

大连海相软土物理力学参数统计分析

杨沛东, 陈崇坤, 李黎

西京学院陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2023年3月2日; 录用日期: 2023年3月23日; 发布日期: 2023年3月31日

摘要

本文基于大连某人工岛岩土工程勘察资料, 采用SPSS软件对大连海相软土物理力学参数进行了统计分析, 建立了相关参数间的经验公式。采用偏斜度、峰值检验法对软土物理力学参数的正态分布特征进行了假设检验, 并采用Bayes方法对压缩指数、黏聚力及内摩擦角进行了优化。研究表明, 大连海相软土具有含水率高、孔隙比大、压缩性大、抗剪强度低等特点, 参数的离散性相对较小。孔隙比与含水率、液限与含水率、塑性指数与孔隙比、压缩指数与含水率呈显著相关, 而黏聚力与含水率、内摩擦角与含水率间呈弱相关。假设检验结果得出, 含水率、孔隙比、塑限、液性指数、压缩指数、黏聚力及内摩擦角均服从正态分布。经过Bayes优化后, 压缩指数、黏聚力及内摩擦角的标准差与变异系数均有所降低, 数据的离散性显著减小。

关键词

软土, 统计分析, 正态分布, 假设检验, Bayes方法

Statistical Analysis of Physical and Mechanical Parameters of Dalian Marine Soft Soil

Peidong Yang, Chongkun Chen, Li Li

Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structure, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Mar. 2nd, 2023; accepted: Mar. 23rd, 2023; published: Mar. 31st, 2023

Abstract

In this paper, based on the geotechnical investigation data of an artificial island in Dalian, SPSS software was used to analyze the physical and mechanical parameters of Dalian Marine soft soil, and

the empirical formula between the relevant parameters was established. The skewness and peak value tests were used to test the hypothesis of the normal distribution characteristics of the physical and mechanical parameters of soft soil, and the Bayes method was used to optimize the compression index, cohesion and internal friction angle. The results show that Dalian Marine soft soil has the characteristics of high water content, large pore ratio, high compressibility and low shear strength, and the dispersion of parameters is relatively small. Pore ratio was significantly correlated with water content, liquid limit and water content, plasticity index and pore ratio, compression index and water content, while cohesion was weakly correlated with water content, internal friction angle and water content. The results of hypothesis test show that moisture content, pore ratio, plastic limit, liquid index, compression index, cohesion and internal friction angle all follow normal distribution. After Bayes optimization, the standard deviation and coefficient of variation of compression index, cohesion and angle of internal friction were all decreased, and the dispersion of data was significantly reduced.

Keywords

Soft Soil, Statistical Analysis, Normal Distribution, Hypothesis Testing, Bayes Method

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着社会经济的快速发展,可利用土地资源逐年减少。许多沿海地区采用填海造地工程来缓解土地资源供需矛盾。沿海地区以海相沉积软土为主,具有粘粒含量高、渗透性差、含水率高、压缩性大、抗剪强度低等特点,许多专家学者对黏性土的物理力学参数开展了研究。如,对北京、南京地区粘性土土工参数的变异性进行统计分析[1][2];对珠海、珠江三角洲等地软土的物理力学指标进行统计分析,得到了各指标的概率分布特征[3][4][5][6];对深圳、连云港、渤海、广州等沿海地区软土进行了物理力学指标统计分析,得到了关于压缩指数与其他物理参数的线性关系[7][8][9][10][11];对南京、中山等地区软土物理力学指标随深度变化趋势进行统计分析,为工程建设提供依据[12][13];对南宁市冲积相黏土、珠江三角洲软土、天津地区软土及武汉典型地区软土的概率分布类型进行分析[14][15][16][17]。

综上所述,土体分布具有典型的地域特征,不同地区土体的物理力学特性差异明显。本文以大连海相软土为研究对象,采用 SPSS 统计分析软件,统计分析了大连海相软土物理力学参数的变化范围、均值、标准差及变异系数,将相关性较好的物理力学参数进行回归分析,并拟合出物理力学参数的经验公式。采用偏斜度、峰值检验法对软土物理力学参数的正态分布特征进行了假设检验。以样本统计规律作为先验函数,采用 Bayes 方法对部分参数进行了优化分析,为大连地区软土工程分析与评价提供可靠的理论依据与参数取值。

