

长江下游水下粉质黏土工程特性研究

蒋建平¹, 罗国煜²

(1. 上海海事大学 交通运输学院, 上海 200135; 2. 南京大学 地球科学系, 江苏 南京 210093)

摘要: 基于大量的土工试验, 对长江下游苏通大桥工程区水下粉质黏土的工程特性进行研究, 发现粉质黏土的不同指标的变异系数差别较大。土颗粒比重、天然密度、饱和度的变异系数较小, 天然含水量、天然孔隙比、液限的变异系数一般, 塑限、压缩模量、压缩系数、黏聚力、内摩擦角、标贯击数等的变异系数较大; 液限与天然含水量不存在相关关系, 塑限与天然含水量的相关性较好, 而天然孔隙比与天然含水量、天然密度的相关性很好; 压缩模量、压缩系数与天然孔隙比、天然含水量、天然密度的相关性较好, 相关系数达 0.87 以上; 压缩系数与液限不存在相关关系, 但压缩系数与塑限存在相关关系, 相关系数为 0.611 09。结果表明, 对大量试验数据的统计分析是研究土工程特性的重要方法。

关键词: 土力学; 工程特性; 水下粉质黏土; 苏通大桥; 长江下游

中图分类号: TU 44

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 1 - 3215 - 08

STUDY ON ENGINEERING CHARACTERISTICS OF SILTY CLAY UNDER WATER IN LOWER REACH OF YANGTZE RIVER

JIANG Jianping¹, LUO Guoyu²

(1. *College of Transport and Communication, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China;*

2. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: Based on large numbers of geotechnical tests, the engineering characteristics of silty clay under water in the foundation of Suzhou—Nantong large bridge in lower reach of Yangtze River, Jiangsu Province, China, was studied. It was found that the variation coefficients of silty clay parameters were different. The variation coefficients of specific gravity, natural density, saturation of soil grain were smaller, the variation coefficients of natural water content, natural void ratio, and liquid limit were moderate; and those of plastic limit, compressive module, compressive coefficient, coherent strength, inner friction angle, the blow counts of standard penetration test(SPT) were greater. For physical parameters, there didn't exist correlativity between liquid limit and natural water content, the correlativity between plastic limit and natural water content was better; and the correlativity between natural void ratio and natural water content, natural density were very good. For deformation parameters, the correlativity between compressive module, compressive coefficient and natural void ratio, natural water content, natural density were better; and the correlativity coefficients were greater than 0.87. There didn't exist correlativity between compressive coefficient and liquid limit, but there was correlativity between compressive coefficient and plastic limit; and the correlativity coefficient was 0.611 09. The results indicate that the statistical analysis of geotechnical test data is an important method for the study of soil engineering characteristics.

Key words: soil mechanics; engineering characteristics; silty clay under water; Suzhou—Nantong large bridge; lower reach of Yangtze River

收稿日期: 2006 - 05 - 20; **修回日期:** 2006 - 08 - 03

基金项目: 上海市教委科研资助项目(05FZ03); 上海市交通运输规划与管理重点学科建设项目

作者简介: 蒋建平(1966 -), 男, 2002 年于南京大学获博士学位, 现任讲师, 主要从事岩土工程、港航工程、工程地质等方面的教学与研究工作。

E-mail: jjpwx@163.com

1 引言

岩土的工程特性对建于其上或其中的建(构)筑物有重要影响^[1, 2], 加强岩土特别是软土工程特性的研究是很有必要的^[3~6]。苏通(苏州—南通)长江公路大桥工程区工程可行性和初步设计阶段的钻探结果显示, 大桥工程区的第四系覆盖层较厚, 达 200 m 左右。第四系覆盖层主要由淤泥质黏土、黏土、淤泥质粉质黏土、粉土、粉砂、粉细砂、细砂、中粗砂等组成^[7~9]。其中粉质黏土不论在面上还是在空间上, 分布都最为广泛。其实, 粉质黏土在全国广大地区特别是软土地区的分布都是很广泛的^[10~14]。

目前专门针对粉质黏土特别是水下粉质黏土进行的研究很少, 所以有必要专门对其工程特性进行分析和探讨, 这对长江下游水下工程建设及广泛存在的类似江河水下工程建设具有借鉴作用。

2 粉质黏土层的分布及土工试验概况

苏通大桥桥位区呈 NW 向, 江水自西北流向东南。该河段河床较宽, 约 5.0~10.0 km。河道为弯曲与分叉相混合。河流弯曲方向指向南岸, 即凸岸位于右岸, 凹岸位于左岸, 因此, 在左岸南通港—狼山一带为水流侵蚀岸, 而右岸接受堆积。由于狼山以西马鞍山、黄泥山附近的龙爪岩出露江边, 阻止了左岸岸边的冲刷后退, 使该河段岸线稳定。

