

岩土性质的空间信息统计分析

邢 君 孙洪泉 李维涛

(河北工业大学土木工程学院, 天津 300130)

【摘 要】 运用地质统计学的原理与方法, 以变差函数为工具, 在工程实测数据的基础上对静止水位进行了分析, 得到不同方向上的实验变差函数及理论变差函数模型, 并提出了一个变异性综合指标, 实现了对岩土性质空间变异性的定量分析。

【关键词】 空间信息统计; 区域化变量; 变差函数; 变异性综合指标

【中图分类号】 TU 44; TU 45; TU 46

Study of Geostatistics on Quality of Rock and Soil

Xing Jun Sun Hongquan Li Weitao

(Civil Engineering Academy, Hebei University of Industry, Tianjin 300130 China)

【Abstract】 Based on the geostatistical theory and method, static water line is analyzed by the tool of variogram. Using the data measured in practical engineering, experimental variogram and theoretic variogram in different directions are obtained, and a synthetic variation index is put forward. The method of quantificational analysis on the data of rock and soil is presented.

【Key words】 geostatistics; regionalized variable; variogram; synthetic variation index

0 引言

岩土体由于在形成和后期改造作用中的局部、不规则和不确定性等多种复杂因素的影响, 其参数表现出不均匀的随机分布特点。同时受岩土形成和后期改造作用中各种宏观规律的控制, 使空间不同点的岩土参数值之间存在某种程度的相关性, 即空间结构性^[1]。在早期岩土工程可靠性分析中, 人们将岩土看作随机介质来处理, 应用经典统计学通常采用的均值、方差、变异系数等参数来表征岩土参数的变化特征, 但这些量只能概括变量某一特性的总体统计特征, 却无法反映其局部变化特征。如方差的大小只能反映所研究的变量在整体上的变化特征, 根本无法回答其局部范围和特定方向上的变化特征。在工程实际中岩土作为具有空间变异性的实体, 不但应注意其全局的性质, 更应注意其局部岩土体的性质, 对这种兼有随机性与结构性的岩土性质的空间变异性进行客观分析是建立正确的空间分布预测模型的基础。地质统计学即空间信息统计学正是研究这种具有二重性的空间变量变化特征的一种有效方法。

本文应用空间信息统计学的基本原理和方法, 借助于变差函数理论提出了一个变异性综合指标。

根据工程实测数据, 对静止水位进行了空间统计分析, 得到了静止水位在不同方向上的变化特征。

1 空间信息统计学原理^[2]

1.1 区域化变量

地质统计学中定义以空间点 x 的三个直角坐标 (x_u, x_v, x_w) 为自变量的随机场 $Z(x_u, x_v, x_w) = Z(x)$ 称为一个区域化变量。区域化变量一般可以反映岩土参数的尺寸效应, 不同程度的连续性和不同种类的异向性以及空间变化的可迁性(相关性随空间距离而变化)等特征。

1.2 变差函数

研究区域化变量空间分布的主要数学工具是变差函数(Variogram), 空间信息统计学中定义变差函数为:

$$\gamma(x, h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] = \frac{1}{2} E[Z(x) - Z(x+h)]^2 - \frac{1}{2} \{E[Z(x) - Z(x+h)]\}^2 \quad (1)$$

根据观测数据构造实验变差函数为:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (2)$$

式中: $[Z(x_i), Z(x_i+h)]$ 为相隔 h 的数据对, $N(h)$ 是数据对的个数。求出实验变差函数后可拟合

理论变差函数模型,最常用的一种是球状模型,公式为:

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

式中: C_0 为块金常数, $C_0 + C$ 为基台值, C 为拱高, a 为变程。凡是岩土参数在某一方向上具有一定的变化连续性,且结构性与随机性在变程之内随空间两点间距离的改变而互为消长的这类变异特征,均能用该方向上的球状模型来定量刻画。

