

46. 应用数理统计方法确定海洋土的工程特性

顾小芸 (中国科学院力学研究所)

土的工程性质极为复杂。其复杂性不仅表现在与连续体材料不同，而且还表现在变异性，后者使判断土的工程特性变得相当困难。变异性和土在地质年代中的形成条件以及土的不均质性有关，扰动性又增加了这种变异性。

变异性的存在要求在工程地点增加原状采样的数量和土性试验的重复次数，以获得平均值来确定土性参数。但是，海上钻取原状土样的费用昂贵，取样数量有限，而近海海底经常遇到的三角洲或滨海相沉积层中，颗粒组分变化频繁，变异性尤为显著；再加上原状土样扰动程度比陆地上的大，更增加了确定土性参数的难度。例如，渤海海底粉、粘、砂土互层的现象严重，有时在进行三轴试验时要得到几个用肉眼看起来比较接近的土样都很困难，或者在同一深度（指1 m范围内）的同一种土还不足以同时进行物性、固结和强度等多种试验。只有物理性质试验所需土样较少，且不必用原状土，因此还有可能进行平行试验。如果能够建立起物理和力学性质之间的关系，则可通过相对来说较少的土样预测土的工程特性。

国外根据海洋土性大量资料的汇总和分析，曾得到一系列土性参数间的经验关系。但是，土是因地而异的材料，必须根据我国特定海域的具体资料求出各种土性参数间的相互关系。当我们着手寻找土性关系时，发现这样的情况：由于变异性的影响，取自同一钻孔的土性指标不呈现什么规律性；但将一个海域中许多钻孔的大量资料集中在一张图上时，规律性变得明显了。在个别试验中呈现出不确定性，在大量重复试验中具有统计规律性的现象称为

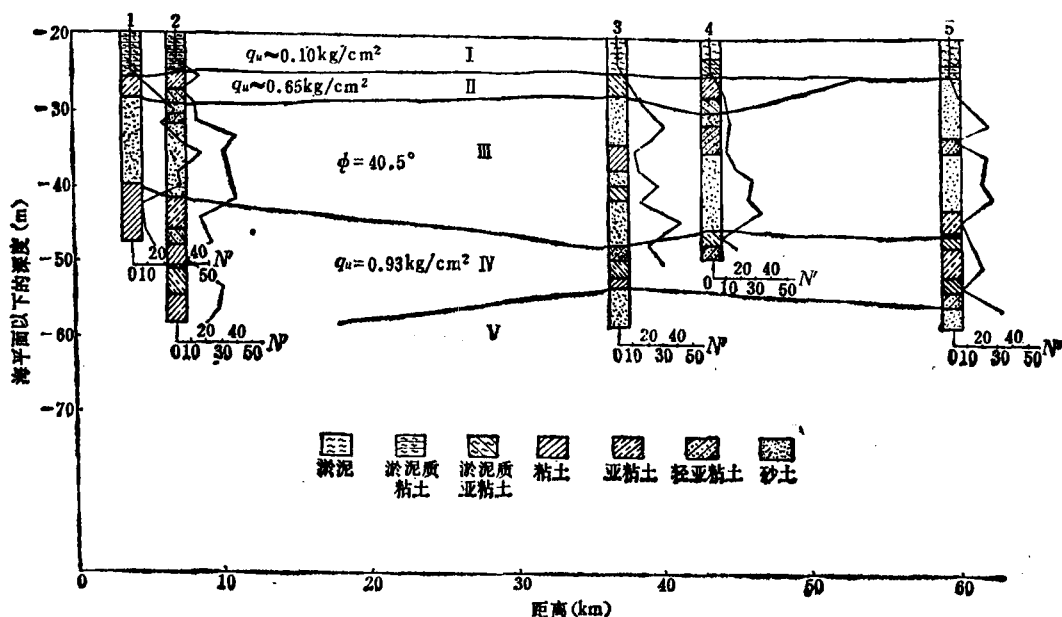


图 1

随机现象。数理统计方法中的回归分析则是根据观察或试验所得的数据找出各类指标间相互关系的重要手段，它可能使我们通过比较容易取得的物理性质指标预测较难得到的力学性质指标。

数理统计方法应用于岩土工程是七十年代初开始的，但至今还不普遍。原因之一是土力学工作者往往过于强调土性的复杂而忽视数学工具的应用，而熟悉数理统计方法的数学工作者往往又不了解土性的复杂性。一些经验关系的获得〔1〕虽用了最小二乘法，但由于数理统计方法被运用得不够，回归方程的确信程度并不清楚。〔2〕是一篇用统计方法分析数据的文章，但并未提及如何将统计结果用于实际。

