维普资讯 http://www.cqvip.com

土性指标的变异特性研究

李镜培，高大钊

（同济大学，上海 200092）

摘 要：本研究以实际工程的勘察测试资料为依据，采用概率统计与随机过程理论，分析计算了地基土抗剪强度指标 c、ϕ 和静力触探比贯入阻力 p_s 等土性指标的均值、变异系数和相关距离等概率特征值，既是对土性指标本身的一种深入的探索，也为岩土工程的可靠性分析研究以及地基基础的设计分项系数确定提供必需的技术参数。

关键词：土性指标；均值；变异系数；相关距离

中图分类号：TU470.2 **文献标识码**：A **文章编号**：1003-3688(2001)06-0026-04

Study of Variable Behavior of Soil Index

LI Jing-pei, GAO Da-zhao

(Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: On the basis of field investigation and test data, the probabilistic characteristic values such as the average value, variable coefficient, relative distance of the shear strength index, c, ϕ, and specific penetration resistance p_s of static penetration tests of soil are analyzed and calculated with the probability statistics and random process theory. The study is not only a deeper exploration into the soil index itself, but also provides necessary technical parameters for the reliability analysis of geotechnical engineering and the determination of partial factors in foundation designs.

Key words: soil index; average value; variable coefficient; relative distance

1 前言

土性指标概率特征参数的确定是岩土工程可靠度分析的基础，也是确定地基基础设计分项系数的主要技术参数之一，对其作出更深入的分析研究非常必要。从以往的研究文献来看，目前我国对土性指标概率特征进行系统研究的非常少，有些研究只是对某一二个场地的土性指标进行了分析，而更多的研究文献则采用假定的土性指标概率特征进行可靠性计算。有鉴于此，本研究将在广泛收集上海地区工程地质勘察资料的基础上，对各工程场地的抗剪强度指标 c、ϕ 值进行概率特征分析和空间相关性分析，包括土性参数的均值、变异系数和自相关的相关距离等概率特征值的统计计算，为进一步开展岩土工程的可靠性分析研究及地基基础的设计分项系数确定提供必备的技术基础。

2 资料收集与初步整理

2.1 资料收集的原则和内容

资料收集以实际工程场地为目标，兼顾工程场地在各地质区域的充分代表性。为使分析参数在统计上具有足够的代表性，参与统计分析的工程场地数量不能太少。为此，本次统计中对一般建筑类工程共收集了 40 个工程场地的勘察资料，且各场地的分布范围也较广。

参数统计的目标总体是地基土中的土层，土层的划分以上海地基基础设计规范中规定的典型土

收稿日期：2001-07-11

作者简介：李镜培（1963-），男，工学博士、同济大学地下建筑与工程系副教授。

维普资讯 http://www.cqvip.com

层表为依据。考虑到目前勘察设计工作的现状，抗剪强度指标 c、ϕ 的数据收集以直剪试验的固结快剪结果为主，包括的土层有：第②层褐黄色粘性土；第③$_1$层砂质粉土；第③层灰色淤泥质粉质粘土；第④层灰色淤泥质粘土。在一个工程场地中，对每个与上述相关的土层，主要收集每个钻孔内各土样的直剪试验 $\tau\sim p$ 试验值和试验报告提供的 c 值和 ϕ 值，附带收集重度、含水量、孔隙比、液限、塑性指数和液性指数等物理指标。

静力触探资料采用单桥探头的测试结果，主要包括每一场地内所有静力触探孔的沿全深度的静力触探曲线和勘察报告中提供的分层比贯入阻力的建议均值等。本阶段收集的有静力触探资料的工程场地有40个，用于计算相关距离的静力触探曲线共有97条。

2.2 资料的初步整理

由于试验报告提供的 c 值和 ϕ 值带有许多经验处理因素，难于直接用他们来分析场地参数的变异性，故应该采用收集的每个钻孔内各土样的直剪试验原始数据进行分析，即用最小二乘法对每个钻孔内各土样的直剪试验 $\tau\sim p$ 试验值进行回归统计，得出其 c 值和 ϕ 值，供进一步的概率统计分析使用。

