

码头岸坡土体相关距离的求解

许 英¹, 莫建兵², 黄燕辉²

(1. 江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212003; 2. 镇江市工程勘测设计研究院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 码头岸坡多为天然土层沉积而成, 土体参数具有空间变异性, 应用随机场理论可以实现土性参数的点变异性到空间变异性的转化。土性参数随机场是一个平稳随机场, 相关距离是描述土性参数随机场的一个重要指标。基于随机场理论, 利用静力触探曲线数据按相关函数法拟合求解了码头岸坡土体的相关距离, 为今后开展码头岸坡的可靠度研究打下基础。

关键词: 码头岸坡; 随机场; 相关距离

中图分类号: TU 433

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)09-0048-04

Solution of soil's correlation distance of wharf bank slope

XU Ying¹, MO Jian-bing², HUANG Yan-hui²

(1. School of Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;

2. Zhenjiang Engineering Survey and Design Institute, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Wharf slopes are often formed by the natural soil sedimentation. Soil parameters are space-variable, and the soil localized point variability can be changed to spatial variability based on the random field theory. The soil character random field is a stationary random field, and correlation distance is an important parameter which can reflect characteristics of the field. Based on the random field theory, CPT data has been used, then according to the relevant function method, the correlation distance of wharves soil is fitted and solved, and the work lays a foundation for the reliability study on the wharf slopes.

Keywords: wharf bank slope; random field; correlation distance

码头岸坡一般多为天然的沉积土层, 土体参数与其所在的空间位置有关, 土与人工材料不同, 具有明显的离散性, 并且在一定范围内土体参数具有空间相关性。土体参数的空间相关性是由一定范围内相似的成土矿物、沉积条件以及应力历史等多种因素决定的, 不同位置处的土体参数存在着不同程度的差异, 而且这种差异是逐渐变化的^[1]。同一土层中, 某点的特性与其附近的土体特性常常是相关的, 而并非完全独立, 目前常用的数理统计方法往往忽略了土体的这种自相

关性, 对方差的估算偏大。土性参数的自相关性随着距离的增大逐渐减小, 超过一定距离后便可视为相互独立, 土层中任意两个互不相关的最小距离就是土层的相关距离 δ 。若能确定出描述研究区域内土体参数相关性的相关距离, 进一步根据可靠度分析法中的随机场理论, 利用方差折减函数实现对土体“点”方差统计参数的折减, 得到土体的空间统计参数, 这对今后开展码头岸坡土体可靠度等问题的研究将起到十分重要的作用。

收稿日期: 2015-01-13

作者简介: 许英 (1976—), 女, 博士, 副教授, 从事港口航道工程及可靠度研究。

1 土性参数随机场理论

1.1 描述土性随机场的基本参数

Vanmarcke 于 1977 年建立了土体随机场模型, 该模型能很好地描述土性参数的自相关性。该理论的核心思想是用一个方差折减函数 $\Gamma^2(h)$ 把土体的“点”变异性转化为空间变异性, 而该方差折减函数 $\Gamma^2(h)$ 取决于土体的自相关距离。由此土体的相关距离、均值和方差就构成了描述土性随机场模型的 3 个基本参数。

1.2 土性参数的随机场模型

目前对于土体参数的测定, 除采用静力触探等少数原位试验能得到较为连续的值外, 一般都是通过选取若干个试样加以测定, 因此这些参数只能作为土体的“点”特性, 而即便是由静力触探的连续测试值, 采用常规的概率统计方法计算得到的依旧是“点”特征值, 而非真正意义上的土的空间平均特性, 随机场模型正是弥补了这种资料的缺乏^[2]。Vanmarcke 提出的土性随机场模型, 其实质是用齐次正态随机场对土层剖面加以模拟, 利用随机场的数字特征来描述土体的空间变异性。

闫澎旺等对大量静力触探试验数据进行了验证, 证明了土体去除趋势分量后锥尖阻力和侧摩阻力随深度方向的平稳性和各态历经性^[3], 为土体随机场模型的应用提供了事实依据。李镜培等曾对土体的各项物理力学性质指标进行了统计分析, 得出土体的 c 、 ϕ 强度指标都近似服从正态分布或对数正态分布规律^[1,4]。因此土体参数随机场可视为正态随机过程。