本区除在中桥位长江北岸的狼山、军山、马鞍山、黄泥山及南岸的福山、塔山等由基岩组成的剥蚀残丘外, 桥址区均为长江古三角洲与新三角洲迭加组成的冲积平原, 地势低洼平坦, 地面标高 2~6 m。因此桥位区可分为 2 个微地貌单元: (1) 剥蚀残丘区; (2) 沿江新三角洲平原区。桥位区位于长江三角洲中前缘, 沿江两岸的冲积平原区是古长江与新长江三角洲的迭加产物。河床断面宽阔, 水流速度减缓, 易于散乱, 导致水流挟沙能力降低, 只要有充足的来沙量, 就会在江心或边滩产生沙体堆积。因此桥位区主要由沙坝、河口沙洲、泻湖以及人工沙坝等堆积成陆, 其中多数为河口沙洲淤高成陆。地势低平, 一般高程为 2~3 m, 往往低于长江的最高潮位和洪水位, 形成洪水期暂时性悬河景观。地面自西向东微倾, 两岸向江面低倾。

桥位区地层属扬子地层区和江南地层区, 大面积为第四系松散沉积层所覆盖。粉质黏土在地层中

的分布如表 1 所示。从表中可看出, 粉质黏土在垂直剖面上的分布是最广泛的。

苏通大桥工程区水下土的取样和土工试验严格按照《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)、《土工试验方法标准》(GB/T50123-1999)进行。原状土的取样采用钻孔过程中的薄壁取土器进行。关于抗剪强度指标 c , φ , 大部分土样采用快剪试验方法, 有少部分土样同时采用了固快、三轴剪切试验方法, 本文采用的是直剪中的快剪试验得出的 c , φ 值。

3 粉质黏土物理力学性质

苏通大桥桥位区粉质黏土物理力学指标统计见表 2。通过对表 2 统计数据进行分析, 可以得到以下结论:

(1) 在苏通大桥工程区, 粉质黏土不同指标的变异系数差别较大。土颗粒比重、天然密度、饱和度的变异系数较小; 天然含水量、天然孔隙比、液限的变异系数一般; 塑限、压缩模量、压缩系数、黏聚力、内摩擦角、标贯击数等的变异系数较大。

(2) 粉质黏土的饱和度平均值为 93%, 变异系数 ≤ 0.05 , 说明苏通大桥工程区的粉质黏土基本处于饱和状态。

(3) 粉质黏土的土颗粒比重平均值为 2.72, 变异系数为 0, 临近工程无试验数据时, 可直接选用 2.72 这一数值; 天然密度的平均值为 1.824 g/cm^3 , 变异系数 ≤ 0.03 ; 天然含水量的平均值为 34.14%, 变异系数一般为 0.08; 天然孔隙比的平均值为 1.004, 变异系数 ≤ 0.09 ; 液限的平均值为 34.37, 变异系数一般为 0.08。

(4) 塑限、压缩模量、压缩系数、黏聚力、内摩擦角、标贯击数等的变异系数较大, 为 0.09~0.37。对这几个指标取值时, 应考虑其变异性, 不宜直接采用平均值, 而应根据指标的变化情况, 取加权平均值。

4 粉质黏土物理力学指标之间的相关性

岩土参数间相关关系的研究是岩土力学研究的重要内容^[15~17]。苏通大桥工程区水下软黏土沉积环境相近, 其成分和结构基本相同, 物理力学指标之间存在很好的内在规律性。本文采用数理统计方法, 对试样指标进行回归分析, 得出了具有很好工程意

表 1 粉质黏土在地层中的分布
Table 1 Distribution of silty clay in strata

地层层序	岩土一般特征	分布特征	地层层序	岩土一般特征	分布特征
1-1 粉砂、粉质砂土	灰色, 软塑~硬塑, 局部为粉砂, 含云母碎片	在港区专用桥、南引桥完全缺失	8-3 粉质黏土、黏土	灰色~灰褐色, 夹粉砂薄层, 局部呈千层饼状	呈透镜体状分布
1-2 粉砂夹粉质黏土	灰色	在北引桥区呈透镜体状分布	9 黏土、粉质黏土	蓝灰色, 灰色, 黄褐色, 含钙质结核, 粒径 10~50 mm	分布稳定
1-3 粉砂	青灰色, 土质均匀, 夹粉质黏土薄层	单层厚 0.3~3.0 m	10 粉砂、细砂	灰色~青灰色, 局部黄灰色, 土质均匀, 含云母碎片	分布稳定
2 粉质黏土	灰黄色, 稍湿~饱和, 夹粉质砂土	仅分布于南引桥区	11 黏土、粉质黏土	褐黄色, 灰黄色~棕红色, 偶杂蓝灰色条纹, 含钙质及铁锰质结核	该层在 CZK11 号孔及北引桥处缺失
3-1 淤泥质粉质黏土	灰色, 较均质, 局部夹粉质砂土薄层	桥位区分布稳定	12 粉砂、细砂(局部砾砂)	灰色~灰黄色, 土质均匀	
3-2 粉砂	灰色, 局部灰黑色, 夹粉质砂土	单层厚 0.5~1.0 m, 分布稳定	13 粉质黏土	黄灰色~灰绿色, 黄褐色	仅在 CZK4, CZK27 和主桥部分孔出露
4 粉质黏土	灰色, 夹粉砂或粉质砂土, 含腐殖质及泥质结核	桥位区分布较稳定	14 粉质砂土、粉质黏土	灰色, 具水平层理, 夹粉质黏土, 单层厚 0.1~0.3 cm	仅在 CZK4 和主桥部分孔出露
5-1 粉砂细砂	灰色~青灰色, 土质较均匀, 含云母碎片。局部为粉砂与粉质黏土互层	桥位区分布稳定	15 粉细砂	灰色, 级配良好, 局部不良, 黏粒含量较高, 局部为粉质砂土、中砂	仅在 CZK4, CZK27 和主桥部分孔出露
5-2 粉质黏土	灰色~灰黄色, 夹粉质砂土极薄层	仅在南引桥 CZK29 孔处呈透镜体状分布	16 粗砂	灰色, 级配良好, 局部不良, 黏粒含量较高, 夹粉细砂和中砂	仅在 CZK17, CZK21, CZK27 号孔出露
6-1 中粗砂(细砂、砾砂)	灰色, 级配良好, 局部不良, 黏粒含量较高, 含石英质砾石, 局部为含砾细砂	桥位区分布稳定	17 砾砂	灰色~灰白色, 级配不良, 黏粒含量高, 含砾石, 粉质圆形, 粒径 20~50 mm; 局部夹粉细砂, 单层厚 5~20 cm	
6-2 细砂(粉砂)	灰色, 级配不良, 局部夹中粗砂, 偶含砾石	仅在北引桥区分布	18 黏土	灰色, 偶含 20~30 mm 大小的钙质结核	
6-2 粉质黏土夹层			19 粗砂	灰色, 级配良好, 黏粒含量高, 含砾石, 粉质圆形, 粒径 20~50 mm; 局部为砾砂	仅在 CZK27 孔(深孔)出露
7 粉砂、细砂	灰色、青灰色, 级配不良, 含云母碎片, 含少量小砾石	桥位区分布稳定	20 黏土、粉质黏土	灰白色~灰绿色, 265.85m 以深灰黄色~灰褐色, 局部为黏土。含粗砂、砾石和钙质结核, 局部半胶结状, 局部为粉砂	
8-1 中粗砂(砾砂、细砂)	灰色, 级配不良, 含砾石, 局部为含砾细砂	桥位区分布稳定	21 黏土	黄褐、褐黄色, 281.1 m 以深杂锈红色, 含铁锰质结核及钙质结核。296.5 m 以深混灰白色黏土岩碎块, 局部富集	
8-2 粉砂、细砂	灰色, 含少量云母碎片, 局部夹粗砂	桥位区分布稳定			

