文章编号: 1001-4632(2004)03-0040-04

深圳地区软粘土变形参数研究

赵有明[1], 江辉煌[2], 张惠明[2]

(1. 铁科院(北京)工程咨询有限公司, 北京 100081; 2. 铁道科学研究院 深圳研究设计院, 广东 深圳 518034)

摘 要: 根据深圳地区15个软土处理工点的4 000多组试验数据, 对软土的物理指标和变形指标进行统计分析。结果表明: 压缩系数、变形模量和压缩指数的变异系数很大, 其算术平均值的误差较大, 不宜直接用于工程计算; 含水量的变异系数很小, 且与压缩参数有良好的相关性, 可以较好地推算软土变形参数。因此, 建议在实际工程中, 如果没有软土的变形实验数据, 可以直接根据软土的含水量进行估算; 对于有实验数据的情况, 将实验得到的变形参数和根据土样含水量估算的变形参数进行比较, 剔除与估算参数相差较大的试验数据, 将余下的数据取平均作为所需要的变形参数。

关键词: 软粘土; 变形特性; 含水量; 压缩系数; 压缩指数; 相关性分析
中图分类号: TU447 **文献标识码**: A

1 前 言

深圳位于珠江入海口的伶仃洋东岸, 沿岸广泛分布有第四纪海相沉积的软弱土层, 特区成立二十多年以来, 深圳西部填海造地约30 km^2, 进行了许多大型项目的建设, 如深圳机场、福田保税区、滨海大道、深圳红树湾、西部田园海上风光旅游区、宝安新中心区以及正在建设的深港西部通道等。为了确保软基的沉降不对构筑物的正常使用造成危害, 这些项目都进行了软基处理。

本文采用数理统计方法, 对深圳软粘土的分布及其物理力学性质进行分析总结, 建立了深圳地区软粘土物理和力学性质之间的关系式, 并对软基处理时软土物理力学参数的选取提出建议。

2 深圳软粘土层的结构特性

深圳地势东南高、西北低。西部海岸从北往南依次为沙井、福永、西乡、前海和后海, 海岸线长达70 km, 海滩面积约100 km^2, 滩涂广泛分布有淤泥、淤泥质土等软弱粘土, 一般厚3 m～10 m, 最厚达20 m。典型的地层结构剖面见图1。

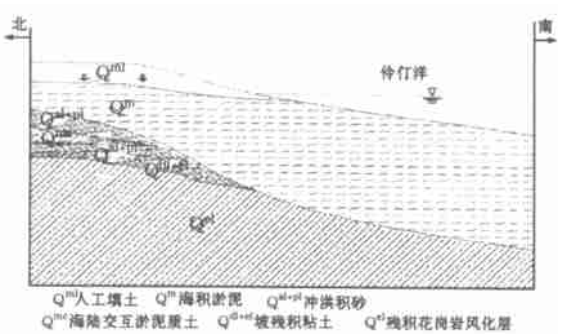

图1 典型的地层结构剖面

由于深圳地处亚热带地区, 属南亚热带季风气候, 雨量充沛, 河流发育, 海滩软土中含大量陆源成分。据X-衍射分析, 软土中的主要矿物成分为石英、云母、高岭石、长石、绿泥石、赤铁矿及少量石膏, 其中高岭石和石英的含量相对较高。通过电子显微镜观察, 淤泥的微结构以板状结构为主。据放射性碳(C14)测龄, 淤泥层沉积速度平均约300年1米。

3 软粘土的物理力学性质

本文对深圳地区15个工点的近4 000组试验数据进行了统计, 其中7个工点分布在珠江口东海

收稿日期: 2003-02-20
作者简介: 赵有明(1965—), 男, 内蒙古土左旗人, 研究员。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