2 土性参数自相关性

2.1 相关距离的定义

土体自相关距离是反映土性参数空间差异性的一个客观指标。对于土体空间中的任意两点, 距离越近, 参数之间的相关性就越大; 反之, 距离越远, 相关性越小。Vanmarcke^[5] 提出, 若存在式(1)的关系, 则 δ 称为土性的相关距离。

$$\lim_{h \rightarrow \infty} h \Gamma^2(h) = 2 \lim_{h \rightarrow \infty} \int_0^h \left(1 - \frac{\Delta z_0}{h}\right) \rho(\Delta z) d(\Delta z) = 2 \int_0^h \rho(\Delta z) d(\Delta z) = \delta \quad (1)$$

式中: h 为土体空间的平均范围; $\rho(\Delta z)$ 为相关函数; $\Gamma^2(h)$ 为方差折减函数, 且有如下性质: 1) $\Gamma^2(0) = 1$; 2) 当 $h \geq 0$ 时, $0 \leq \Gamma^2(h) \leq 1$; 3) $\Gamma^2(-h) = \Gamma^2(h)$ 。

当 h 充分大时, 有 $\Gamma^2(h) \approx \frac{\delta}{h}$, 因此 Vanmarcke 建议方差折减函数 $\Gamma^2(h)$ 采用如下形式^[5]:

$$\Gamma^2(h) = \begin{cases} 1 & (h \leq \delta) \\ \delta/h & (h > \delta) \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可见, 相关距离 δ 是描述土体参数自相关特性的一个重要指标, 因此只要能够求出土性参数的相关距离 δ , 就可以通过式(2)求出方差折减函数 $\Gamma^2(h)$, 再借助 $\Gamma^2(h)$ 将土性参数的“点”变异性与空间变异性相联系, 最终实现从点方差到空间平均方差的过渡^[6]。

2.2 相关距离的求解

目前对土性相关距离的求解方法有以下几种: 空间递推平均法、相关函数法、变异函数法、平均零跨距法以及统计模拟法等。每种方法都有各自的特点并且有一定的适用条件, 其中应用较广泛的是空间递推法平均法和相关函数法。

2.2.1 空间递推法^[7]

该方法通过方差折减函数 $\Gamma^2(h)$ 来求解相关距离。根据相关距离的定义, 将参数 h 取为实际取样间距的倍数, 即:

$$h = i \Delta z_0 \quad (3)$$

则

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

而

$$\Gamma^2(i) = \frac{\text{var}(i)}{\sigma^2} \quad (5)$$

式中: $\text{var}(i)$ 是空间均值的方差; σ^2 为点方差。

当 h 充分大时, δ 趋于一常数, 在 $\Gamma(i)$ 与 i 的关系曲线上表现为: 当 i 取某一值后, $\Gamma(i)$ 的值将趋于平稳, 找出使 $\Gamma(i)$ 趋于平稳的临界点, 用该点作为计算点, 利用式(4)求出相关距离。

2.2.2 相关函数法^[2]

该方法是通过相关函数 $\rho(\Delta z)$ 求解相关距离。根据相关距离和方差折减函数的定义, 若能确定相

关函数的形式，就可由式(1)积分求出相关距离。常用的理论相关函数有指数型、三角型、指数余弦型等，其函数形式和相应的相关距离公式列于表 1^[8]。

表 1 相关函数类型及其相关距离		
函数形式	相关函数 $\rho(\tau)$	相关距离 δ
单指数	$e^{- \tau /a}$	$2a$
双指数	$e^{-(\tau/b)^2}$	$\sqrt{\pi}b$
指数余弦	$e^{- \tau /c} \cos(\tau /c)$	C
三角型	$e^{- \tau /d} [1 + \tau /d]$	$4d$

