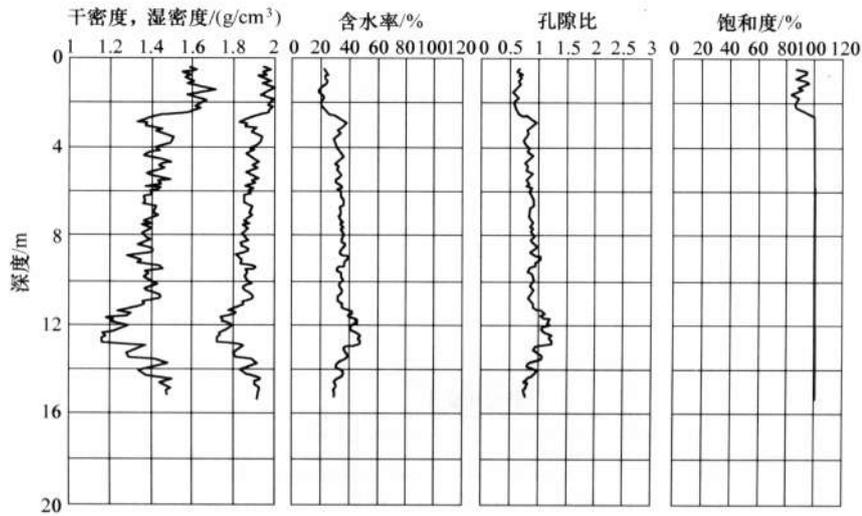
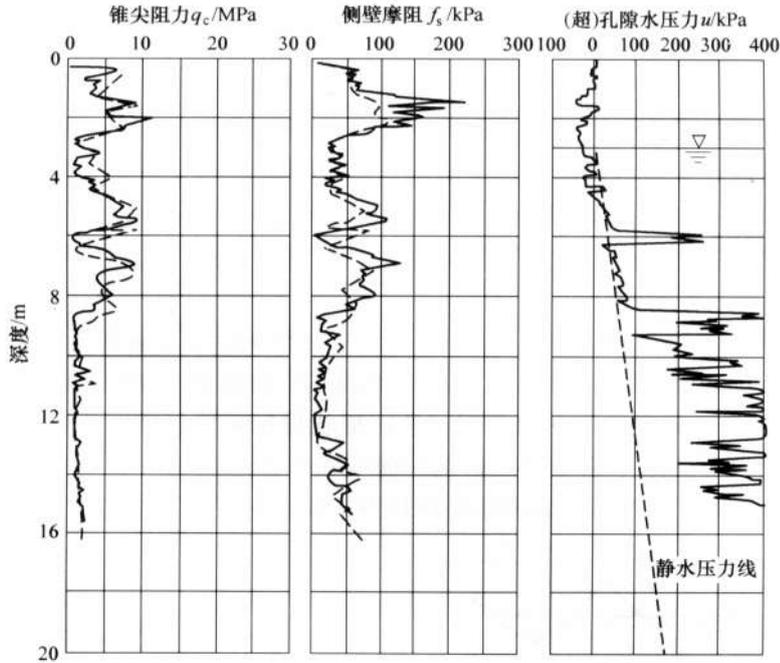


图2 钻孔平面布置



(a) 物理指标测试曲线



(b) 强度指标测试曲线(虚线为常规CPT对比测试曲线)

图3 Z4钻孔测试曲线

图4为综合RI型静力触探、标准贯入(SPT)、室内实验结果的地层分析结果。方邱湖堤防可分为4层,分别为堤身土、轻粉质壤土、砂壤土、淤泥质黏土。在地质分层的基础上,对每层土土性参数进行了空间结构分析。

4 方邱湖段堤防段空间结构分析

4.1 空间结构分析的具体方法 空间结构分析分3步进行:第一步,据计算实验变异函数 $\gamma(h)$;第二步,选择一种合适的理论变异函数模型来拟合实验变异函数 $\gamma(h)$;第三步:用选定的理论变异函数模型拟合最优实验变异函数曲线,求出最优拟合模型下的3个参数 C_0 , C 和 a 。