2. 海相软土物理力学参数统计分析

试验土样取自大连某人工岛工程,该区域海相软土以淤泥、淤泥质黏土、淤泥质粉质黏土为主。采用 SPSS 软件统计分析该地区海相软土的物理力学参数,统计指标包含含水率 w 、孔隙比 e 、液限 w_L 、塑限 w_p 、塑性指数 I_p 、液性指数 I_L 、固结系数 C_v 、压缩指数 C_c 、黏聚力 C 与内摩擦角 φ 。统计项目包含样本容量、分布区间、均值、标准差及变异系数。由表 1 可见,大连海相软土具有如下特征:

1) 含水率较高。海相软土含水率的变化范围介于 23.20%~85.40% 之间, 均值达到了 52.79%, 液限与塑限均值分别为 41.16% 与 21.16%。液性指数均值达到了 1.59, 表明海相软土呈流塑状态。

2) 孔隙比较大。孔隙比是可以反映土颗粒分布疏松和密实程度的指标之一, 孔隙比越大, 土颗粒分布越疏松, 反之, 则越密实。海相软土孔隙比的变化范围介于 0.65~2.08 之间, 均值达到了 1.42。由于孔隙比较大, 导致土颗粒较为疏松, 土体的结构强度差。

3) 压缩性较大。压缩指数是指土体在侧限条件下受压时, 压缩试验所得的土孔隙比与有效压力对数值关系曲线上直线段的斜率。海相软土压缩指数的变化范围介于 0.05~0.87 之间, 均值达到了 0.52, 表明大连海相软土属于高压缩性土。

4) 抗剪强度较低。黏聚力与内摩擦角是土体抗剪强度指标。黏聚力的变化范围介于 5 kPa~22 kPa, 内摩擦角的变化范围介于 20°~31.9°, 黏聚力与内摩擦角均值分别为 12.09 kPa 与 24.52°。可见, 大连海相软土的抗剪强度较低。

5) 数据离散性较小。变异系数是衡量试验数据变异程度的统计量之一, 变异系数越大, 其离散程度越大, 反之则越小。其中, 固结系数的变异系数最大, 达到了 1.68, 而其他参数的变异系数均较小。因此, 在土体变形计算时, 不能忽略固结系数的变异性, 应考虑取样误差的影响。

Table 1. Statistical analysis of soil physical and mechanical parameters

表 1. 土体物理力学参数指标统计分析

指标	样本容量 N	分布区间	均值 μ	标准差 σ	变异系数 δ
$w/\%$	2114	23.20~85.40	52.79	13.54	0.26
e	1034	0.65~2.08	1.42	0.38	0.27
$w_L/\%$	2114	20.00~61.40	41.16	9.64	0.23
$w_p/\%$	2114	11.60~30.90	21.16	4.04	0.19
I_p	2114	5.60~31.10	20.00	5.73	0.29
I_L	2114	0.56~4.02	1.59	0.29	0.18
C_v (cm ² /s)	120	0.13~9.14	1.00	1.68	1.68
C_c	101	0.05~0.87	0.52	0.19	0.37
C (kPa)	47	5.00~22.00	12.09	4.36	0.36
φ (°)	47	20.00~31.90	24.52	2.36	0.10

3. 海相软土物理力学参数相关性分析

软土的物理力学性质之间往往相互影响、相互关联, 经过多重关系模型对比发现, 采用线性关系描述各个指标的关系最好。因此, 采用 SPSS 分析软件, 选取上述物理力学参数进行一元线性回归分析, 获得各参数间的规律性关系, 并拟合经验公式, 使得试验过程复杂、不易获取的参数可以由简单易获取的参数反演得到, 为工程建设提供借鉴。回归分析时, 依据相关系数 R 的绝对值大小来判别相关参数间的关联程度: 当 $|R| > 0.8$ 时, 呈显著相关; 当 $0.3 < |R| < 0.8$ 时, 呈弱相关; 当 $|R| < 0.3$ 时, 无相关性。

图 1(a) 为孔隙比与含水率关系曲线。由图可见, 随着含水率的增加, 孔隙比逐渐增大。二者近似为线性关系($e = 0.027w + 0.013$), 相关系数达到了 0.999, 与温州[4]、天津[16]、连云港[18]地区线性关系斜率相近。图 1(b) 为液限与含水率关系曲线, 二者近似为线性关系($w_L = 0.654w + 6.623$), 相关系数达到了 0.919, 呈显著相关。而南京[2]、浙江[19]、珠江三角洲[15]地区黏土的相关系数仅为 0.558、0.806 及 0.7948。