相关函数法求解相关距离的步骤如下：

1) 将原始数据标准化处理。将由试验测得的原始数据 X_{0i} 按式(6)标准化后作为样本值 X_i ：

$$X_i = \frac{X_{0i} - \mu}{\sigma} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中： μ 、 σ 分别为原始数据的均值和标准差。标准化后，样本的均值变为 0，标准差为 1。

2) 取间距 $\tau_1 = \Delta z_0$ ， Δz_0 为取样间距，按式(7)计算出相关函数值：

$$\rho_x(\tau_1) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} X_i \cdot X_{i+1} \quad (7)$$

3) 分别取间距 $\tau_2 = 2\tau_1$ ， $\tau_3 = 3\tau_1$ ， $\dots$ ， $\tau_m = m\tau_1$ ， $\dots$ ($m < n$)，按式(7)分别计算出对应的相关函数值。

4) 根据计算结果绘制实测相关函数曲线，选择合适的理论相关函数对实测曲线进行拟合，将拟合得到的参数代入相应的计算公式即可计算出土体的相关距离。

3 工程应用

某码头岸坡由多层土组成，第 1 层为淤泥质黏土，第 2 层为粉砂，第 3 层为亚黏土，土层的分布见图 1。

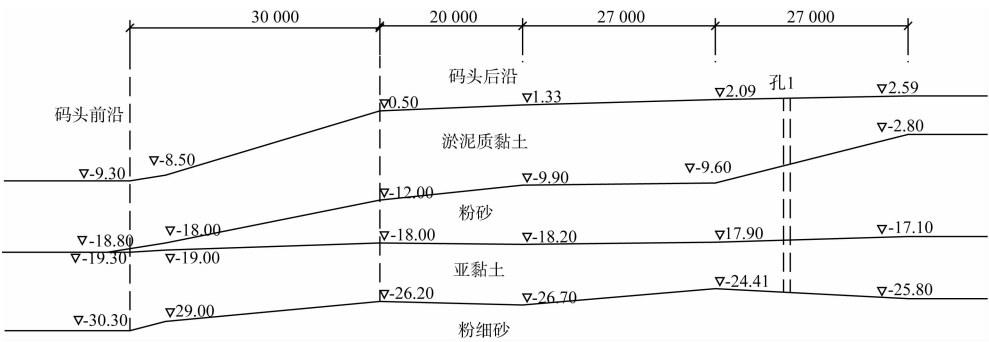


图 1 某码头土层分布 (高程：m，尺寸：mm)

对场地上勘探时的钻探孔位置选取了 15 个静力触探孔，取样间距为 15 cm。对这些探孔静力触探曲线的侧摩阻力进行统计，根据相关函数法计算 3 个土层的自相关距离。实测自相关函数的计算公式(7)是一个近似计算公式，统计学中认为公式计算要求较大数量的 $m = n - i$ 值，通常可取 m 为 $(15 \sim 12)n^{[9]}$ 。实际计算时发现相关函数曲线末端实测数据波动较大，对最终的判定意义不大，因此采用样本总数的 1/4 加以拟合计算。以孔 1 为例，岸坡的第 1 层土厚度为 9.91 m，样本总数为 66 个，第 2 层土厚 9.42 m，样本总数 63 个，第 3 层土厚 6.63 m，样本总数 44 个，对这 3 层土均采用前 15 个样本值进行计算。对各土层去除趋势分量后的静力触探侧阻力进行分析，先将样本观测值做标准化处理得到各土层的样本

值，然后按步骤拟合得到各层土的相关函数及相关距离，各土层实测自相关函数曲线见图 2。第 1 层淤泥质黏土符合单指数型相关函数的特征 (图 2a))，拟合得到该层土的相关距离为 1.59 m；第 2 层和第 3 层土实测曲线前段近似呈直线分布 (图 2b)、c))，与三角型自相关函数的特征较为接近，经计算得到土层的相关距离分别为 0.362、0.833 m。

对计算结果进行分析，发现实测自相关函数曲线 (侧摩阻力) 的前半段与理论计算值相似度较高，且随深度的增大均逐渐趋于零，而曲线的后半段数据不稳定，在曲线末端出现异常点，这是因为在后半段随计算数据间距的变大，计算精度大大降低。实际计算时前几个点的精度较高，拟合时这几个点不应有较大的偏差。