2 变异性综合指标

2.1 构造一个反映变量空间变异程度的综合指标

根据球状模型变差函数的意义,我们可以构造一个反映变量空间变异性的综合指标。球状模型变差函数中 $B = C_0 + C$ (基台值)反映了变量的空间变化幅度,拱高 C 为岩土参数空间结构变化的极大值,块金值 C_0 是由微观结构变化和试验及量测误差所决定的一种随机变化成分,故构造一个指标^[3]

$$\beta = \frac{B}{C} = 1 + C_0/C \quad (4)$$

则 β 反映的是变量的空间连续性, β 值越小变量的连续性越好, β 为量纲一的量。因在相同基台值的条件下 a 值越大则变量的变化速度就越小,且在实际工作中 a 的大小不能绝对的讲,故我们定义 $A = a/a_m$ 来反映变量某一方向上的变化速度,其中 a_m 为各方向变程的平均值,且 A 为量纲一的量。因而 β/A 既能反映区域化变量的空间连续性又能反映其空间变化速度,令 $\tan \alpha = \beta/A$, 则有

$$D_v = \sin^2 \alpha = \frac{\tan^2 \alpha}{1 + \tan^2 \alpha} = \frac{\beta^2}{A^2 + \beta^2} = \frac{B^2}{C^2 A^2 + B^2} \quad (5)$$

式中: D_v 为量纲一的量,且取值范围在 $[0, 1]$ 内,故我们定义 D_v 为反映区域化变量综合变异程度的指标。例如,对随机型的变差函数模型, $a=0$, $D_v=1$, 反映变量完全不存在空间相关性,属纯随机变量;当 $B=0$ 时, $D_v=0$, 则表明变量完全相关;因此, D_v 是一个能反映变量空间变异程度的综合指标, D_v 值越大,则变量的空间变异性越大,相关性越小。

2.2 综合指标比经典统计学中的变异系数 C_v 的优越性

1) D_v 是在综合考虑了变量在不同方向上的连续性、变化速度的基础上构造出来的,反映的是变量的空间变异性,而 C_v 则从纯随机角度研究变量的离散程度,无空间意义。

2) D_v 在 $[0, 1]$ 内变化,越靠近 1 则表明空间变

异程度越大,而 C_v 可大于 1 也可小于 1,取值范围不定。

3) D_v 便于岩土参数空间变异性的分析、对比与分类,为岩土工程勘探网的合理布置以及岩土参数空间最优估计提供了定量依据,而 C_v 主要用于区域化变量原始数据的审议、统计等,以评价岩土参数的稳定性。

3 研究实例

城市地下空间的开发利用,已成为城市建设的重要内容。随着地下空间的大力开发,基础埋深不断加大,水文地质条件越来越复杂,地下水对地下工程的影响变得越难以分析^[3]。地层结构和地下水位变化是影响地面沉降的主要因素,并影响地基土的承载力,土质液化的判断。本文在某施工现场的岩土勘查资料的基础上,通过对 68 个钻孔的静止水位实际监测资料的分析,视静止水位为区域化变量计算出了该静止水位参数在不同方向的实验变差函数并进行球状模型拟合。计算结果及拟合参数值见表 1 和表 2,其 x 、 y 方向实验变差函数曲线及拟合图见图 1、图 2。根据钻孔资料数据绘出施工现场的静止水位等值线图见图 3。

表 1 实验变差函数计算结果表

滞后距 h/m	x 方向		y 方向	
	$N(h)$	$\gamma^*(h)/m^2$	$N(h)$	$\gamma^*(h)/m^2$
30	35	0.100	49	0.044
60	45	0.195	42	0.096
90	50	0.254	29	0.143
120	59	0.247	29	0.153
150	56	0.217	21	0.152
180			3	0.165

表 2 球状模型变差函数参数及变异性综合指标值

方向	块金常数 C_0/m^2	变程 a/m	拱高 C/m^2	变异性综合指标 D_v
x 方向	0.007 7	112	0.251 9	0.575 3
y 方向	0	141	0.16	0.446 0

由计算结果可知,变差函数既是距离的函数又是方向的函数,由变差函数可以得到岩土性质的许多空间信息如下:

1) 变程 a 又称为相关距离或变异速度,反映了岩土参数的影响范围或空间变化的速度。由本文方法计算出的静止水位在 x 方向的相关距离为 112 m, y 方向为 141 m,说明静止水位沿 x 方向的变化速度比 y 方向大。