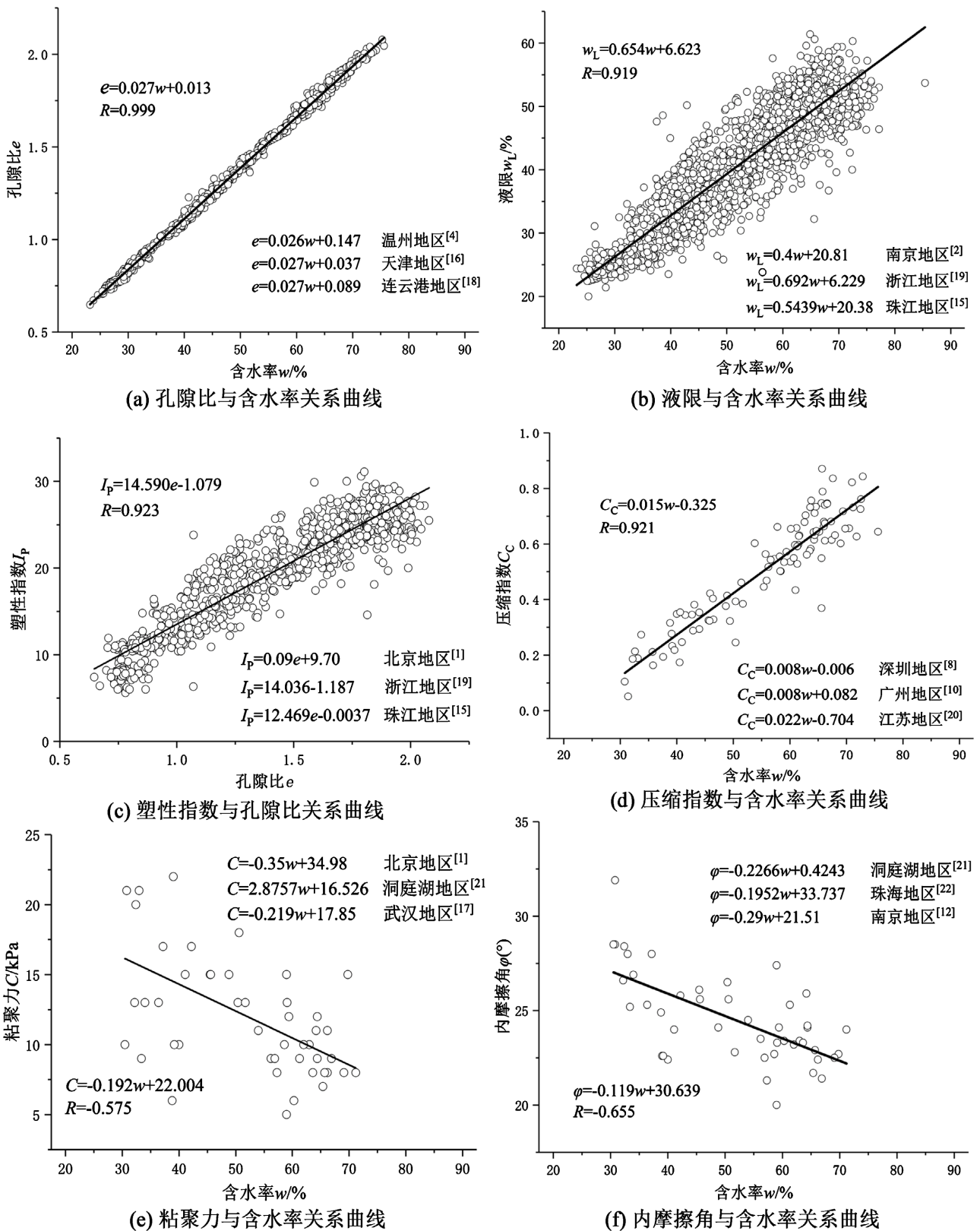


Figure 1. Relationship between physical and mechanical parameters

图 1. 物理力学参数相关性

由此可见，大连地区软土的液限与含水率相关性明显优于浙江、南京及珠江等地区。图 1(c)为塑性指数与孔隙比关系曲线。随着孔隙比的增加，塑性指数逐渐增大。二者近似为线性关系($I_p = 14.590e - 1.079$)，相关系数达到了 0.923，呈显著相关。而北京[1]、浙江[19]与珠江[15]地区的相关系数分别为 0.7767、0.778、0.850，可见大连软土的塑性指数与孔隙比相关性明显优于其他地区。图 1(d)为压缩指数与含水率关系曲线。二者近似为线性关系($C_c = 0.015w - 0.325$)，相关系数达到了 0.921，呈显著相关。压缩指数与含水率经验公式斜率介于深圳[8]、广州[10]与江苏[20]地区之间。图 1(e)为黏聚力与含水率关系曲线。二者呈负相关($C = -0.192w + 22.004$)，相关系数为-0.575，呈弱相关性。与北京[1]、洞庭湖[21]及武汉[17]地区相比，4 个地区黏土黏聚力与含水率相关性及其曲线斜率均差异较大。图 1(f)为内摩擦角与含水率关系曲线，二者呈负相关关系($\varphi = -0.119w + 30.639$)，相关系数为-0.655，呈弱相关性。与洞庭湖[21]、珠海[22]及南京[12]等地区黏土相比，经验公式斜率相对较小。

4. 海相软土物理力学参数概率分布模型

在研究连续性总体时，往往先考虑其是否服从正态分布，其中偏斜度、峰值法较为有效。因此，采用偏斜度峰值检验法检验上述物理力学参数是否符合正态分布。

1) 偏斜度与峰值

设 X_1, X_2, \dots, X_n 为从总体 F 中抽取的样本，则样本偏斜度定义为：

$$\hat{\beta}_1 = \frac{m_{n,3}}{m_{n,2}^{3/2}} = \sqrt{n} \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{\left(\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2\right)^{3/2}} \quad (1)$$

它反映了总体偏斜度的信息，总体偏斜度定义为 $\beta_1 = \mu_3 / \mu_2^{3/2}$ ， $\mu_i (i = 2, 3)$ 是总体的 i 阶中心距。 β_1 是反应总体分布的非对称性或偏倚性的一种度量。正态分布的偏斜度为 0。

设 X_1, X_2, \dots, X_n 为从总体 F 中抽取的样本，则样本峰值定义为