岸，其余 8 个工点位于深圳后海湾内。针对工点软粘土的物理力学指标，分别计算其平均值和变异系数，统计结果见表 1 和表 2。

表 1　深圳地区软粘土的物理力学指标

土类	统计内容	含水量 ω_0/ %	密度 ρ_0/ g·cm^{-3}	颗粒比重 G_s	饱和度 S_r/ %	孔隙比 e_0	液限 ω_L/ %	塑限 ω_P/ %	压限系数 $a_{1\text{-}2}$/ MPa^{-1}	变形模量 E_s/ MPa	压缩指数 C_c
淤泥	范围值	54.4～129.60	1.36～1.75	2.61～2.78	87～100	1.53～3.46	29.5～85.00	15～72.00	0.87～4.48	0.05～3.60	0.40～1.20
	平均值	82.43	1.52	2.69	98	2.24	50.67	30.10	2.14	1.60	0.66
	变异系数	0.05	0.18	0.07	0.02	0.29	0.06	0.08	0.39	0.46	0.60
	统计数量	404	393	196	196	404	340	341	347	349	295
淤泥质粘土	范围值	35.8～61.30	1.64～1.89	2.57～2.74	82～100	1.01～1.50	28.9～54.0	17.3～34.80	0.56～2.68	0.1～3.89	0.21～0.57
	平均值	46.39	1.76	2.68	98	1.24	39.6	24.26	1.29	1.67	0.36
	变异系数	0.05	0.14	0.07	0.02	0.30	0.07	0.09	0.57	0.66	0.76
	统计数量	57	56	22	22	57	33	35	54	53	52

表 2　深圳地区 15 个工点淤泥的物理力学指标

工点编号	样本数量	统计内容	含水量 ω_0/ %	密度 ρ_0/ g·cm^{-3}	孔隙比 e_0	液限 ω_L/ %	塑限 ω_P/ %	压缩系数 $a_{1\text{-}2}$/ MPa^{-1}	变形模量 E_s/ MPa	压缩指数 C_c
1	N = 29	平均值	74.35	1.56	1.96	60.44	37.36	1.42	2.21	0.53
		变异系数	0.04	0.13	0.24	0.05	0.07	0.37	0.32	0.56
2	N = 14	平均值	76.33	1.57	2.04	48.60	30.96	1.85	1.68	0.58
		变异系数	0.04	0.18	0.27	0.05	0.05	0.32	0.30	0.48
3	N = 15	平均值	86.05	1.51	2.37	64.33	27.50	2.51	1.42	0.75
		变异系数	0.04	0.15	0.25	0.02	0.07	0.29	0.35	0.52
4	N = 11	平均值	74.70	1.55	2.05	48.64	31.43	1.58	1.98	0.55
		变异系数	0.04	0.12	0.22	0.03	0.04	0.33	0.28	0.44
5	N = 8	平均值	69.51	1.57	1.93	48.16	30.94	1.62	1.99	0.53
		变异系数	0.04	0.15	0.27	0.05	0.06	0.46	0.42	0.43
6	N = 5	平均值	73.74	1.57	1.93					0.70
		变异系数	0.05	0.14	0.27					0.50
7	N = 15	平均值	81.49	1.51	2.25	50.25	31.72	1.69	2.01	0.58
		变异系数	0.04	0.14	0.23	0.02	0.02	0.26	0.29	0.39
8	N = 39	平均值	84.50	1.51	2.28	52.18	32.84	1.68	1.97	0.64
		变异系数	0.05	0.19	0.32	0.04	0.06	0.37	0.25	0.51
9	N = 94	平均值	90.37	1.48	2.45	49.24	26.39	2.28	1.58	0.75
		变异系数	0.04	0.15	0.23	0.06	0.10	0.32	0.35	0.55
10	N = 89	平均值	85.66	1.49	2.38	47.33	29.77	2.08	1.69	0.76
		变异系数	0.04	0.18	0.26	0.04	0.05	0.33	0.31	0.50
11	N = 9	平均值	62.93	1.56	1.77			1.28	1.80	0.46
		变异系数	0.04	0.10	0.21			0.20	0.13	0.32
12	N = 24	平均值	85.55	1.50	2.35	46.01	28.53	2.25	1.51	0.71
		变异系数	0.04	0.18	0.27	0.05	0.07	0.27	0.28	0.51
13	N = 8	平均值	69.03	1.58	1.86			1.42	2.12	0.52
		变异系数	0.06	0.15	0.34			0.39	0.21	0.68
14	N = 35	平均值	74.55	1.63	1.93	67.04	34.74	3.13	1.02	0.60
		变异系数	0.04	0.14	0.27	0.06	0.11	0.29	0.57	0.47
15	N = 8	平均值	66.40	1.62	1.79	63.53	23.03	3.67	0.77	0.58
		变异系数	0.02	0.08	0.14	0.02	0.06	0.17	0.36	0.42