对于静力触探曲线，除了要统计其均值和变异系数外，还要用来分析地基土参数的空间变异性，因此首先应将静力触探曲线数字化。采用曲线数字化程序将每一条静力触探曲线离散成对应深度的值存入数据文件中备用(对采用数据文件形式存放的原始数据可不作此离散化工作)，考虑到计算分析的需要并兼顾数据的真实性，离散时深度方向采用的间距为0.1m。

3 土性参数概率统计分析

3.1 抗剪强度指标 c、ϕ 的均值分析

在一个工程场地内，对同一土层不同土样的 c、ϕ 值(直剪试验 $\tau\sim p$ 试验数据回归值)进行平均值统计计算，得出本土层 c、ϕ 值的统计平均值 m_c 和 m_ϕ。在勘察报告中，对每一土层一般都提供一个 c、ϕ 的平均值，在此称其为“报告均值 c”和“报告均值 ϕ”。将场地 c、ϕ 指标的统计平均值 m_c 和 m_ϕ 与勘察报告提供的平均值进行比较，可以得出二者之间在数值上的分布规律。表1列出了各土层内聚力的统计平均值 m_c 与勘察报告均值 c 的比值 m_c/c 及内摩擦角的统计平均值 m_ϕ 与勘察报告均值 ϕ 的比值 m_ϕ/ϕ 在统计场地范围内的均值和变异系数，并进一步求出了 m_c/c、m_ϕ/ϕ 值的均值在置信概率为95%时的置信区间。

表1 各层土 c、ϕ 值的统计均值与试验报告均值的对比分析

土层编号	场地子样数	m_c/c 值的统计特征			m_ϕ/ϕ 值的统计特征			m_c/c 的均值置信区间	m_ϕ/ϕ 的均值置信区间
		均值	标准差	变异系数	均值	标准差	变异系数		
②层	31	1.02	0.20	0.20	0.98	0.07	0.07	(0.93、1.11)	(0.95、1.01)
③$_1$层	8	1.61	0.51	0.31	0.95	0.05	0.05	(1.20、2.02)	(0.91、0.99)
③层	18	1.08	0.26	0.24	0.99	0.09	0.09	(0.95、1.20)	(0.95、1.03)
④层	36	0.97	0.18	0.19	1.03	0.11	0.10	(0.90、1.05)	(0.95、1.10)

从上述统计分析结果可以得出如下结论：除③$_1$层砂质粉土夹粘土层外，其余各土层 c、ϕ 值的统计平均值与试验报告中提供的土层 c、ϕ 值平均值在统计意义上的趋势非常接近，m_c/c、m_ϕ/ϕ 值的平均值都在1.0左右，而且 m_c/c、m_ϕ/ϕ 值的数据离散性也很小，在置信概率为95%的条件下，其均值的置信区间一般在0.97~1.08。因此，在可靠性分析计算中，对这些土层的 c、ϕ 指标统计平均值 m_c 和 m_ϕ 可以取用试验报告中提供的土层 c、ϕ 指标平均值。

对③$_1$层砂质粉土夹粘土层来说，内摩擦角 ϕ 的统计平均值分布规律与上述情况相同，即其统计平均值也可以取用试验报告中提供的土层 ϕ 值平均值。但这层土的内聚力 c 的统计均值 m_c 普遍大于试验报告提供的平均值，即 m_c/c 值的平均值为1.61，远大于1.0。这可能与这层土被定名为砂质粉土而导致在试验报告中提供试验结果时产生人为压低 c 值的倾向。