表2 粉质黏土物理力学指标统计
Table 2 Statistics of physico-mechanical indexes of silty clay

地点	含水量 w								天然密度							
	样本数	最大值/%	最小值/%	平均值/%	标准差	变异系数	修正系数	标准值/%	样本数	最大值/($g \cdot cm^{-3}$)	最小值/($g \cdot cm^{-3}$)	平均值/($g \cdot cm^{-3}$)	标准差	变异系数	修正系数	标准值/($g \cdot cm^{-3}$)
桥位区	247	43.6	21.3	34.30	2.70	0.08	1.01	34.6	250	1.98	1.69	1.82	0.04	0.02	1.00	1.82
北引桥	57	40.2	29.5	33.80	2.31	0.07	1.02	34.4	57	1.91	1.71	1.82	0.05	0.03	0.99	1.81
南引桥	33	37.4	21.3	33.38	2.95	0.09	1.03	34.3	35	1.98	1.71	1.84	0.05	0.03	0.99	1.83
三塔北	20	43.6	30.2	34.60	3.69	0.11	1.04	36.0	20	1.93	1.75	1.81	0.05	0.03	0.99	1.80
三塔南	18	38.6	29.6	34.20	2.30	0.07	1.03	35.2	18	1.92	1.70	1.83	0.05	0.03	0.99	1.81
双塔北	17	39.1	29.4	34.50	2.80	0.08	1.03	35.7	18	1.87	1.69	1.81	0.05	0.03	0.99	1.79
双塔南	25	38.5	30.3	34.20	2.07	0.06	1.02	34.9	25	1.91	1.75	1.84	0.04	0.02	0.99	1.83

地点	颗粒比重 G_s								孔隙比 e							
	样本数	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数	修正系数	标准值	样本数	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数	修正系数	标准值
桥位区	250	2.74	2.68	2.72	0.01	0.00	1.00	2.72	247	1.246	0.656	1.005	0.080	0.080	1.010	1.014
北引桥	57	2.74	2.68	2.72	0.01	0.00	1.00	2.72	57	1.176	0.863	1.006	0.070	0.069	1.016	1.022
南引桥	35	2.74	2.68	2.71	0.01	0.00	1.00	2.71	33	1.092	0.656	0.977	0.080	0.080	1.020	0.999
三塔北	20	2.74	2.72	2.72	0.01	0.00	1.00	2.72	20	1.246	0.778	1.023	0.100	0.090	1.040	1.061
三塔南	18	2.74	2.72	2.72	0.01	0.00	1.00	2.72	18	1.176	0.838	0.997	0.080	0.080	1.030	1.031
双塔北	18	2.74	2.72	2.73	0.01	0.00	1.00	2.72	18	1.230	0.915	1.035	0.090	0.090	1.040	1.073
双塔南	25	2.72	2.68	2.72	0.01	0.00	1.00	2.71	25	1.076	0.889	0.984	0.060	0.060	1.020	1.003