本文对渤海某区由18个钻孔得到的100多组（800多个试件）粘土样品的试验数据进行了回归分析。这些样品取自土层剖面中的I、II、IV层（土层剖面见图1）。文中尽可能把土的性状和数理统计方法两者紧密结合起来：首先从物理意义上阐明建立哪些参数间的关系比较合理，然后计算得到一系列土性参数间的一元、二元和三元回归方程式，根据相关系数判断回归方程有无意义，并通过实例评价回归预测的实用性。

物理性质参数之间的关系

物理性质参数是对土进行分类的依据，在一定程度上是对土进行工程评价的基础。

1. 塑性指数和液限的关系

用最小二乘法得到184个土样的 $I_p - w_L$ 回归方程为：

$$I_p = 0.839w_L - 13.2 \quad (1)$$

相关系数 $r = 0.96$ ，标准误差 $S = 8.9$ 。

标准误差 S 表示数据的离散程度， S 越小越好。相关系数 r 是表示两个随机变量 x 和 y 间联系程度的一个量，其绝对值介于 0 和 1 之间。线性回归方程的 r 接近 0，表示 x 和 y 不相关，或可能存在非线性关系。由此看出， r 比 S 更能说明问题。顺便指出，由于计算机的应用，使 r 值计算非常方便，往往比将众多的数据点描绘到图上要省事，尤其是在改变坐标尺度时，这一优点更为明显。

$r = 0.96$ 表明 I_p 和 w_L 的相关性很好，提供了进行各种土性参数回归分析的根据。

2. 原始孔隙比和液限的关系

原始孔隙比 e_0 和液限 w_L 间的关系通常是对正常压密土而言〔1,2〕。我们的研究对象，并不都是正常压密土，当然就不能简单地去建立 e_0 和 w_L 间的回归方程。

按常规，压密程度是根据固结试验中确定的先期固结压力 p_c 值判别的。但海洋土的扰动性较大，很难用 Casagrande 方法确定 p_c 值。日本三笠方法〔3〕能用于拐点不明显的 $e - \lg p$ 曲线，但所得 p_c 值（图 2 中的 A' 点）往往偏大。我们用交点法定出 O' 点（关于交点法下面还要讨论），当 O' 接近上复有效压力 p'_0 或 p'_c 介于 O' 和 A' 点之间时，假定该土处于正常压密状态。对于这样假定的正常压密土（ $n = 110$ ）

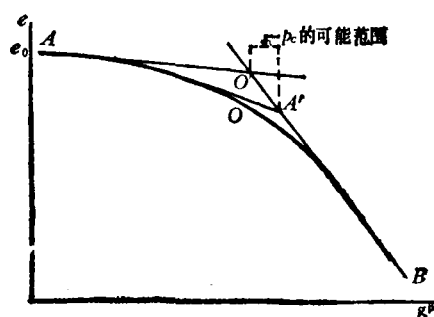


图 2

进行回归分析, 得到:

$$e_0 = 0.378 + 0.013w_L \quad (r = 0.67) \quad (2)$$

而对全部土样进行 $e_0 - w_L$ 回归分析时, r 降为 0.46。这从一个侧面表明上述判断压密状态的假定是可取的。

物理性质和力学性质参数间的关系

通过较易取得的物理性质指标预测较难得到的力学性质指标是我们的主要目的。需要预测的基本力学参数为压缩指数 C_c 和强度指标—此处用无侧限抗压强度 q_u 。确定哪些参数影响上述力学指标时, 有以下一些根据:

(1) 不连续介质的一个重要特点是孔隙度—引入原始孔隙比 e_0 。

(2) 对于饱和粘土, 孔隙所含水份是直接影响力学性质的因素—引入含水量 w 。

(3) 由前一节的关系式看到, 土的许多物理性质参数都和 w_L 有关。力学参数 C_c 和 w_L 的关系也有报导^[1,4]—可以认为 w_L 是应考虑的参数。