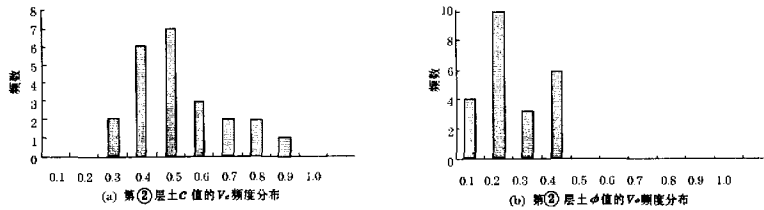
维普资讯 http://www.cqvip.com

3.2 抗剪强度指标 c、ϕ 的变异性分析

以工程场地为目标总体，以各土层土样直剪试验测得的 $\tau\sim p$ 试验数据经回归统计得到的 c、ϕ 值为统计子样，对同一场地内各土层 c、ϕ 值的标准差 S 和变异系数 V 进行计算，并将求得的不同工程场地的土层 c、ϕ 值变异系数列于表 2。总的来说，土层 c、ϕ 值的变异性与土层有关，从平均趋势来看，第③$_1$ 层土 c 值的变异性最大而 ϕ 值的变异性最小，其变异系数的均值分别为 0.49 和 0.11；第④层土 c 值的变异性最小而 ϕ 值的变异性最大，其变异系数的均值分别为 0.38 和 0.28。在同一类土层中，c、ϕ 值的变异性之间也有差别，c 值的变异系数要明显大于 ϕ 值的变异系数。通过统计检验可以得出，第④层灰色淤泥质粘土层的 c、ϕ 值变异系数可认为符合正态分布，其余土层的 c、ϕ 值变异系数符合对数正态分布，如图 1～图 4 所示。

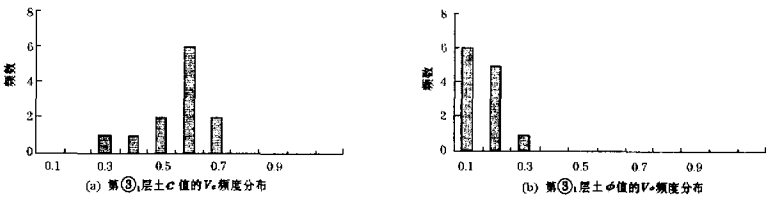
表 2 各土层抗剪强度指标 c、ϕ 的变异系数 V 的统计结果

土层编号	场地子样数	c 的变异系数统计特征			ϕ 的变异系数统计特征		
		均值	标准差	置信区间	均值	标准差	置信区间
②层	23	0.48	0.156	(0.42,0.55)	0.20	0.114	(0.16,0.25)
③$_1$层	12	0.49	0.110	(0.42,0.56)	0.11	0.075	(0.07,0.15)
③层	20	0.44	0.174	(0.36,0.52)	0.20	0.077	(0.16,0.24)
④层	22	0.38	0.112	(0.33,0.42)	0.28	0.118	(0.23,0.33)



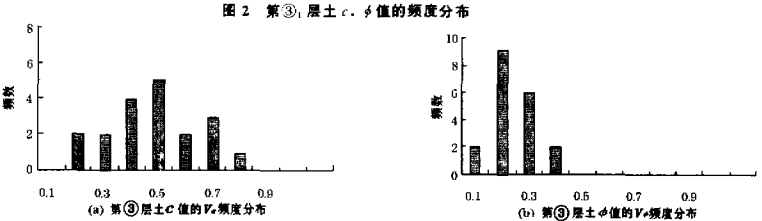
(a) 第②层土 C 值的 V_c 频度分布　(b) 第② 层土 ϕ 值的 V_ϕ 频度分布

图 1 第②层土 c、ϕ 值的频度分布



(a) 第③$_1$层土 C 值的 V_c 频度分布　(b) 第③$_1$层土 ϕ 值的 V_ϕ 频度分布

图 2 第③$_1$层土 c、ϕ 值的频度分布



(a) 第③层土 C 值的 V_c 频度分布　(b) 第③层土 ϕ 值的 V_ϕ 频度分布

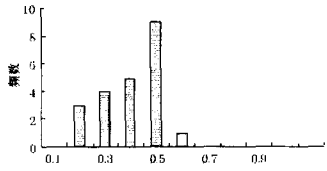
图 3 第③层土 c、ϕ 值的频度分布

4 土性参数自相关特性分析

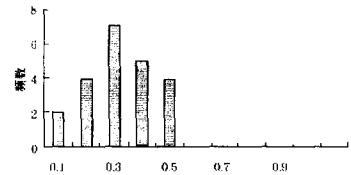
4.1 土性指标的空间相关性

岩土工程问题常常与地基土的空间平均土性相联系，如土坡的稳定性主要依赖于滑动面的平均强度；基础的沉降取决于基础底面以下土体的平均体积压缩性；浅基础的承载力是一定影响深度范围内土层平均抗剪强度的作用效果；桩基础的承载力（不包括桩身结构强度破坏模式）则与桩身范围内各土层侧摩阻力的平均贡献及桩尖下一定范围内的土层平均强度有关等。由于地基土中点与点之间

