维普资讯 http://www.cqvip.com

1004-9665/2003/11(03)-0250-08 *Journal of Engineering Geology* 工程地质学报

连云港海相软土工程特性及处治方法探讨*

章定文 刘松玉 于新豹
(东南大学岩土工程研究所 南京 210096)

摘 要 根据连云港地区历年来多项工程的地质资料,并与我国部分沿海地区软土进行对比,系统分析了连云港海相软土的基本物理力学性质指标统计特征,特别是抗剪强度特性、固结变形特性和蠕变特性,并总结了该地区海相软土主要物理力学性质指标之间的相关关系,最后介绍了适合于海相软土的地基处理措施。

关键词 土力学 海相软土 抗剪强度 固结变形 蠕变 回归分析 地基处理
中图分类号:TU447 **文献标识码**:A

DISCUSSION ON THE ENGINEERING CHARACTERISTICS OF MARINE SOFT SOIL AND METHOD FOR ITS TREATMENT IN LIANYUNGANG

ZHANG Dingwen LIU Songyu YU Xingbao
(*Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing* 210096 *China*)

Abstract From the engineering – geological data of marine soft soil in Lianyungang, statistical characteristics of physical and mechanical indexes of marine soft soil in study region are analyzed systematically in comparison with physical and mechanical indexes of soft soil in other coastal regions of China, and then the characteristics of shear strength, consolidation deformation and creep of the marine soft soil are studied. The relationship between these indexes are obtained by using linear regression analysis. Finally, some methods for treatment of the soil are put forward.

Key words Soil mechanics, Jiangsu marine clay, Shear strength, Consolidation deformation, Creep, Regression analysis, Soil improvement

1 引 言

近年来,随着软土地基加固及开挖技术的迅速发展,饱和软粘土的物理力学特性的研究受到了极大的重视。连云港地区广泛分布海相软土层,本文基于对连云港地区连徐高速公路、汾灌高速公路、连盐高速公路以及连云港市区历年来多项工程的地质资料,并与我国部分沿海地区软土进行对比,系统分析了连云港海相软土的基本物理力学性质指标分布特征,特别是抗剪强度特性、固结变形特性和蠕变特性,然后在此基础上采用线性回归分析方法,总结了该地区海相软土主要物理力学性质指标之间的相关关系,最后介绍了适合于海相软土的地基处理措施。

2 连云港海相软土的工程性质特性

2.1 连云港海相软土成因及分布规律[1,2]

连云港地区位于鲁中南丘陵与淮北平原的结合

* 收稿日期:2003-05-15;收到修改稿日期:2003-06-18.
第一作者简介:章定文,男,硕士研究生,岩土工程专业,主要从事软基加固方面的研究. Email:dwzhang0123@163.com

维普资讯 http://www.cqvip.com

部，整个地势自西北向东南倾斜，平均海拔高度1～4m，密布大中小河流和渠道。在第四纪广泛沉积了一套以海积作用为主，以冲海积、残坡积为辅的灰～灰绿色流塑淤泥及淤泥质粘土（图1）。冲海积软土层，多见有粉土、粉砂薄层，具（水平交错）不规则交错层理，呈薄饼状，同时夹层见有典型冲积形成的褐色粘土薄层，粘粒含量中等；海积软土呈灰—灰绿色，见有少量不规则交错层理，粘粒（<0.005mm）含量较高，超过60%。

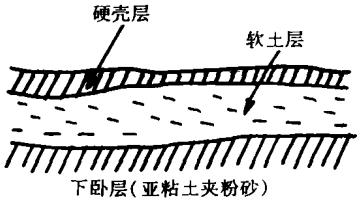


图1 连云港软土典型工程地质纵断面示意图

Fig. 1 Typical longitudinal engineering – geological profile across soft soil layer in Lianyungang

2.2 连云港海相软土基本物理力学性质指标

表1列出了连云港海相软土的主要物理力学性质指标，表2是我国部分沿海地区软土的物理力学性质指标[3~5]，综合上述表中的统计成果，对连云港海相软土的工程特性有以下认识：