(4) 土的稠度是区分土软硬程度的一个标志。所谓软和硬, 为代表强度的一种概念。一表示相对稠度的指标是液性指数 I_L 。

下面分述回归分析的结果。

1. 一元回归方程

(1) 压缩指数 C_c 和各物理性质指标的关系: 由表 1 的计算结果看到, C_c 和 e_0 的关系最密切。对于饱和土, $e_0 = wG$ 。比重 G 对各种粘土并不是一个常数, 但变化并不很大, 因此 e_0 和 w 两个因素的影响很接近。 $C_c - w_L$ 的相关性是可取的, $C_c - I_L$ 的直线相关性则较差。

C_c 和各物性指标的关系

表 1

回归方程形式	样本数 n	相关系数 r	标准误差 S
$C_c = -0.042 + 0.318e_0$ (3a)	148	0.85	0.059
$C_c = -0.024 + 0.008w$ (3b)	148	0.83	0.064
$C_c = -0.001 + 0.007w_L$ (3c)	148	0.60	0.091
$C_c = 0.206 + 0.066I_L$ (3d)	148	0.32	0.108

(2) 无侧限抗压强度和物性指标的关系: 强度指标和物性参数间不存在线性关系, 用指数回归方程比较适宜。

从表 2 看到, q_u 和 e_0 、 w 的相关性较好, 其中和 w 的相关性尤其好。压缩性与 e_0 的关系最密切, 强度则与 w 的关系最密切, 这点和物理上的概念是一致的。

2. 二元回归方程

从表 1、2 看到, 影响压缩和强度指标的因素不止一个。为找出上述力学特性和多个因素的关系, 需要进行多元回归分析。但是, 如果因素考虑得太多, 引入的实验误差增加, 对实用可能带来困难。因此, 一方面要把有重要影响的因素考虑进去, 另一方面又要使自变量限

q_n 和各物性指标的关系

表2

回归方程形式	样本数 n	相关系数 r	标准误差 S
$q_n = 6.45 e^{-3.02e_0}$ (4a)	121	-0.75	0.70
$q_n = 6.31 e^{-0.08w}$ (4b)	121	-0.77	0.67
$q_n = 0.75 e^{-0.016w_L}$ (4c)	121	-0.14	1.05
$q_n = 1.18 e^{-1.33I_L}$ (4d)	121	-0.65	0.81

C_e 和物性参数的二元回归方程

表3

回归方程形式	R	S	$r_{y_1}/r_{y_{1,2}}$	$r_{y_2}/r_{y_{2,1}}$	T_1	T_2
$C_e = -0.101 + 0.007w + 0.003w_L$ (5a)	0.85	0.058	0.83/0.78	0.60/0.43	14.8	5.7
$C_e = -0.042 - 0.0015w + 0.37e_0$ (5b)	0.85	0.059	0.83/-0.06	0.85/0.37	0.7	4.8
$C_e = -0.111 + 0.274e_0 + 0.003w_L$ (5c)	0.88	0.054	0.85/0.81	0.60/0.43	16.5	5.7
$C_e = -0.042 + 0.369e_0 - 0.050I_L$ (5d)	0.88	0.055	0.85/0.86	0.32/-0.38	20.3	5.0
$C_e = -0.195 + 0.009w_L + 0.123I_L$ (5e)	0.81	0.066	0.60/0.79	0.32/0.69	15.6	11.6
$C_e = -0.032 + 0.010w - 0.056I_L$ (5f)	0.86	0.059	0.83/0.84	0.32/-0.39	18.4	5.0

q_n 和物性参数的二元回归方程

表4

回归方程形式	R	S	$r_{y_1}/r_{y_{1,2}}$	$r_{y_2}/r_{y_{2,1}}$	T_1	T_2
$q_n = 3.15 \exp(-0.094w + 0.028w_L)$ (6a)	0.80	0.63	-0.77/-0.80	-0.14/0.35	14.4	4.0
$q_n = 6.35 \exp(-0.080w - 0.085e_0)$ (6b)	0.77	0.67	-0.77/-0.28	-0.75/-0.01	3.2	0.09
$q_n = 3.20 \exp(-3.51e_0 + 0.029w_L)$ (6c)	0.79	0.66	-0.75/0.78	-0.14/0.35	13.6	4.0
$q_n = 5.65 \exp(-2.28e_0 - 0.681I_L)$ (6d)	0.80	0.64	-0.75/-0.61	-0.65/-0.42	8.5	5.0
$q_n = 9.0 \exp(-0.046w_L - 1.62I_L)$ (6e)	0.75	0.70	-0.14/-0.50	-0.65/-0.75	6.3	12.2
$q_n = 5.49 \exp(-0.064w - 0.579I_L)$ (6f)	0.80	0.63	-0.77/-0.63	-0.65/-0.35	8.7	4.1