$$\hat{\beta}_2 = \frac{m_{n,4}}{m_{n,2}^2} - 3 = \sqrt{n} \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{\left(\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2\right)^2} - 3 \quad (2)$$

它反映了总体峰值的信息，而总体峰值定义为 $\beta_2 = \mu_4 / \mu_2^2 - 3$ 。 β_2 为反映总体分布密度函数在众数(即密度函数的最大值点)附近“峰”的尖削程度的一种度量。若连续性总体数据的偏斜度、峰值都接近 0，则认为这个组数据是来自正态总体的；如果其峰值为正，则表示其相对正态分布是尖锐的；如果其峰值为负，则表示其相对正态分布是平坦的。

2) 拒绝域

设 X_1, X_2, \dots, X_n 为从总体 X 中抽取的样本，假设 $H_0: X$ 是正态总体。设：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sqrt{\frac{6(n-2)}{(n+1)(n+3)}} \\ \sigma_2 &= \sqrt{\frac{24(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \beta_1 / \sigma_1 \\ u_2 &= (\beta_2 - \mu_2) / \sigma_2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中： $\mu_2 = 3 - \frac{6}{n+1}$ 。一般来讲，当 $|u_1|$ ， $|u_2|$ 值过大时，就会拒绝 H_0 。取显著性水平为 α ， $\alpha = 0.1$ ， H_0 的拒绝域为：

$$\left. \begin{aligned} |u_1| &= |\beta_1/\sigma_1| \geq z_{\alpha/4} = 1.96 \\ |u_2| &= |(\beta_2 - \mu_2)/\sigma_2| \geq z_{\alpha/4} = 1.96 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

采用偏斜度、峰值检验法针对大连海相软土物理力学参数正态分布特征进行假设检验,结果见表2。由表可见,海相软土物理参数中含水率、孔隙比、塑限、液性指数服从正态分布,而液限、塑限指数不符合正态分布。海相软土力学参数中压缩指数、黏聚力和内摩擦角服从正态分布,而固结系数不符合正态分布。上述研究对于软土工程中地基土体参数取值及可靠性分析具有重要的研究价值。

Table 2. Statistical distribution law of physical and mechanical parameters of Dalian Marine soft soil