地点	饱和度 S_r								液限 w_L							
	样本数	最大值/%	最小值/%	平均值/%	标准差	变异系数	修正系数	标准值/%	样本数	最大值/%	最小值/%	平均值/%	标准差	变异系数	修正系数	标准值/%
桥位区	250	100	74	93	4.20	0.05	1.00	93	221	44.20	25.60	34.40	2.86	0.08	1.01	34.7
北引桥	57	100	81	92	4.43	0.05	1.01	93	56	39.10	25.60	33.59	2.78	0.08	1.02	34.2
南引桥	35	99	74	93	4.11	0.04	1.01	94	27	37.80	30.40	33.60	2.30	0.07	1.02	34.3
三塔北	20	97	83	92	4.10	0.04	1.02	94	15	36.90	27.30	33.30	2.51	0.08	1.03	34.4
三塔南	18	99	82	94	4.53	0.05	1.02	96	14	39.00	30.20	35.00	2.41	0.07	1.03	36.1
双塔北	18	99	85	92	4.29	0.05	1.02	94	14	43.10	31.80	36.70	3.58	0.10	1.05	38.4
双塔南	25	100	84	94	4.00	0.04	1.01	96	22	38.80	31.40	34.80	2.04	0.06	1.02	35.6

地点	塑限 w_p								压缩系数 a_{1-2}							
	样本数	最大值/%	最小值/%	平均值/%	标准差	变异系数	修正系数	标准值/%	样本数	最大值/(MPa^{-1})	最小值/(MPa^{-1})	平均值/(MPa^{-1})	标准差	变异系数	修正系数	标准值/(MPa^{-1})
桥位区	221	30.0	17.2	22.6	2.65	0.12	0.99	22.3	231	0.78	0.17	0.36	0.11	0.31	1.03	0.37
北引桥	56	28.0	17.2	21.9	2.60	0.12	0.97	21.3	61	0.59	0.19	0.35	0.12	0.33	1.07	0.38
南引桥	27	26.9	19.1	23.4	1.98	0.08	0.97	22.7	36	0.44	0.17	0.30	0.07	0.23	1.07	0.32
三塔北	15	24.6	19.4	21.8	1.40	0.06	0.97	21.1	18	0.62	0.17	0.42	0.13	0.30	1.12	0.48
三塔南	14	26.8	18.8	21.7	2.10	0.10	0.95	20.7	16	0.41	0.25	0.32	0.05	0.17	1.07	0.34
双塔北	14	26.8	19.1	21.3	1.91	0.09	0.96	20.3	13	0.78	0.32	0.46	0.11	0.24	1.12	0.52
双塔南	22	27.2	19.4	22.2	1.69	0.08	0.97	21.6	20	0.42	0.22	0.34	0.06	0.19	1.07	0.36

地点	压缩模量 E_s								黏聚力							
	样本数	最大值/MPa	最小值/MPa	平均值/MPa	标准差	变异系数	修正系数	标准值/MPa	样本数	最大值/kPa	最小值/kPa	平均值/kPa	标准差	变异系数	修正系数	标准值/kPa
桥位区	231	10.74	2.60	5.88	1.69	0.29	0.97	5.69	121	36.00	9.00	19.00	5.81	0.31	0.95	18.00
北引桥	61	9.92	3.08	5.95	1.81	0.30	0.93	5.55	27	30.00	10.00	18.00	5.71	0.31	0.90	16.00
南引桥	36	10.74	4.32	6.68	1.59	0.24	0.93	6.22	18	28.00	10.00	17.00	4.68	0.28	0.88	14.70
三塔北	18	10.29	3.02	5.04	1.84	0.37	0.85	4.27	5	23.00	9.00	17.00				
三塔南	16	7.80	4.77	6.19	0.90	0.15	0.94	5.78	11	28.00	11.00	19.00	5.96	0.31	0.83	16.00
双塔北	13	6.28	2.60	4.39	0.91	0.21	0.90	3.93	6	36.00	16.00	23.00	8.09	0.35	0.71	17.00
双塔南	20	8.73	4.44	5.88	1.29	0.22	0.91	5.38	17	30.00	9.00	21.00	6.22	0.29	0.87	19.00

地点	内摩擦角								标贯击数							
	样本数	最大值/(°)	最小值/(°)	平均值/(°)	标准差	变异系数	修正系数	标准值/(°)	样本数	最大值/击	最小值/击	平均值/击	标准差	变异系数	修正系数	标准值/击
桥位区	121	29.30	2.90	17.90	6.37	0.35	0.94	17.00	192	52.00	5.00	16.40	8.71	0.53	0.93	15.00
北引桥	27	29.30	4.60	18.40	6.67	0.36	0.88	16.20	43	46.00	7.00	19.00	10.17	0.53	0.86	16.40
南引桥	18	27.30	7.40	20.40	4.98	0.24	0.90	18.30	34	27.00	2.00	13.00	6.29	0.49	0.86	11.00
三塔北	5	23.10	8.30	16.70					12	42.00	8.00	17.00	10.87	0.63	0.67	11.50
三塔南	11	24.20	12.80	18.60	4.35	0.23	0.87	16.20	13	17.00	9.00	12.00	2.29	0.19	0.90	10.80
双塔北	6	19.30	8.50	14.30	5.28	0.37	0.69	9.90	8	11.00	7.00	9.00	1.19	0.14	0.91	7.80
双塔南	17	27.70	9.10	15.70	5.86	0.37	0.84	13.20	24	24.00	8.00	14.00	4.45	0.31	0.89	12.70