制在较少的范围。这就是进行二元回归分析的原因。

二元回归分析中采用偏相关系数 $r_{y_{i,j}}$ 和全相关系数 R 。 T 值为判断影响因素重要性的量。计算结果表明，二元回归分析使全相关系数普遍提高。影响因素按重要性排列，对于 C_e 为： $e_0-w-w_L-I_L$ ，对于 q_n 则为 $w-e_0-I_L-w_L$ 。 e_0 和 w 两个自变量间的关系过分密切 ($r_{e_0,w} = 0.98$)，引起偏相关系数和 T 值出现偏小的异常，这属于数学上的原因，这里不予讨论。其它 T 值都大于 2，表明各因素的影响都不能忽略。

3. 三元回归方程

e_0 和 w 对力学性质的影响程度很接近，且其相关性过分密切，使它们不宜放在一起计算，因此只选取其中一个进行分析；而 w_L 和 I_L 的影响不应忽略，因此下面进行三元回归计

算： $C_e = f(e_0, w_L, I_L)$ 和 $q_u = g(w, w_L, I_L)$ 。

三元回归分析中用标准回归系数 b'_i 来比较因素的重要性。计算结果示于表5。为便于比较，表中除三元全相关系数 R_0 外，还列出了一元和二元回归的相关系数 r 和 R 。由表5看到， $R > r$ ，但 R_0 比 R 提高不多。总的来说，各相关系数都在0.8左右，表明相关性都较好。

三元回归计算结果

表5

回归方程形式	b'_1	b'_2	b'_3	S	R_0	R	r
$C_e = -0.102 + 0.292e_0 + 0.0024w_L - 0.011I_L$ (7)	0.78	0.21	-0.05	0.054	0.88	0.88	0.85
$q_u = 4.11\exp(-0.077w + 0.014w_L - 0.337I_L)$ (8)	-0.73	0.12	-0.16	0.63	0.91	0.80	-0.77

根据统计规律确定力学性质参数举例

进行上述回归分析是为了应用，因此必须与实测值作比较。下面取一任意钻孔的数据为例。根据物性参数通过一元、二元和三元回归方程预测的力学参数，以及室内实测的相应参数值列于表6。由表6的数字看到，对于 C_e 值，相关系数较大，即 $r = 0.88$ ，预测和实测参数的差别在 $\pm 20\%$ 范围内；对于 q_u ，两者差别在 $\pm 25\%$ 范围内。这说明，在初步设计阶段，回归预测方法是可以接受的。此外，回归预测方法还可作为检验实验室指标的参考依据。

回归预测和实测参数的比较

表6

层次	w	I_L	w_L	e_0	C_e				q_u			
					$f_1(e_0)$	$f_2(e_0, w_L)$	$f_3(e_0, w_L, I_L)$	实测	$g_1(w)$	$g_2(w, I_L)$	$g_3(w, w_L, I_L)$	实测
I	48.2	1.81	36.1	1.23	0.35	0.33	0.32	0.32	0.13	0.09	0.09	0.09
II	27.9	0.90	30.6	0.77	0.20	0.19	0.19	0.16	0.68	0.55	0.54	0.48
III	27.3	0.52	34.9	0.72	0.19	0.19	0.19	0.21	0.71	0.71	0.69	0.95

对于不同工程，选择土性参数时有不同要求。在初步设计阶段，首先遇到钻井船插桩深度计算。该情况下，一般采用强度下限值^[5]。因此，在推测土层强度参数时，取最小值。

借助于统计规律推断土的压密度

人们公认的求先期固结压力的方法都是基于土的压缩曲线建立的经验方法。由图2看到，压缩曲线由两部分组成：再压缩部分AO线和初始压缩段OB线。先期固结压力值位于转折折点附近。若对AO和BO线作切线，两切线交点O'也在先期固结压力值附近。作切线交点的方法我们称之为交点法。该法作图简单是一大优点，但尚未得到公认，是否适用应由实践检验。