表 2. 大连海相软土物理力学指标统计分布规律

参数	偏度 β_1	峰度 β_2	u_1	u_2	检验结果	分布形态
$w/\%$	0.340	-0.556	2.086	-1.716	接受	正态分布
e	-0.240	-0.658	-1.030	-1.427	接受	正态分布
$w_L/\%$	1.628	9.208	9.988	28.420	拒绝	非正态分布
$w_p/\%$	0.218	1.252	1.337	3.864	接受	正态分布
I_p	1.689	14.201	10.362	43.830	拒绝	非正态分布
I_L	-0.083	0.497	-0.509	1.534	接受	正态分布
$C_v(\text{cm}^2/\text{s})$	2.716	7.768	12.297	17.722	拒绝	非正态分布
C_c	-0.391	-0.804	-1.626	-1.688	接受	正态分布
C/kPa	0.714	-0.224	2.061	-0.329	接受	正态分布
$\varphi(^{\circ})$	0.806	0.758	2.325	1.113	接受	正态分布

5. 海相软土土体参数优化分析

由于样本数量有限,且数据获取存在一定误差,直接使用样本参数将具有一定的离散性。通常需要进行优化处理,这样在进行可靠性计算时,精度也将提高。Bayes [23]方法是一种基于概率分布的进化算法,利用当前样本中优秀解提供的信息建立 Bayes 概率模型,反应优秀解的分布,它为随机量概率分布推断提供了一个较好的框架,并通过抽样产生新的解来指导和修正现在概率分布的过程[24]。由前述大连海相软土指标假设检验结果可知,压缩指数、黏聚力及内摩擦角均符合正态分布,为了使数据更加合理,采用 Bayes 方法进行优化。以表1中相关参数的统计结果作为先验函数(均值 μ 、标准差 σ),以表3中小样本数据作为似然函数(均值 μ_0 、标准差 σ_0),通过 Bayes 方法进行优化计算最终获得后验函数(均值 μ' 、标准差 σ'),优化结果见表3。

$$\mu' = \frac{\mu_0\sigma^2 + \mu(\sigma_0^2/n)}{\sigma_0^2/n + \sigma^2} \quad (6)$$

$$\sigma'^2 = \frac{\sigma^2(\sigma_0^2/n)}{\sigma_0^2/n + \sigma^2} \quad (7)$$

式中: μ_0 、 μ 、 μ' 分别为似然函数、先验函数和后验函数对应的均值; σ_0 、 σ 、 σ' 分别为似然函数、先验函数和后验函数对应的标准差; n 为样本个数。由表3可见,与优化前相比,压缩指数经过优化后的均值、标准差及变异系数均有所降低,其中标准差减少了57%,变异系数减少了43%。黏聚力经过优化后的均值有所增高,而标准差与变异系数均有所降低,其中标准差降低了78%,变异系数降低了80.1%。内摩

擦角经过优化后的均值无明显变化，而标准差与内摩擦角均有大幅度降低，其中标准差减少了 91.5%，变异系数则减少了 90%。由以上分析可知，经过优化后的样本数据快速收敛，离散性明显减小，克服了常规算法离散性较大的缺点，使后验函数的数据充分利用，最大限度地提高了数据的可靠性。该方法充分反映了其客观性，有较高的应用价值，并可为基础设计时参数选取提供参考。

Table 3. Optimization results of soil parameters

表 3. 土体参数优化结果

参数	试验数据	样本个数 n	均值 μ (优化前/后)	标准差 σ (优化前/后)	变异系数 δ (优化前/后)
C_c	0.163, 0.174, 0.233, 0.657, 0.466, 0.726, 0.188	7	0.52/0.40	0.19/0.08	0.37/0.21
C/kPa	13.0, 15.0, 22.0, 10.0, 12.0, 15.0, 18.0	7	12.09/14.69	4.36/1.02	0.36/0.07
$\varphi(^{\circ})$	26.0, 26.1, 22.6, 23.4, 24.1, 22.7, 25.6	7	24.52/24.49	2.36/0.20	0.1/0.01

6. 结论

1) 大连海相软土具有含水率高、孔隙比大、压缩性大、抗剪强度低等特点，除了固结系数以外，其他参数的离散性较小。

2) 针对大连海相软土物理力学参数的相关性分析，建立了孔隙比与含水率、液限与含水率、塑性指数与孔隙比、压缩指数与含水率、黏聚力与含水率、内摩擦角与含水率之间的经验公式。