通过对表 1、表 2 统计数据的分析，可以得到以下几点认识。

1) 在深圳地区，软粘土的物理力学指标变化范围较大，变异系数较大，且不同指标的变异系数差别大。

2) 软粘土的饱和度平均值为 98 %，变异系数小于 0.02，说明深圳地区的软粘土基本处于饱和状态。

3) 同一工程场地，淤泥的含水量和液限的变异系数一般小于 0.07，塑限的变异系数则高达 0.11。由于深圳地区淤泥的含水量平均值高达 82.4 %，采用概率统计方法取值时，应当考虑含水

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

量的变异性。

4) 即使在同一工点范围，孔隙比、压缩系数、变形模量和压缩指数的变异性非常大，变异系数一般为 0.13～0.39，压缩指数的变异系数高达 0.68，因此在进行变形计算时，不宜直接采用平均值，而应根据指标的变化情况，将场地分块细化，分别取值计算，以提高计算精度。

5) 深圳软粘土的颗粒比重为 2.57～2.78，变异系数均为 0.07，变化较小。无试验数据时，可参照表 1 选用。

4 物理力学指标之间的相关性

深圳地区软粘土沉积环境相近，软粘土的成分和结构基本相同，其物理力学指标存在很好的内在规律性。采用数理统计方法，对 463 个试样指标进行回归分析，得出了具有很好工程意义和使用价值的回归方程式。

4.1 物理指标之间的相关性

含水量、密度和颗粒比重这三个指标可以直接测定，表 3 列出了各种物理指标之间的回归方程及其相关系数。ω_L，ω_p 与 ω_0 不存在线性关系，相关性较差，而 e_0 与 ω_0，ρ_0 的相关性很好。

表 3 各物理性质指标间的相关性

公式编号	回归方程	相关系数	样本数量
(1)	$e_0 = 0.027\,1\omega_0$	0.986	463
(2)	$e_0 = \frac{1.645\,7}{\rho_0} - 1$	0.947	449
(3)	$\omega_0 = \frac{0.017\,2}{\rho_0 - 1} + 0.547\,4$	0.918	449
(4)	$\omega_L = 0.142\,5\omega_0 + 38.335$	0.301	375
(5)	$\omega_p = 0.061\,7\omega_0 + 24.49$	0.196	375

根据土的指标换算关系：

$$e_0 = \frac{\omega_0 \cdot G_s}{S_r} \tag{6}$$

由于 S_r 和 G_s 的变异性较小，可以分别取 $S_r = 98\,\%$，$G_s = 2.69$，代入上式得：

$$e_0 = 0.027\,4\omega_0 \tag{7}$$

公式 (7) 和表 3 中公式 (1) 非常接近，证明表 3 中公式 (1) 与理论是一致的，同样也可以证明表 3 中公式 (2) 和公式 (3) 与理论的一致性。

因此，对于深圳饱和软土，只要测定取样的 ω_0 或 ρ_0，一般可利用上述经验公式换算出土的全部三相指标。

4.2 变形指标与物理指标之间的相关性

压缩指数和压缩系数是反映软粘土变形特性的两个重要指标。由于高含水量的淤泥取样困难，费用较为昂贵，且原状土的扰动直接影响着固结试验的精度，因此，建立变形指标与土的物理性质指标间的经验关系式，通过物理指标来预测变形指标，是大多数岩土工程师的夙愿。当前，国内外岩土工程师已做了大量的工作。高大钊和魏道垛[1]对上海软粘土、顾小芸[2]对渤海海底淤泥分别进行了数理统计分析，得到的回归方程见表 4。Rendon-Herrero[3]也做了大量的类似工作，并提出了压缩指数方程。

本文对深圳地区软粘土的变形指标进行了回归分析，其结果也列入表 4。由表 4 可见，深圳地区软粘土的 C_c 不仅与 e_0，ω_0 有很好的线性关系，而且还与 ρ_0 有着良好的相关性，但与 ω_L 的相关性较差。此外，$a_{1\text{-}2}$ 与 e_0，$a_{1\text{-}2}$ 与 ω_0 之间同样具有较好的相关性。