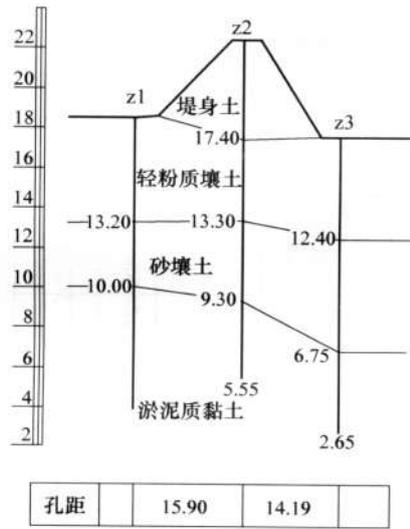
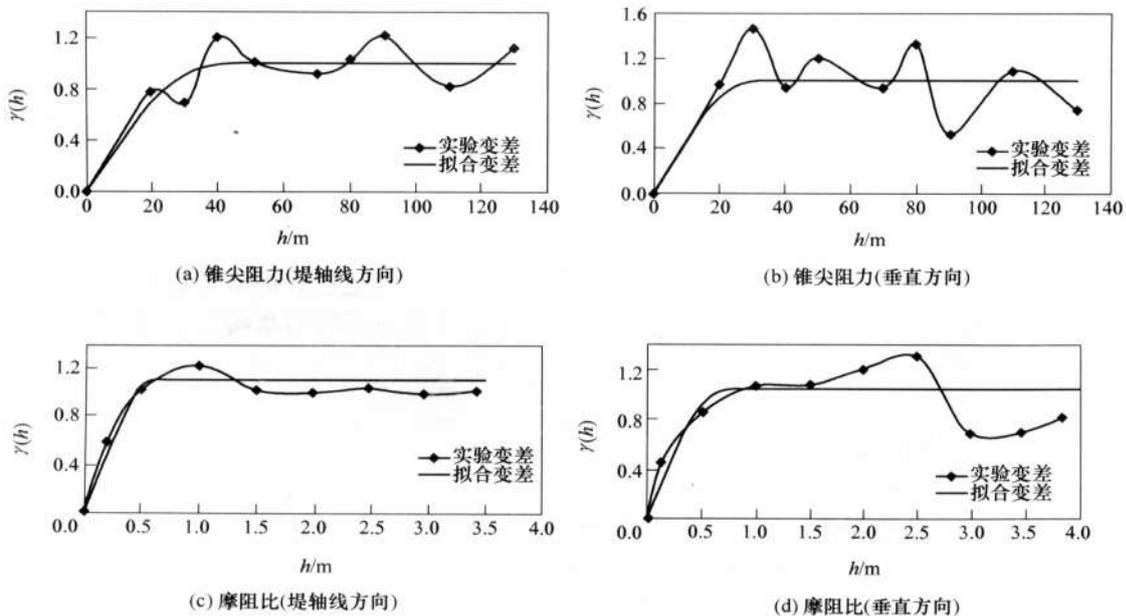


图4 方邱湖大堤地质剖面

各土层值沿深度一般都有一个平均变化的趋势，这与地质统计学中平稳性的假设不符，为了消除这种趋势分量的影响，可以先用最小二乘法对原有数据进行拟合，并用原始数据减去趋势分量后的残余数据绘制变异函数曲线。在实际计算中，发现有的土层物理力学指标的趋势分量并不十分明显，如果对这类土层也进行平稳化处理，将使数据之间的相对值变得非常接近，给变异函数的拟合计算带来新的误差。对这种土层可以从其最小二乘法拟合曲线的相关系数大小来判断，当拟合曲线的相关系数小于0.8时，可认为其趋势分量不明显，不必进行平稳化处理。在本分析中，对锥尖阻力及摩阻比等参数直接使用原始数据进行空间结构分析，而对于干密度、孔隙比等物理指标则采用了消除趋势分量后的残余数据进行分析。

4.2 空间结构分析结果 限于篇幅，本文仅给出了堤身土各参数变异函数图，见图5。方邱湖堤防空间结构分析结果见表1。从计算结果来看，土层顺堤轴线方向变程在30~50m之间，深度方向变程在0.2~0.8m之间，与多数文献提供的变程范围一致；球状模型可较好模拟土层物理及力学指标空间变异性；作过平稳化处理、消除了趋势分量影响后的变程计算结果值一般小于采用原始数据的计算结果，物理指标变程稍小于强度指标，有可能是物理指标做过平稳化处理的原因。