（1）连云港海相软土具有高含水量、高液限、低密度、低强度、高压缩性、高灵敏度等特点。特别是含水量（w = 37.1% ～ 87.4%）、孔隙比（e = 1.041 ～ 2.173）、液限（w_L = 28.4% ～ 66.7%）、压缩系数（a_{1-2} = 0.4 ～ 2.88MPa^{-1}）都比大部分沿海软土高，因此连云港海相软土的压缩沉降量大，排水固结缓慢，地基稳定性差。

（2）各个指标的变异系数都不随统计单元变化，而是随着指标类型不同，各类指标的变异系数有所差异。含水量、孔隙比的变异系数一般在20%左右，压缩指标及剪切指标的变异系数一般在30% ～ 40%左右，固结系数的变异系数达到90%，变异系数较大时对指标的取值已有一定的影响。

2.3 连云港海相软土抗剪强度特征

室内外试验结果表明：连云港海相软土的抗剪强度指标在浅部（<3 m）比较离散，大于3 m后指标变化规律性明显，静力触探（CPT）、十字板、无侧限抗压强度试验确定的力学指标明显随深度增加而增加，线性关系显著。十字板抗剪强度随深度的回归方程为：

$$c_u = 1.571h + 5.50(\text{kPa}) \quad (h > 3.0\ \text{m}) \tag{1}$$

表1 连云港海相软土的物理力学性质指标

Table 1 Indices of physical and mechanical properties of marine soft soil in Lianyungang

项目	含水量/（%）	孔隙比 e	饱和度/（%）	液限/（%）	塑限/（%）	塑性指数	液性指数	固结系数 10^{-3}cm^2·s^{-1}	压缩系数/MPa^{-1}	凝聚力（固快）/kPa	摩擦角（固快）/（°）
平均值	58.7	1.598	98.8	49.36	25.38	23.98	1.417	0.584	1.339	10.25	4.95
最大值	87.4	2.173	100	66.7	34.7	33.5	2.36	2.234	2.88	18	8
最小值	37.1	1.041	95	28.4	18.9	9.5	1.01	0.1	0.40	2.7	1.4
标准差	10.6	0.250	1.169	8.721	3.608	5.607	0.278	0.524	0.504	3.525	1.485
变异系数/（%）	18.1	15.65	1.18	17.66	14.22	23.38	19.62	89.67	37.63	37.38	30.04
统计个数	97	97	97	97	97	97	97	81	97	68	68

2.4 连云港海相软土固结变形特征

不同深度海相软土的压缩模量与压力关系曲线见图2。可见：压缩模量 E_s 随应力水平的增大而增大，并且基本呈线性增长，曲线的斜率较大。在低应力水平下，土的压缩模量很小，随着应力水平的增加，模量增加很快。这表明连云港软土的具有很低的承载力，但是经过预压之后，其承载能力能够获得较大的提高。从图2中还可以看出，各深度的压缩模量与压力关系曲线基本重合，表明其变形特性的相似性质。

固结系数与荷载的关系见图3，一般来说，固结系数随荷载的增大而减小，反映出土体在高应力水平下，土的孔隙比减少、渗透性变弱，固结速度将会

维普资讯 http://www.cqvip.com

变慢。软土层的这一变形特性,对于地基的沉降分析预测具有重要意义。

表 2 我国部分沿海地区软土的物理力学性质指标[3-5]

Table 2 Indices of physical and mechanicalproperties of soft soil in some coastal regions of China