义和使用价值的回归方程式。

4.1 物理指标之间的相关性

天然含水量、天然密度和土颗粒比重 3 个指标可以直接测定。苏通大桥工程区粉质黏土各物理指标间的回归方程及相关系数如下：

(1) 天然孔隙比 - 天然含水量：

$$\left. \begin{aligned} e &= -0.03388 + 0.02984w \\ R &= 0.97659 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(2) 天然孔隙比 - 天然密度：

$$\left. \begin{aligned} e &= 4.20784 - 1.74648\rho \\ R &= -0.97796 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

(3) 天然含水量 - 天然密度：

$$\left. \begin{aligned} w &= 135.21804 - 54.93273\rho \\ R &= -0.93981 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

(4) 塑限 - 天然含水量：

$$\left. \begin{aligned} w_p &= 12.12232 + 9.43815w \\ R &= 0.81406 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

(5) 液限 - 天然含水量：

$$\left. \begin{aligned} w_L &= 33.68222 + 0.00667w \\ R &= 0.01552 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由此可发现，液限 w_L 与天然含水量 w_p 不存在线性关系，塑限 w_p 与天然含水量 w 的相关性较好，而 e 与 w ， ρ 的相关性很好。

根据土的指标换算关系：

$$e = \frac{wG_s}{S_r} \quad (6)$$

由于 S_r ， G_s 的变异性较小，可以分别取 $S_r = 93$ ， $G_s = 2.72$ ，代入式(6)得

$$e = 0.02925w \quad (7)$$

式(7)和(1)很接近，证明式(1)与理论结果是一致的。

因此，对于苏通大桥工程区饱和软黏土，只要测定土样的 w ， ρ ，一般可以利用上述经验公式换算出土的全部三相指标。

4.2 变形指标和物理指标之间的相关性

压缩系数和压缩模量是反映软黏土变形特性的 2 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，建立变形指标和土的物理指标之间的经验关系式，通过物理指标来预测变形指标，是岩土工程师的愿望。

苏通大桥工程区粉质黏土变形指标与物理指标的回归关系式和相关系数如下所述。

(1) 压缩模量 - 天然含水量：

$$\left. \begin{aligned} E_s &= 3.53104 + 294.02611 \exp(-w/6.68484) \\ R &= -0.8785 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

(2) 压缩模量 - 天然孔隙比：

$$\left. \begin{aligned} E_s &= 4.05803 + 454.6004 \exp(-e/0.16559) \\ R &= -0.8956 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

(3) 压缩模量 - 天然密度：

$$\left. \begin{aligned} E_s &= 3.93587 + 6.6 \times 10^{-9} \exp(\rho/0.097) \\ R &= 0.9156 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

(4) 压缩系数 - 天然含水量：

$$\left. \begin{aligned} a_{1-2} &= -0.30567 + 0.01994w \\ R &= 0.89347 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

(5) 压缩系数 - 天然孔隙比：

$$\left. \begin{aligned} a_{1-2} &= -0.2795 + 0.66402e \\ R &= 0.90913 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

(6) 压缩系数 - 天然密度：

$$\left. \begin{aligned} a_{1-2} &= 2.58658 - 1.19702\rho \\ R &= -0.91772 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

(7) 压缩系数 - 塑限：

$$\left. \begin{aligned} a_{1-2} &= -0.49371 + 0.0385w_p \\ R &= 0.61109 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

(8) 压缩系数 - 液限：

$$\left. \begin{aligned} a_{1-2} &= 0.32725 - 0.00145w_L \\ R &= -0.02796 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

压缩模量与物理指标的关系曲线见图 1，压缩系数与物理指标的关系曲线见图 2。由式(8)~(15)及图 1，2 可发现，压缩模量、压缩系数与天然孔隙比、天然含水量、天然密度的相关性较好，相关系数达 0.87 以上；压缩模量与物理指标的关系为指数相关，而压缩系数与物理指标的关系为线性相关；