维普资讯 http://www.cqvip.com



(a) 第④层土 c 值的 V_a 频度分布



(b) 第④层土 ϕ 值的 V_a 频度分布

图4 第④层土 c、ϕ 值的频度分布

在土的矿物成份、沉积环境条件、应力历史等方面存在差别，使地基土中点与点之间的土性均不同程度地存在一定差异，但这种差异是渐变性的。在同一土层中，某点的土性与其附近点的土性常常是相关的而不是独立的，这种相关性随着两点间距离的增大而逐渐减弱，到一定程度后便可认为它们之间是独立的。定义土层中任意两个互不相关数据点的最小距离为土层相关距离 δ，在这个相关距离内土性指标可看成是相关的，在这个相关距离以外土性指标则可看成是相互独立的。目前对土性参数的测定除静力触探等少数试验法具有连续测定值外，一般都是通过取若干试样来完成，所反映的也只是土层中少数几个点的“点”特性，若以此作为基本数据进行统计，求得的只是“点”的均值或“点”的方差等概率变量特征值。即使像静力触探试验那样有连续测定值的试验结果，用一般的概率变量统计方法所得到的仍然是“点”性质的结果，难以反映土层所具有的空间平均特性。在本研究中，采用基于随机场理论的自相关分析方法，用土层相关距离 δ 来建立土层的空间平均特性与“点”的特性之间的联系，可以较好地解决这一问题。

4.2 相关距离 δ 值的确定原则

对“统计上均匀”的土层，土层参数 X 在 $[t, t+h]$ 范围内的空间均值为

$$X_h(t)=\frac{1}{h}\int_t^{t+h}X(t)\mathrm{d}t$$

而均值方差为

$$\mathrm{Var}[X_h(t)]=\sigma^2\frac{1}{h}\int_{-h}^{h}\left(1-\frac{\tau}{h}\right)\rho(\tau)\mathrm{d}\tau$$
$$=\sigma^2\Gamma^2(h)$$

式中 σ^2 为 X 的点方差；$\rho(\tau)$ 为相关函数，$\Gamma^2(h)$ 为方差折减函数。当 h 充分大时，方差折减函数 $\Gamma^2(h)$ 可以用下式近似表示

$$\Gamma^2(h)=\begin{cases}1 & 0<h\leqslant\delta\\ \dfrac{\delta}{h} & h>\delta\end{cases}$$

这里的 δ 即为土性参数的相关距离。土性参数相关距离 δ 拟采用静力触探曲线的等间距（间距为 ΔZ_0）离散化数据来确定、确定的方法分别有空间递推平均法和相关函数法。

在具体求解相关距离 δ 值时按如下原则确定：

采用空间递推平均法求解时，理论上 n 增大到一定程度后 δ_n 将趋于平稳，出现一个相对稳定值的数值，但实际计算中的数据并不完全符合理论假定的相关关系，加上分层统计使计算数据常常不足，导致计算过程中 δ_n 很难达到一个稳定的数值，给相关距离 δ 的确定带来一定的困难。通常实际计算中的 δ_n 最大值与 δ_n 的理论稳定值比较接近，故在实际计算中可取 δ_n 的最大值为相关距离 δ 值。

采用相关函数法求解时，通常计算出的相关系数值在 ΔZ 较大时表现出较强烈的振荡，使这段范围内的相关函数拟合非常困难，这可能是 ΔZ 的增大导致统计子样不足的原因。在 $\rho(\tau)=0$ 以前，给定的指数型相关函数或指数余弦型相关函数均能较好地拟合相关系数的计算数据，故可以取 $\rho(\tau)=0$ 以前的相关系数的计算数据进行相关函数的拟合，并由此定出相关距离 δ 值。

4.3 关于使土层“统计上均匀”的处理方法

各土层 p_i 值沿深度一般都有一个平均变化的趋势，这与随机平稳过程的假设不符。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 p_{ij} 进行拟合，设拟合方程为 $p_i(h_i)=A\cdot h_i+B$，则计算新的数据子样 $p'_{ij}=p_{ij}-p_i(h_i)$，并将其作为计算该土层相关距离 δ 值的子样数据。

在实际计算中，发现有的土层的趋势分量并不

（下转第38页）

维普资讯 http://www.cqvip.com

4 基本结论

(1)本文先对典型状态的航道和波浪作用的全场波能分布概化为回折反射区(D_a)、回折绕射区(D_M)和回折入射区(D_n),并称该波动为焦散线绕射模式;