从表 4 不难看出，虽然软粘土物理力学指标都具有一定的相关性，但是各区域的回归方程在数值上差别较大，深圳地区的结果与渤海海底淤泥的结果较为接近。

表 4 压缩指数和压缩系数的回归方程

资料来源	回归方程	相关系数	样本数量	备注
高大钊、魏道垛 (1986)	$C_c = 0.005\,50(e_0 - 0.529)$	0.818	165	上海淤泥质粘土
	$C_c = 0.015\,84(\omega_0 - 0.185)$	0.848	141	
	$C_c = 0.018\,42(\omega_L - 0.223)$	0.821	27	
顾小芸 (1986)	$C_c = 0.318e_0 - 0.042$	0.85	148	渤海某区海底淤泥
	$C_c = 0.008\omega_0 - 0.024$	0.83	148	
	$C_c = 0.007\omega_L - 0.001$	0.60	148	
本文	$C_c = 0.296\,8e_0 - 0.001\,4$	0.846		深圳软粘土
	$C_c = 0.008\,1\omega_0 - 0.006\,3$	0.827		
	$C_c = 0.004\,9\omega_L + 0.376\,4$	0.217		
	$C_c = \frac{0.426\,4}{\rho_0} - 0.174\,7$	0.819	347	
	$a_{1\text{-}2} = 0.953\,5e_0 - 0.198\,1$	0.814		
	$a_{1\text{-}2} = 0.202\,6\omega_0 - 0.183\,9$	0.808		
	$a_{1\text{-}2} = 0.030\,3\omega_L - 0.459\,7$	0.339		

5 结 论

(1) 含水量、颗粒比重和液限的变异系数小，能较好的反映软土原位状况。对于深圳软土，这三个指标的变异系数仅为 0.02～0.07。

(2) 孔隙比的变异系数一般为 0.20～0.27，明显大于含水量的变异系数。

(3) 压缩系数、变形模量和压缩指数的变异系

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

数很大，一般在 0.3 以上，最大的达 0.68。因此，如果采用这些参数的算术平均值进行工程计算，可能会有较大的误差。

(4) 含水量与压缩参数有良好的相关性，而且测试方法简单，试验结果的精度较高，是估算软土变形指标的理想参数。

参　考　文　献

[1] 高大钊，魏道垛. 上海软土工程性质的概率统计特征 [A]. 第四届土力学及基础工程学术会议论文选集 [C]. 北京：中国建筑工业出版社，1986. 176—182.

[2] 顾小芸. 应用数理统计方法确定海洋土的工程特性 [A]. 第四届土力学及基础工程学术会议论文选集 [C]. 北京：中国建筑工业出版社，1986. 415—421.

[3] 叶书麟，宰金璋，史佩栋，等译. 软粘土工程学 [M]. 北京：中国铁道出版社，1991.

Deformation Parameters of Shenzhen Soft Clay

ZHAO You-ming[1], JIANG Hui-huang[2], ZHANG Hui-ming[2]

(1. Beijing Engineering Consulting Limited Company, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China;
2. Shenzhen Research and Design Institute of CARS, Shenzhen Guangdong 518034, China)

Abstract: Based on 4 000 sets of experimental data from 15 soft ground improvement sites in Shenzhen region, the physical and deformation characteristics of Shenzhen soft clay are statistically analyzed. It is found that the variation coefficients of compression coefficient, compression module and compression index are large and that the direct use of the arithmetic average values of these deformation parameters may result in large error in the calculation of settlement. Water content is a proper parameter to estimate these deformation parameters due to its low variation coefficient and its good interrelation with the compression coefficient if no test data of deformation parameters are available. When such data are available, the deformation parameters derived from the test shall be compared with those estimated values based on the water content of the soil sample. Test data with a wide deviation from the estimated value shall be rejected, and the remaining test data shall be averaged and taken as the required deformation parameters.

Key words: Soft clay; Deformation characteristics; Water content; Compression coefficient; Compression index; Interrelation analysis

(责任编辑　吴　彬)

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net