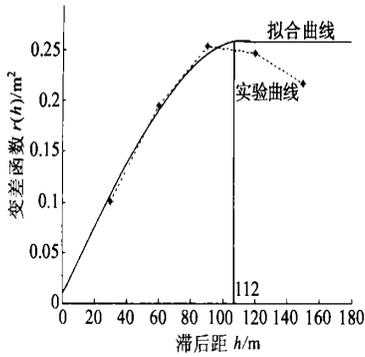


图 1 x 方向静止水位变差函数图

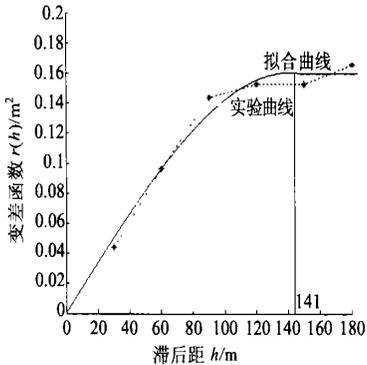


图 2 y 方向静止水位变差函数图

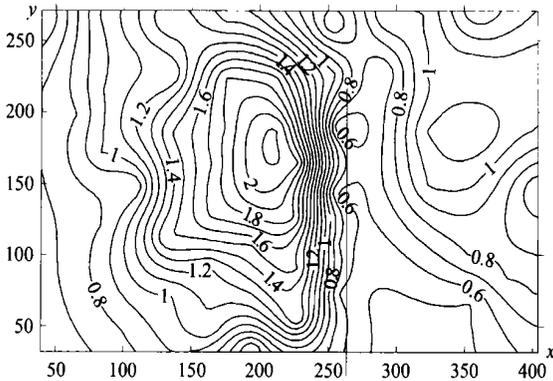


图 3 静止水位等值线图

2) β 反映了变量的空间连续性,本例算得 x 方向 β 值为 1.03, y 方向为 1,可见 x 方向不如 y 方向的连续性好。

3) 基台值 $C_0 + C$ 反映了区域化变量在一定方向上变化幅度的大小,本例算出的 x 方向基台值为 0.259 6, y 方向为 0.16,说明静止水位在 x 方向变化幅度大于 y 方向。

4) 由不同方向的变差函数图还可以反映岩土性质的各向异性^[4],根据变程和基台值的不同情况又分为几何各向异性和带状各向异性。本例研究的静

止水位在该区域内的分布属变程和基台值均不相同的带状各向异性。

5) 以上各参数分别从不同角度定性反映了岩土性质的空间变化特征,最后我们可以通过变异性综合指标来定量表示岩土性质的空间变异性。由本文计算变异性综合指标的方法计算出两个方向的 D_v 值分别为: $D_v(x) = 0.575 3$, $D_v(y) = 0.446 0$; 由此表明,静止水位在空间上的分布确实存在二重性,且 x 方向静止水位空间变异性较 y 方向大。

6) 由静止水位等值线图可以看出: x 方向水位变化较 y 方向剧烈,尤其是 x 方向中间部位的等值线较密,说明中间部位静止水位的变化较陡;等值线沿 y 方向的变化较疏,说明 y 方向的静止水位的变化较缓。这种现象与本文给出的变异性综合指标和变差函数参数所反映的情况完全一致,即 x 方向静止水位空间变异性较大, y 方向静止水位空间变异性较小。

4 结 论

1) 岩土性质具有结构性和随机性,而空间信息统计学是研究具有二重性的空间变量变化特征的有力工具,因此用空间信息统计学方法分析岩土性质的空间变化特征是一种切合实际的有效方法。

2) 本文应用空间信息统计学的原理与方法,通过实例计算静止水位的变差函数,清楚地反映了其空间变化特征,提出了一个变异性综合指标,对静止水位在空间不同方向上的变异性进行了定量分析。

3) 在岩土工程勘察与设计,许多岩土参数可以看作是区域化变量,例如土的孔隙比、塑性指数、压缩模量、抗剪强度等,而本文的方法也适用于对这些参数进行空间变异性分析。

参 考 文 献

- 1 张征,刘淑春,邹正盛. 岩土参数的变异性及其评价方法. 土木工程学报,1995,28(6):43~51
- 2 孙洪泉. 地质统计学及其应. 徐州:中国矿业大学出版社,1990. 31~95
- 3 张征,鞠硕华,刘淑春. 地下水环境模拟中多元信息空间最优估计原理与方法. 工程勘察,2000 (3):12~15
- 4 谭文辉,王家臣,周汝弟. 岩体强度参数空间变异性分析. 岩石力学与工程学报,1999,18(5):546~549

收稿日期:2003-09-26