3) 由大连海相软土指标正态分布假设检验结果得出，含水率、孔隙比、塑限、液性指数、压缩指数、黏聚力及内摩擦角均服从正态分布，而液限、塑性指数、固结系数不服从正态分布。

4) 经过 Bayes 优化后，压缩指数、黏聚力及内摩擦角的标准差与变异系数均有所降低。其中，黏聚力与内摩擦角的标准差与变异系数降低较大。这表明，优化后的样本数据离散性明显减小，使得数据更加合理化。

参考文献

- [1] 田小甫, 孙进忠, 张彬. 北京地区粘性土物理力学指标统计分析[J]. 资源与产业, 2007, 9(4): 80-84.
- [2] 徐奋强, 曹云. 南京河西粉质粘土物理力学指标统计分析[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 65-67+88.
- [3] 彭立才, 温勇, 杨光华, 等. 珠海横琴新区软土物理力学指标统计分析[J]. 广东水利水电, 2016(4): 29-32.
- [4] 朱益军, 荆伟伟, 施颖, 林龙. 乐清湾滨海身后淤泥工程特性试验研究[J]. 工程勘察, 2014(8): 10-14.
- [5] 郑轶轶, 朱剑锋, 刘干斌, 贾波. 宁波软土物理力学参数概率分布及相关性研究[J]. 中国科技论文, 2013, 8(5): 367-373.
- [6] 卢阳明. 上海典型软土基本物理力学指标分析[J]. 四川建筑科学研究, 2016, 42(2): 70-73.
- [7] 高彦斌, 张松波, 葛潇楠. 我国沿海地区软黏土压缩指数统计及国外其他地区对比[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2713-2720.
- [8] 赵有明, 江辉煌, 张惠明. 深圳地区软粘土变形参数研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(3): 40-43.
- [9] Miao, L.C. and Edward, K.J. (2007) Secondary Compression Features of Jiangsu Soft Marine Clay. *Marine Georesources & Geotechnology*, 25, 129-144. <https://doi.org/10.1080/10641190701380258>
- [10] 丁雷, 江永建, 陈多才, 张先宇. 广州软土的力学特性及相关性分析[J]. 铁道建筑, 2011(10): 75-77.
- [11] 姜燕, 杨光华, 孙树楷, 等. 广州市南沙区软土物理力学指标统计分析[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(9): 99-103.
- [12] 韩旭, 李少雄, 丁磊. 南京市浦口滨江大道软土参数相关性分析[J]. 资源环境与工程, 2013, 27(4): 605-609.
- [13] 梁仕华, 戴君. 中山港地区软土物理力学指标统计分析[J]. 广东工业大学学报, 2016, 33(3): 81-87.
- [14] 周东, 韦海鑫, 杨涟, 等. 南宁市冲积相黏土物理力学参数概率统计分析[J]. 广西大学学报, 2017, 42(4):

1361-1368.

- [15] 夏银飞, 吴代华, 文建华. 珠江三角洲软土物理力学指标统计分析[J]. 公路交通科技, 2008, 25(1): 47-50.
- [16] 尹利华, 王晓谋, 张留俊. 天津软土土性指标概率分布模型统计分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(S2): 462-469.
- [17] 屈若枫, 徐光黎, 王金峰, 等. 武汉地区典型软土物理力学指标间的相关性研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(z2): 113-119.
- [18] 章定文, 刘松玉, 于新豹. 连云港海相软土工程特性及处治方案探讨[J]. 工程地质学报, 2003, 11(3): 250-257.
- [19] 徐炎兵, 李永和, 陈盼, 王吉利. 浙江漩门湾软黏土物理力学特性的统计分析[J]. 土工基础, 2012, 26(3): 43-46.
- [20] 缪林昌, 张军辉, 陈艺南. 江苏海相软土压缩特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(11): 1711-1714.
- [21] 曹志伟, 胡勇军, 郑智雄, 朱志祥. 洞庭湖软土物理力学指标统计分析[J]. 公路与汽运, 2014(3): 129-131+189.
- [22] 白继文, 杨鸿钧. 珠海软土物理力学性质指标间相关关系分析[J]. 港工技术, 2017, 54(3): 98-102.
- [23] 徐军, 雷用, 郑颖人. 沿途参数概率分布推断的模糊 Bayes 方法探讨[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 394-400.
- [24] 刘小熊, 武燕, 史静平, 章卫国. 一种故障诊断的贝叶斯优化算法研究[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(1): 129-131.