地区	土层埋深/m	含水量/(%)	重度/kN·m^{-3}	孔隙比	饱和度/(%)	液限/(%)	塑限/(%)	塑性指数	渗透系数/cm·s^{-1}	压缩系数/MPa^{-1}	凝聚力 c/kPa	摩擦角/(°)
天津	7~14	34	18.2	0.97	95	34	19	17	1×10^{-7}	0.51	3~14	2~7
塘沽	8~17	47	17.7	1.31	99	42	20	22	2×10^{-7}	0.97	17	4
	17~24	39	18.1	1.07	96	34	19	15		0.65		
上海	1.5~6	37	17.9	1.05	97	34	21	13	2×10^{-6}	0.72	6	18
	6~7	50	17.2	1.37	98	43	23	20	6×10^{-7}	1.24	5	15
杭州	3~9	47	17.3	1.34	97	41	22	19		1.30	6	14
	9~19	35	18.4	1.02	99	33	18	15		1.17		
宁波	2~12	50	17.0	1.42	97	39	22	17	3×10^{-8}	0.95	10	1
	12~28	38	18.6	1.08	94	36	21	15	7×10^{-8}	0.72		
舟山	2~14	45	17.5	1.32	99	37	19	18	7×10^{-6}	1.10		
	17~32	36	18.0	1.03	97	34	20	14	3×10^{-7}	0.65		
温州	1~35	63	16.2	1.79	99	53	23	30		1.93	5	12
福州	3~19	68	15.0	1.87	98	54	25	29	8×10^{-8}	2.03	1~15	10~15
	19~25,1~3	42	17.1	1.17	95	41	20	21	5×10^{-7}	0.70		
广州	0.5~10	73	16.0	1.82	99	46	27	19	3×10^{-6}	1.18		
连云港	1.7~19	58.7	16.4	1.60	99	49	25	24		1.34	10*	5*

*为固结快剪强度指标

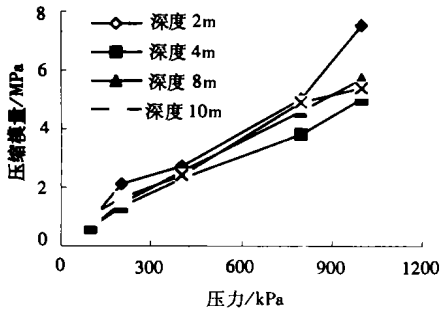


图 2 压缩模糊量 E_s 与压力关系图

Fig. 2 Moeulus of compresibility vs vertical pressure

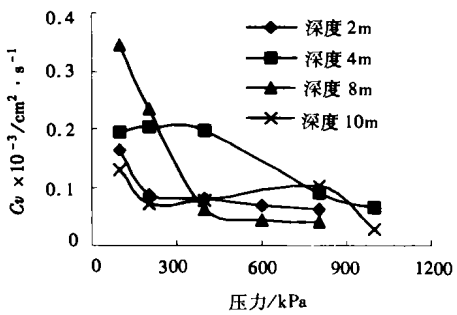


图 3 固结系数 C_v 与竖直压力关系图

Fig. 3 Consolidation coefficient vs vertiacl pressure

2.5 连云港海相软土蠕变特征

通过海相软土的室内多级一维固结蠕变试验,得出了不同应力条件下的软土随时间的变形发展规律,求出各种蠕变参数,来评价连运港软土的蠕变特性。这为模拟连云港海相软土在多级堆载预压下的变形规律,正确地预测地基沉降随时间的变化规律提供了科学的依据。

由等时曲线(图 4)和不同深度土样的应变和$\sqrt{t}$曲线图(图 5,图 6),可以分析得到如下蠕变特性:

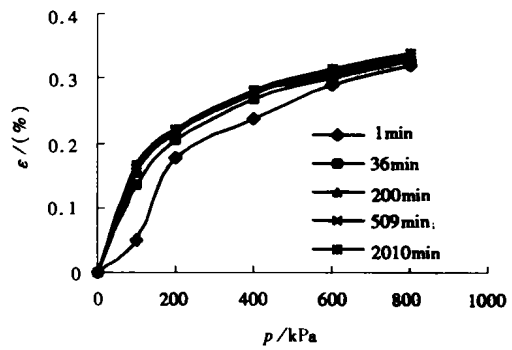


图 4 不同时刻的应力应变关系

Fig. 4 Variation of strain with stress at different times

(1)不同时刻的应力—应变曲线是不同的,而

维普资讯 http://www.cqvip.com

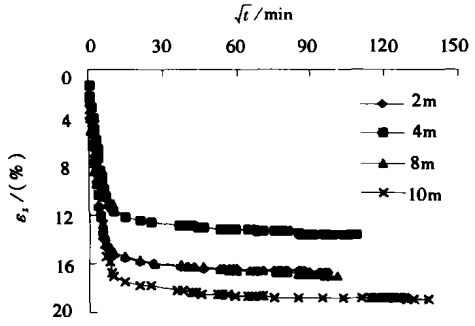


图5 100kPa下轴向应变与时间曲线

Fig. 5 Variation of axial strain with time at stress of 100 kPa

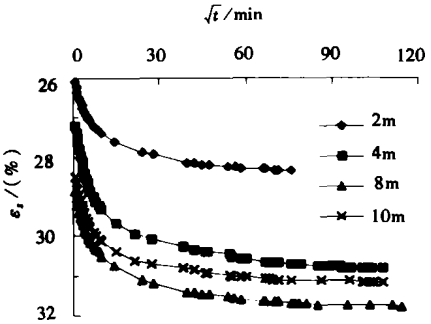


图6 600kPa下轴向应变与时间曲线

Fig. 6 Variation of axial strain with time at stress of 600 kPa

且一般均不是直线，为一簇曲线，说明蠕变是非线性的，与时间相关的，且不可逆。

(2)应力—应变等时曲线有一明显拐点式转折点，可以认为与此转折点相对应的应力水平即为屈服应力。当应力水平小于此屈服应力时，土体为粘弹性体，处于弹性流变阶段；大于屈服应力时，为粘塑性体，处于塑性流变阶段；土体粘弹性阶段近似是线性的，且时间较短，较快就进入粘塑性阶段，所以软土的粘塑性应变占总应变的主要部分。

(3)当应力水平较低时，蠕变是衰减稳定的，最终的变形是一常数。在这种情况下，蠕变变形较小，而且较快能达到稳定值。当应力水平较大时，蠕变成为非稳定的等速蠕变。

软土次固结系数的准确测定是一项费时费力的工作，因此，用其他易于测定的量来估算次固结系数的大小是一项有实际意义的课题。一些学者常根据压缩系数 C_c 来估算次固结系数 C_a。连云港海相软土次固结系数与压缩系数的比值 C_a/C_c 为0.018，这比国内外的一些统计结果稍小。Mesri 和 Castro[6] (1987)发现对于许多种类的土来说 C_a/C_c 的比值的取值范围在0.02～0.1之间。

3 连云港海相软土物理力学性质指标的相互关系

3.1 天然含水量 w 与孔隙比 e 的关系

连云港海相软土孔隙 e 比与天然含水量 w 之间的关系见图7。根据最小二乘法原理，对其进行线性回归分析(样本数97个，R =0.99)，得到回归方程为：

$$e = 2.65w + 0.089 \quad (w = 35\% \sim 90\%) \quad (2)$$

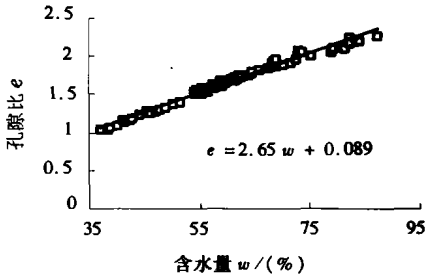


图7 孔隙比与含水量的关系曲线

Fig. 7 Relationship between void ratio and water content

根据孔隙比的定义，$e = d_s/S_r$，对于饱和软粘土 S_r = 100%，而 d_s = 2.65 ～ 2.75 之间，因此 e/w 的理论值大致在2.65 ～ 2.75 之间。从图7中可以看出，该地区海相软土 e/w 的统计值为2.65，与理论值吻合。

表3[7～10]列出了不同学者对国内不同地区软土孔隙比 e 与天然含水量 w 的回归方程。不难发现它们具有极大的相似性，反映了软土的这两项基本物理性质具有明显关系。