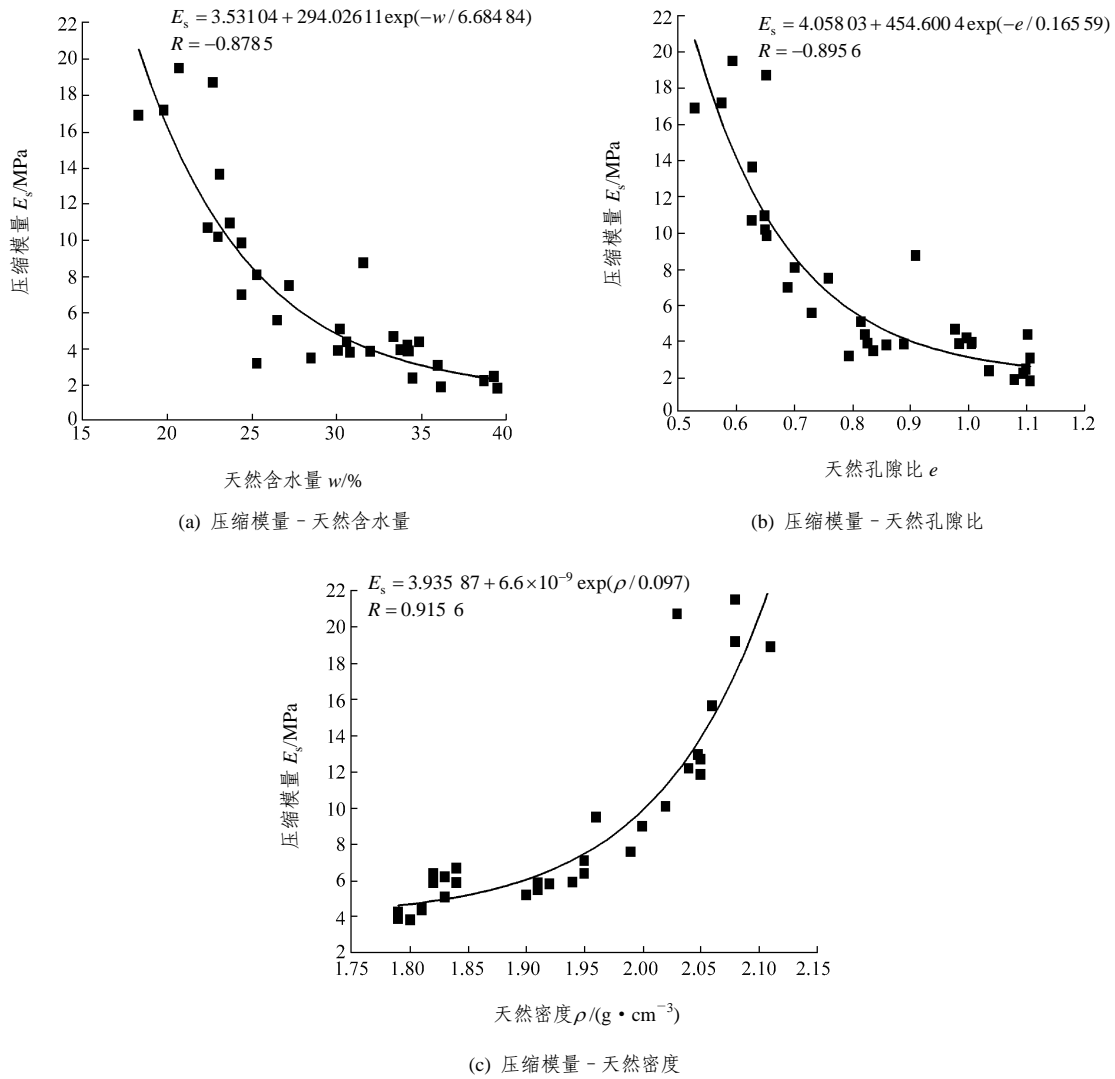
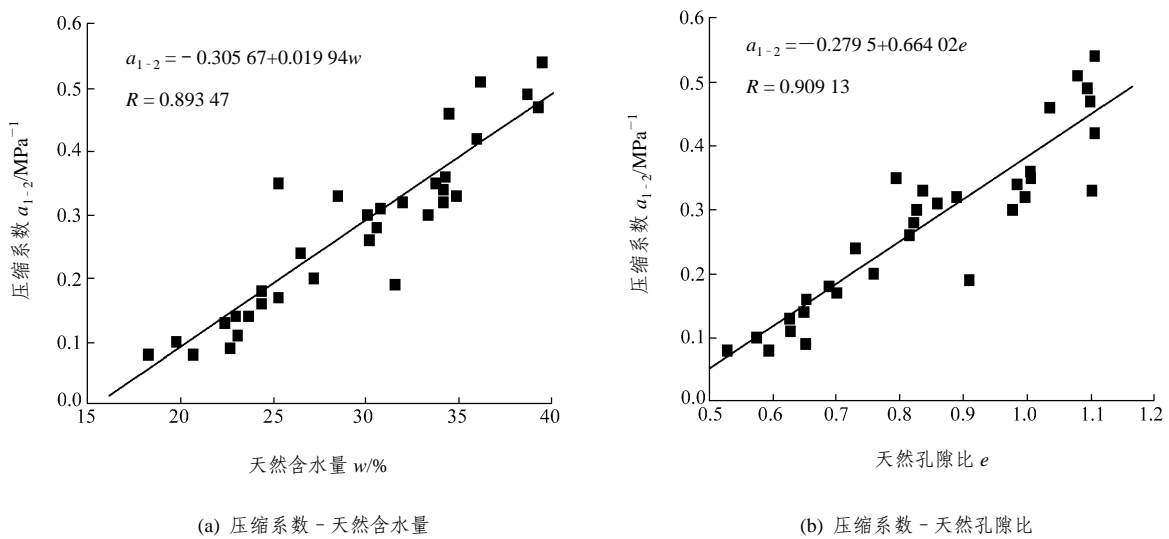