我们对本文引用的18个钻孔进行了分析,发现除第Ⅰ土层外,交点法求得的 O' 值多数都很接近土层上覆有效压力 p'_0 值,典型例子示于图3。既然这种现象大量地重复出现,就表明不是偶然的巧合,而有一定的统计规律性。后来从文献中发现,〔6〕也曾用这种交点法求先期固结压力的下限。我们把 O' 接近 p'_0 和 p'_0 介于 O' 和 A' 之间的情况(见图2)假定为正常压密状态。根据这种假定,Ⅰ和Ⅳ层可判断为正常压密土,Ⅱ层为超压密土。

e_0-w_L 关系(式2)可作为承认上述假定的一个间接依据。〔7〕曾指出,正常压密海洋土的 $C/p'_0 \leq 0.3$ 。Ⅰ层的平均 C/p'_0 接近0.5,Ⅰ和Ⅳ层的平均 $C/p'_0 \leq 0.3$ 的事实也表明Ⅰ、Ⅳ层属于正常压密土,Ⅱ层为超压密土。此外,上述判断与土层地质成因分析也是一致的:Ⅰ、Ⅳ层为海相沉积,Ⅱ层为泻湖相沉积〔8〕,后者可能因干枯而引起超压密。

因此,土性的统计规律有助于判断土的压密度。当然,为进一步论证,需要进行微体古生物和同位素年代分析,以及现场孔隙水压力的量测。

结 论

(1)由于土性的复杂,尤其是海洋土的变异性,数理统计方法是确定土性规律的重要手段。运用数理统计方法中的回归分析可以通过较易取得的物理性质指标预测较难得到的力学性质指标。这将为节省原状土样开辟途径,意味着海洋工程的经济成本可能大大下降。

(2)本文对渤海海底粘土进行一元、二元和三元回归分析,得到了一系列回归方程。回归分析中相关系数是重要的参数,对方程的确信程度提供了定量的认识。通过一钻孔的实例,表明回归预测方法在初步设计阶段的适用性。当统计样本数增加后,回归预测精度还将提高。

(3)对一个海域的土性资料进行数据分析,工作量非常大。但应用计算机进行回归分析,可使工作效率大大提高。在实验室中推广应用也是方便的。

(4)由于海洋土的扰动性,判断土层压密状态比较困难。本文借助于统计规律判断土层压密度,并认为交点法可作为确定海洋土先期固结压力值的一种尝试。但需要有更多资料作进一步论证。

本文所用资料是渤海石油公司研究院提供的,在此表示衷心感谢。本文是在钱寿易先生的领导和关心下进行的,并得到组内唐莘庚同志的协助,在此一并表示深切谢意。

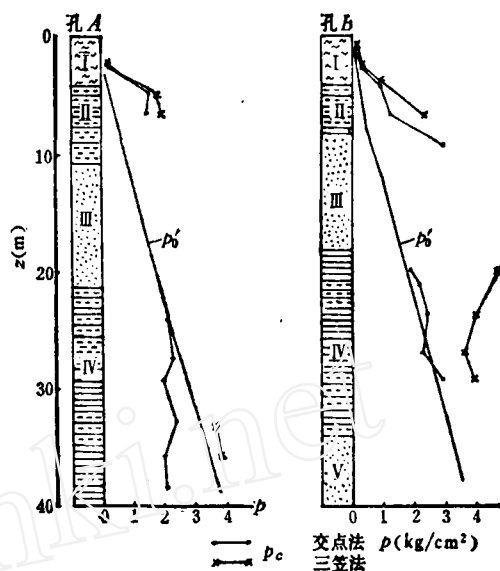


图 3

参 考 文 献

- (1) McClelland B., Progress of Consolidation in Delta Front and Prodelta clays of the Mississippi River, "Marine Geotechnique", 1967.
- (2) Ghazzaly O. I. & McCaslin B. T., Statistical Correlations of Engineering Properties of Offshore Clay Deposits, OTC, 1973, pap. 1902.
- (3) 土质试验法, 1981. (日文)
- (4) Terzaghi K. & Peck R. B., Soil Mechanics in Engineering Practice, 1948.
- (5) Sullivan R. A., Wright S. J. & Senner D. W. F., Evaluation of Design Parameters from Laboratory Tests, "Offshore Site Investigation", 1979.
- (6) Leroueil S., Samson L. & Bozozuk M., Laboratory and Field Determination of Preconsolidation Pressures at Gloucester, Canadian Geotechnical Journal, No. 3, 1983.
- (7) Noorany I. & Gizienski S. F., Engineering Properties of Submarine Soils: State-of-the-art Reviews, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, No. SM5, 1970.
- (8) 钱寿易、顾小芸、陆岳屏、邢延、侯荣增, 对渤海南部海底土工程性质的评价, 1983 (将发表于“海洋工程”).