3.2 天然含水量 w 与湿密度 ρ 的关系

图8是连云港地区海相软土天然含水量 w 与湿密度 ρ 的关系曲线，其回归方程(样本数97个，R = 0.97)为：

$$\rho = -0.7w + 2.07 \quad (w = 35\% \sim 90\%) \quad (3)$$

对于饱和软粘土 Sr =100%，有

$$\rho = (1 + w)d_s/(1 + d_s w) \quad (4)$$

理论关系式(4)中 d_s 分别取2.65和2.75，将

维普资讯 http://www.cqvip.com

它们与统计曲线画在同一坐标体系中,可以发现两者比较吻合(图8)。

表3 国内部分地区软土孔隙比与天然含水量的回归方程

Table 3 Regression equations for relation between void ratio and water content in soft soil in some regions

研究者	回归方程	统计地区
冯秀丽等	$e = 2.73w + 0.027$	现代黄河水下三角洲
梁国钱等	$e = 2.65w + 0.068$	浙江沿海
王海鹏等	$e = 2.74w - 0.013$	厦门港湾
陈慕杰	$e = 2.40w + 0.160$	汕头市区
本文作者	$e = 2.65w + 0.089$	江苏连云港地区

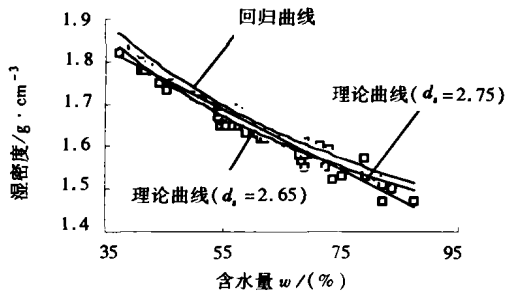


图8 湿密度与含水量的关系曲线

Fig. 8 Relationship between density and water content

3.3 天然含水量 w 与粘聚力 c_{cq} 的关系

土体天然含水量 w 的增加会引起土粒间水膜的厚度增大,甚至增加自由水,土粒间分子引力减弱,土体的粘聚力 c_{cq} 降低,因此土体的粘聚力 c_{cq} 和天然含水量 w 之间具有一定的规律性。连云港海相软土的粘聚力 c_{cq} 与天然含水量 w 之间的关系见图9。从图中可见,软土的粘聚力 c_{cq} 随天然含水量 w 的增大而降低,呈较好的线性关系(样本数68个,R =0.94),其回归曲线方程为:

$$\left.\begin{aligned} c_{cq} &= -32.8w + 29.6 \\ (w &= 35\% \sim 90\%) \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

3.4 天然含水量 c 与摩擦角 φ 的关系

随着土体天然含水量 w 的增加,土粒间水膜的厚度不断增大,水分在土粒表面形成润滑剂,同时极性颗粒间的引力减少,从而土体摩擦角 φ 值降低。图10是连云港海相软土的摩擦角 φ_{cq} 与天然含水量 w 之间的关系曲线。可见,摩擦角 φ_{cq} 随天然含水量 w 的增大呈降低的趋势,两者具有一定的相关性(样本数68个,R =0.89),拟和方程表达式是:

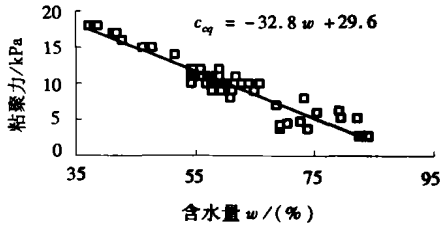


图9 粘聚力与含水量的关系曲线

Fig. 9 Relationship between cohension and water content

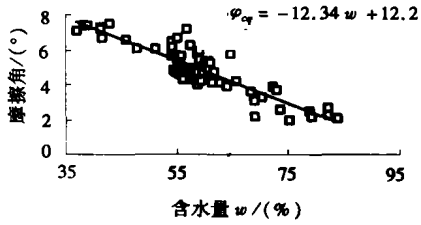


图10 摩擦角与含水量的关系曲线

Fig. 10 Relationship between friction and water content

$$\left.\begin{aligned} \varphi &= -12.34w + 12.2 \\ (w &= 35\% \sim 90\%) \end{aligned}\right\} \quad (6)$$