图1 压缩模量与物理指标关系曲线

Fig.1 Relation curves between compressive moduli and physical indexes



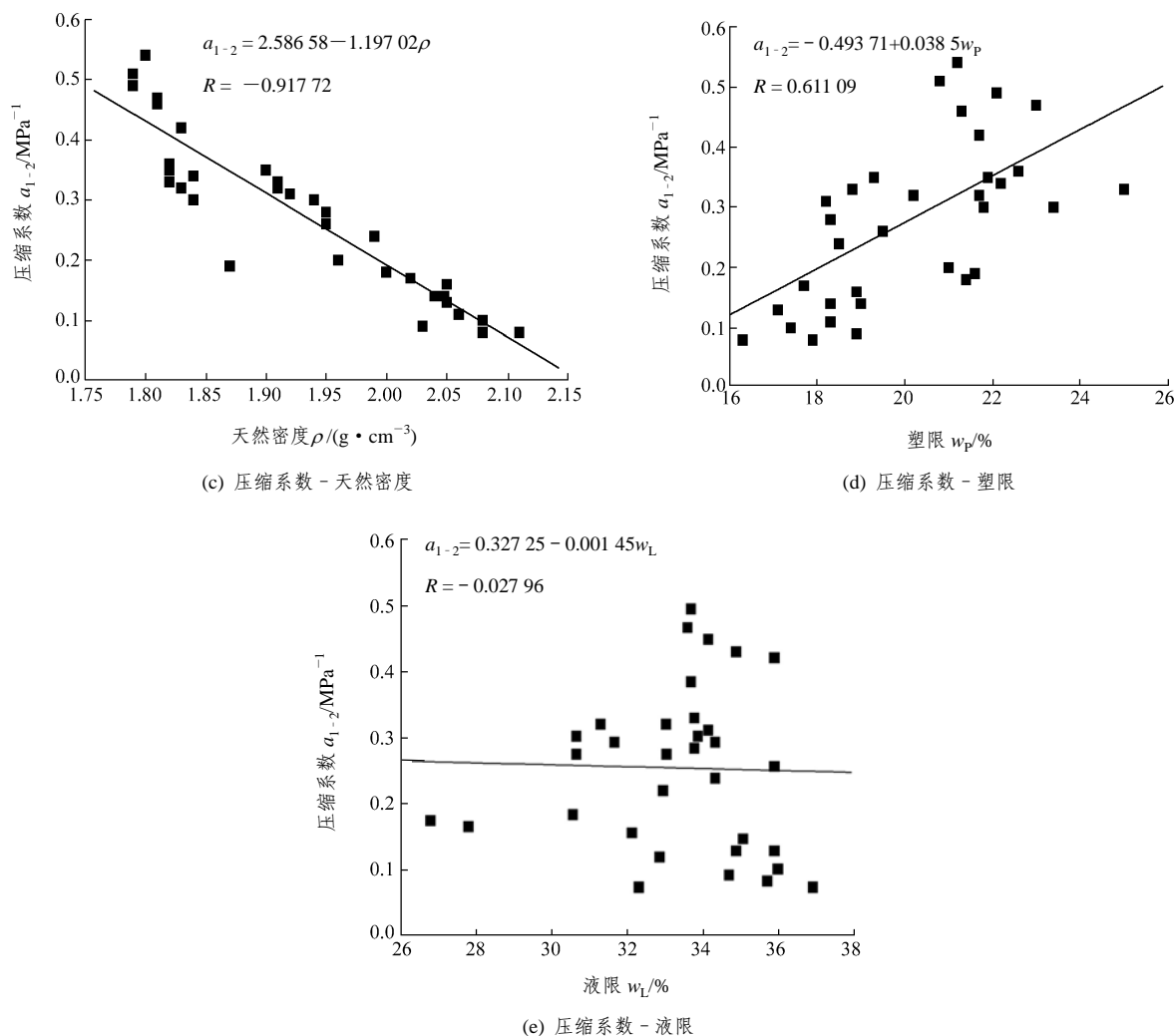


图 2 压缩系数与物理指标关系曲线

Fig.2 Relation curves between compressive coefficients and physical indexes

压缩系数与液限不存在相关关系，但压缩系数与塑限存在相关关系，相关系数为 0.611 09。

5 结 论

通过以上对苏通大桥水下粉质黏土工程特性的分析，可得出如下结论：

(1) 苏通大桥工程区地基土中，粉质黏土的分布在面上和空间上都是最广泛的。

(2) 在苏通大桥工程区，粉质黏土的不同指标的变异系数差别较大。土颗粒比重、天然密度、饱和度的变异系数较小；天然含水量、天然孔隙比、液限的变异系数一般；塑限、压缩模量、压缩系数、黏聚力、内摩擦角、标贯击数等的变异系数较大。

(3) 液限 w_L 与天然含水量 w 不在线性关系，塑限 w_p 与天然含水量 w 的相关性较好，而 e 与 w ，

ρ 的相关性很好。对于苏通大桥工程区饱和软黏土，只要测定土样的 w ， ρ ，一般可以利用经验公式(式(1)~(7))换算出土的全部三相指标。

(4) 压缩模量、压缩系数与天然孔隙比、天然含水量、天然密度的相关性较好，相关系数达 0.87 以上。

(5) 压缩系数与液限不存在相关关系，但压缩系数与塑限存在相关关系，相关系数为 0.611 09。

参考文献(References):

[1] 林奕禧, 艾康洪, 黄良机. 珠海地区软土的工程特性及工程建设问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 3 372 - 3 376.(LIN Yixi, AI Kanghong, HUANG Liangji. Issues of engineering characteristics and engineering construction of soft clay in Zhuhai region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3 372 - 3 376.(in Chinese))