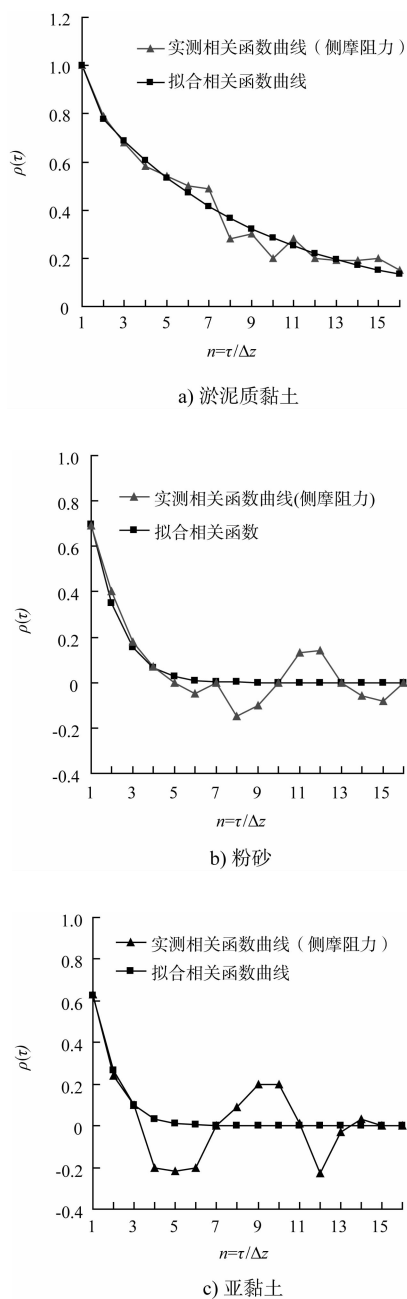


图 2 自相关函数模拟结果

类似地对其余 14 个孔的静力触探曲线数据进行处理得到侧摩阻力统计值，按照相关函数法求得 3 个土层的自相关距离，最终可求出该码头岸坡土体相关距离的均值及变异系数，统计结果见表 2。

表 2 各土层相关距离的统计结果				
土层名称	样本数量	相关距离 δ/m		变异系数
		变化范围	均值	
①淤泥质黏土	15	1.025 ~ 0.976	1.589	0.238
②粉砂	15	0.248 ~ 0.557	0.390	0.137
③亚黏土	15	0.437 ~ 0.159	0.826	0.166

4 结论

对于类似码头岸坡这种天然沉积的土层，土体参数随空间变化，土体的点特征值无法体现土体参数性质的空间变异性，运用土体参数的随机场理论可以将土体的点变异特性转化为空间变异特性，而最关键的是确定相关距离。

利用码头岸坡土体的静力触探曲线数据，按相关函数法拟合了各个土层的相关距离，对数据拟合后发现，实测自相关函数的曲线后半段数据正负振荡剧烈，曲线的前半段有规律地变化，最终随距离的增大计算值趋于零，所以对曲线的前半段进行拟合得到的相关函数较为可靠，由此可得土体的相关距离。相关距离的求解为今后开展码头岸坡问题的可靠性研究打下基础。

参考文献:

[1] 许英,高华峰,牛志国. 土体参数随机场模型下边坡稳定可靠性分析[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2009(10): 37-40.

[2] 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(5): 509-511.

[3] 阎澍旺,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.

[4] 李镜培,高大钊. 土性指标的变异特性研究[J]. 中国港湾建设, 2001(12): 26-29.

[5] Vanmarcke E H. Probabilistic modeling of soil profiles [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1977, 103: 1 227-1 246.

[6] Kont O R. Random field modeling of foundation failure modes [J]. Geotechnical Engineering: ASCE, 1990, 116(4): 554-570.

[7] 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): 85-89.

[8] 程强,罗书学,高新强. 相关函数法计算相关距离的分析探讨[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 281-283.

[9] 汪荣鑫. 随机过程[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.

(本文编辑 武亚庆)