(2)按着对各种入射角条件下的平底绕射理论解作了分析,确定了堤前绕射比波高最大值 K_{max} 为一入射角 α_i 的不变量;且相应地有 $D_M-D_{M'}-D_{di}$ 分区;

(3)而后对(2)引入了缓坡 δ 的折射效应;

(4)最终主要考虑回折绕射与单堤绕射的分区类似以及焦散线的虚拟性,获得航道近域最大比波高控制上限是所在位置的缓坡折射比波高的 2.34 倍。

(5)所获结论符合国内大量计算实际。

参考文献:

[1] Radder A C. On the parabolic equation method for water-wave propagation[J]. J. F. M.,1979,95:159-176.

[2] 吴达开. 航道对波浪作用机理的探讨[R]. 天津港湾工程研究所,2000,12.

[3] 左其华,杨正己. 航槽对不同入射角波浪传播的影响[J]. 水运工程,1966(1):1-8.

[4] Penny W G,Price A T. Diffraction of sea waves by breakwater Artifical Harbour[J]. Dire Misc Weapon Tech. His.,1944,66.

[5] Takayama T,Kamiyama Y. Diffraction of sea waves by rigid or cushion type breakwaters[J]. Report of The Port and Harbaur Research Institite,1977,16(3):1-37.

[6] Daemrich K F,Kohlhase S. Partanscky H W. Investigotion of Mach-Reflection including Breaking and Irregular Waves[C]. Proc. confon C. P. E. D. C. 1983.

(上接第 29 页)

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,给后面相关距离的计算带来新的误差。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 0.9 时,可认为其趋势分量不明显,不必进行平稳化处理。

从计算结果来看,作过平稳化处理消除了趋势分量影响后的相关距离计算结果值一般小于采用原始数据的计算结果。

4.4 场地土性参数相关距离的计算及其地区代表值的确定

对收集的上海地区 40 个工程场地的静力触探资料进行分析整理并计算出每个静探孔中各层土的相关距离 δ 值,计算结果列于表 3。从计算结果的平均趋势来看,第④层土和第⑤$_2$ 层土的相关距离 δ 值的平均值最大,而第②层土的相关距离 δ 值的平均值最小。从安全角度考虑,相关距离 δ 的代表值应取一定置信度下的上限值,即可取显著性水平 $\alpha=0.05$(置信概率 95%)的单侧上限值:

$$\delta_u = \bar{\delta} + t_{0.05}(n-1)\cdot\sigma$$

由此确定的各土层土性参数相关距离 δ 值的代表值也列于表 3。

表 3 典型土层相关距离 δ 计算表

土层名称	子样数	相关距离 δ 值的统计特征		相关距离 δ
		均值	标准差	置信上限 值的建议值
褐黄色粘性土	75	0.23	0.05	0.38 0.40
灰色淤泥质粉质粘土	76	0.38	0.16	0.65 0.70
灰色淤泥质粘土	73	0.68	0.21	1.15 1.20
灰色粘土	82	0.43	0.15	0.68 0.70
灰色砂质粉土	78	0.66	0.29	1.14 1.20
暗绿色粘土	55	0.37	0.09	0.52 0.50
草黄色砂质粉土	52	0.29	0.09	0.45 0.50
灰色粉细砂	31	0.37	0.12	0.57 0.60

5 结论

本文针对收集到的工程地质勘察资料,对各工程场地的抗剪强度指标 c、ϕ 值进行了均值与方差分析,并对各工程场地的静力触探 p_s 值的自相关距离进行了计算,分别得出了各典型土层 c、ϕ 值变异系数的建议代表值和土性参数相关距离 δ 值的建议代表值,可作为今后进一步开展地基基础的可靠性分析研究及有关规范修订中的分项系数确定工作提供必备的技术基础。

参考文献:

[1] DGJ08-11-1999,地基基础设计规范[S].

[2] 高大钊. 土力学可靠性原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1990.

[3] 李镜培,高大钊. 桩基承载力参数估计的随机场模型[J]. 岩土工程师,1992,5(2):1-6.

[4] 袁聚云,李镜培等. 工程实践中土的抗剪强度应用[J]. 大坝观测与土工测试,1997,2(1):12-15.