- [2] 陈晓斌, 张家生, 封志鹏. 红砂岩粗粒土流变工程特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 601 - 607.(CHEN Xiaobin, ZHANG Jiasheng, FENG Zhipeng. Experimental study on rheological engineering properties of coarsely granular red sandstone soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 601 - 607.(in Chinese))
- [3] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 等. 基于孔压静力触探的连云港海相黏土的固结和渗透特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 846 - 852.(CAI Guojun, LIU Songyu, TONG Liyuan, et al. Study on consolidation and permeability properties of Lianyungang marine clay based on piezocone penetration test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 846 - 852.(in Chinese))
- [4] 熊玉春, 房营光, 徐国辉. 软黏土的动力损伤模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 3152 - 3156.(XIONG Yuchun, FANG Yingguang, XU Guohui. A dynamic damage model and its application to soft clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 3152 - 3156.(in Chinese))
- [5] 李又云, 刘保健, 谢永利. 软土结构性对渗透及固结沉降的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 3587 - 3592.(LI Youyun, LIU Baojian, XIE Yongli. Influences of permeability and consolidation settlement on structure of soft clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3587 - 3592.(in Chinese))
- [6] 况勇, 朱永全, 贾晓云. 上海地铁2#线淤泥质地层地铁隧道浅埋暗挖施工技术方案研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 2946 - 2951.(KUANG Yong, ZHU Yongquan, JIA Xiaoyun. Study on construction technique scheme of shallow embedded tunnel of Shanghai subway #2 line in silty stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 2946 - 2951.(in Chinese))
- [7] 江苏省水文地质工程地质勘察院. 苏通长江公路大桥工程地质勘察报告[R]. 淮阴: 江苏省水文地质工程地质勘察院, 2000.(Jiangsu Province Institute of Hydrogeological and Engineering Geological Investigation. Reconnaissance report on engineering geology of Suzhou—Nantong highway bridge on the Yangtze River[R]. Huaiyin: Jiangsu Province Institute of Hydrogeological and Engineering Geological Investigation, 2000.(in Chinese))
- [8] 南京大学地球科学系. 苏通长江公路大桥工程可行性阶段工程地质综合研究报告[R]. 南京: 南京大学地球科学系, 2000.(Department of Earth Sciences, Nanjing University. Synthetical study report on engineering geology of Suzhou—Nantong highway bridge on the Yangtze River in feasibility study phase[R]. Nanjing: Department of Earth Sciences, Nanjing University, 2000.(in Chinese))
- [9] 南京大学地球科学系. 苏通长江公路大桥工程初步设计阶段地层分类与设计参数专题研究报告[R]. 南京: 南京大学地球科学系, 2002.(Department of Earth Sciences, Nanjing University. Study report on stratum classification and design parameters of Sutong highway bridge on the Yangtze River in elementary design study phase[R]. Nanjing: Department of Earth Sciences, Nanjing University, 2002.(in Chinese))
- [10] 凌贤长, 徐学燕, 邱明国, 等. 冻结哈尔滨粉质黏土动三轴试验 CT 检测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1244 - 1249.(LING Xianchang, XU Xueyan, QIU Mingguo, et al. Study on CT scanning of Harbin frozen silty clay before and after dynamic triaxial test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1244 - 1249.(in Chinese))
- [11] 刘亚群, 林长青, 李海波, 等. 对现行规范以液性指数 I_L 确定极限端阻力标准值 q_{pk} 的质疑[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 246 - 248.(LIU Yaqun, LIN Changqing, LI Haibo, et al. Inquiry on determination of soil standard value of ultimate bearing capacity of end of piles by liquid index in technical code for building pile foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 246 - 248.(in Chinese))
- [12] 李军世, 林咏梅. 上海淤泥质粉质黏土的 Singh-Mitchell 蠕变模型[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 363 - 366.(LI Junshi, LIN Yongmei. Singh-Mitchell creep model of Shanghai very soft silt clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(4): 363 - 366.(in Chinese))
- [13] 崔新壮, 丁桦. 粉质黏土中的刚性桩在横向荷载作用下失稳的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1744 - 1748.(CUI Xin Zhuang, DING Hua. Experimental study on instability of rigid piles under lateral loads in silty clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1744 - 1748.(in Chinese))
- [14] 赵有明, 江辉煌, 张惠明. 深圳地区软黏土变形参数研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(3): 40 - 43.(ZHAO Youming, JIANG Huihuang, ZHANG Huiming. Deformation parameters of Shenzhen soft clay[J]. China Railway Science, 2004, 25(3): 40 - 43.(in Chinese))
- [15] 许建聪, 尚岳全, 王建林. 松散土质滑坡位移与降雨量的相关性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 2854 - 2860.(XU Jiancong, SHANG Yuequan, WANG Jianlin. Study on relationship between slope-mass slide displacement and precipitation of loose soil landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 2854 - 2860.(in Chinese))
- [16] 程国勇, 王建华, 张献民. 饱和砂土的剪切波速与其抗液化强度关系研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 689 - 693.(CHENG Guoyong, WANG Jianhua, ZHANG Xianmin. Experimental study on quantitative relationship between shear wave velocity and cyclic liquefaction resistance of saturated sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4): 689 - 693.(in Chinese))
- [17] 刘江平, 罗银河, 张英德. 黏土动、静弹性模量相关性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 427 - 432.(LIU Jiangping, LUO Yinhe, ZHANG Yingde. Test research on relativity between dynamic and static elastic modulus of clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 427 - 432.(in Chinese))