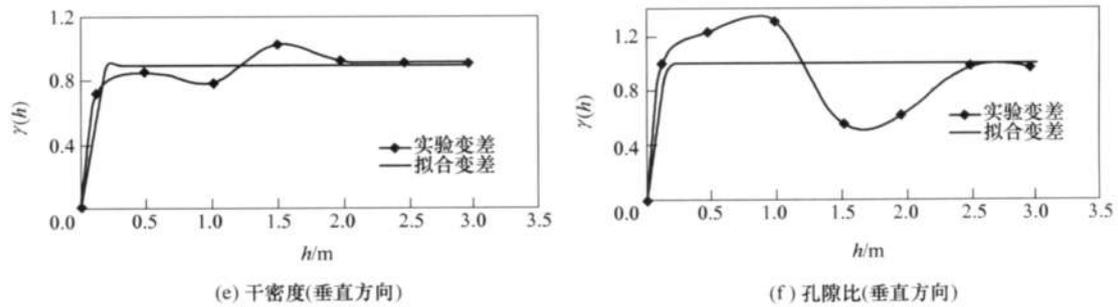


表1 方邱湖堤防7个静力触探试验结构分析成果汇总

部位	参数	方向	变异函数	变程 a/m	基台值 $C(0)^*$	块金值 C_0	相关距离 δ
堤身区	锥尖阻力 q_c	水平	球状模型	40.0	1.00	0	30.00
		竖直	球状模型	0.70	1.20	0	0.53
	摩阻比 n	水平	球状模型	30.00	1.00	0	22.50
		竖直	球状模型	0.70	1.05	0	0.53
		干密度	球状模型	0.20	0.90	0	0.15
孔隙比	球状模型	0.20	1.00	0	0.15		
轻粉质壤土	锥尖阻力 q_c	水平	球状模型	35.00	1.20	0	26.25
		竖直	球状模型	0.70	1.05	0	0.53
	摩阻比 n	水平	球状模型	40.00	1.00	0	30.00
		竖直	球状模型	0.45	0.95	0	0.34
		干密度	球状模型	0.45	1.00	0	0.34
孔隙比	球状模型	0.40	1.00	0	0.30		
砂壤土	锥尖阻力 q_c	水平	球状模型	35.00	0.90	0	26.00
		竖直	球状模型	0.70	1.00	0	0.53
	摩阻比 n	水平	球状模型	35.00	0.80	0	26.00
		竖直	球状模型	0.60	1.00	0	0.45
		干密度	球状模型	0.25	1.00	0	0.19
孔隙比	球状模型	0.20	1.10	0	0.15		
淤泥质黏土	锥尖阻力 q_c	水平	球状模型	40.0	0.90	0	30.00
		竖直	球状模型	0.50	0.95	0	0.38
	摩阻比 n	水平	球状模型	40.0	1.00	0	30.00
		竖直	球状模型	0.75	1.05	0	0.56
		干密度	球状模型	0.40	0.90	0	0.30
孔隙比	球状模型	0.30	1.05	0	0.23		

注：上表提供了相对基台值 $C(0)^*$ ，将变异函数中的基台值做归一化处理，即 $C(0)^* = C(0)/\sigma^2$ 。

5 结语

(1)地质统计学描述距离与变异性的正比关系，而随机场理论则主要描述距离与相关性的反比关系，从本质上讲，二者是一致的。使用地质统计学中求变异函数的方法可较为方便地求得随机场理论中的相关距离。

(2)限制空间变异理论在岩土工程中应用的主要原因是无法进行大样本数试验，导致后期估值及模拟等工作成为“空中楼阁”。本文使用RI型静力触探设备进行了淮河方邱湖大堤的地质勘察，结合地质钻孔取样、标准贯入实验、常规静力触探等手段，验证了RI静力触探设备获取岩土体参数的可靠性，为下一步的空间结构分析及估值和模拟提供了基础依据。

(3)从方邱湖地层空间结构分析结果看,方邱湖各土层顺堤轴线方向变程在30~50m之间,深度方向变程在0.2~0.8m之间,本文的计算结果与众多文献提供的变程范围一致;球状模型可较好模拟土层物理及力学指标空间变异性;物理指标变程稍小于强度指标,有可能是物理指标做过平稳化处理的原因。

致谢:作者对中水淮河勘测设计规划有限公司马东亮教高、王庆苗教高、杨业荣高工,日本SRE株式会社足立和夫、寺尾庸孝在地质勘察中的辛苦工作表示衷心感谢。

参 考 文 献:

- [1] 程强,罗书学,高新强.相关函数计算相关距离的分析探讨[J].岩土力学,2000,21(3):281-283.
- [2] 冷伍明.基础工程可靠度分析与设计理论[M].长沙:中南大学出版社,2000.
- [3] 包承纲,高大钊,张庆华.地基工程可靠度分析方法研究[M].武汉:武汉测绘科技大学出版社,1997.
- [4] Vanmarcke E H, Asce M. Probabilistic of soil profiles [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977: 1227-1246.
- [5] 王建锋.用地质统计学计算土层的相关尺度[J].土木工程学报,2005,38(10):101-107.

A geologic survey and spatial structure analysis of Fang Qiu Hu dike along the Huaihe River

HE Bing-shun¹, WANG Yu-jie², SUN Dong-ya¹

(1. Dept. of Water Hazard Research, IWHR, Beijing 100038, China;

2. Dept. of Geotechnical Engineering, IWHR, Beijing 100048, China)

Abstract: The RI type cone penetration test (CPT) equipment was adopted in a geologic survey at Fang Qiu Hu dike, along the Huaihe River. Sets of data of physical and mechanical parameters of the dyke material were collected. The data were tested by means of the traditional CPT approach and also in indoor test on bored soil, and they were compared and verified. Based on the geostatistics theory, a spatial structure analysis was performed in terms of the cone resistance, sleeve frictional ratio, dry density and void ratio. The result revealed that the spherical model was better to well simulate the spatial variability of the soil in both dike body and dike foundation. The range of soil parameters along the dike axis is 30m to 50m, and the range along the depth direction is about 0.2m to 0.8m. The range of physical parameters is a little smaller than that of the strength parameters, this is in accordance with most references. The result would provide a fundamental basis for future estimation and simulation of soil parameters.

Key words: geologic survey; cone penetration test; range; geostatistics

(责任编辑:吕斌秀)