3.5 天然含水量 w 与压缩系数 a_{1-2} 的关系

连云港海相软土的压缩系数 a_{1-2} 与天然含水量 w 之间的关系见图11,两者基本呈线性关系(样本数97个,R =0.91),回归方程为:

$$\left.\begin{aligned} a_{1-2} &= 4.24w - 1.156 \\ (w &= 35\% \sim 90\%) \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

表4[9~11]列出了不同学者对国内不同地区软土压缩系数 a_{1-2} 与天然含水量 w 的回归方程。

表4 国内部分地区软土压缩系数 a_{1-2} 与天然含水量 w 的回归方程

Table 4 Regression equations for relation between compression coefficient and water content in soft soil in some regions

研究者	回归方程	统计地区
白冰等	$a_{1-2} = 3.36w - 0.7$	湖北仙桃
陈慕杰	$a_{1-2} = 3.62w - 0.808$	汕头市区
梁国钱等	$a_{1-2} = 4.31w - 1.006$	浙江沿海
本文作者	$a_{1-2} = 4.24w - 1.156$	连云港

维普资讯 http://www.cqvip.com

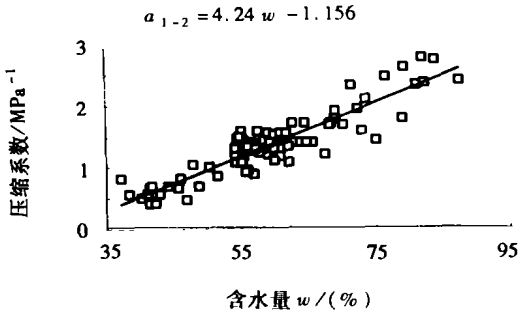


图 11 压缩系数与含水量的关系曲线

Fig. 11 Relationship between compression coefficient and water content

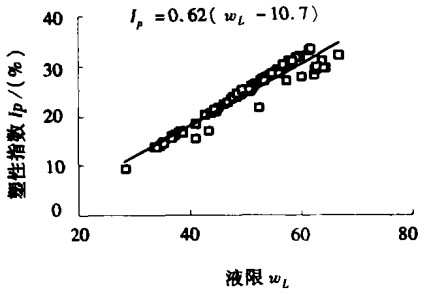


图 12 塑性图

Fig. 12 Plasticity chart

3.6 塑性指数 I_P 与液限 I_L 的关系(塑性图)

连云港海相软土塑性指数与液限的回归方程为：

$$\left.\begin{aligned} I_p &= 0.62(w_L - 10.7) \\ (w &= 35\% \sim 90\%) \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

不同地区土性有一定的差异性，我国部分地区软土塑性指数与液限关系统计见表 5[12~13]。这塑性图和《公路土工试验规程》[14]中的塑性图（$I_p = 0.73(w_L - 20)$）有所区别，这表明不同地区软土的实际塑性图并非完全相同，存在一定差异，因此进行土的分类时应考虑土体的区域性。

表 5 国内部分地区软土塑性指数 I_p 与液限 W_L 的回归方程

Table 5 Regression equations for relation between plasticity index and liquid limit of soft soil in some regions

地区	关系式	地区	关系式
上海	$I_p = 0.78(w_L - 18.2)$	广东沿海	$I_p = 0.56(w_L - 812)$
天津	$I_p = 0.68(w_L - 12.5)$	浙江沿海	$I_p = 0.59(w_L - 11.0)$
福建	$I_p = 0.55(w_L - 10.9)$	连云港	$I_p = 0.62(w_L - 10.7)$

4 软土的地基处理措施

连云港地区海相区软土上一般分布有一层厚度 0.7～3.35 m 的“硬壳层”，该土层具有较高的承载力，对于较轻的建筑物，应充分利用上部硬壳层的强度，可考虑采用天然地基的可能性。仅当天然地基无法满足设计要求时，才选择适宜的地基处理方法。下面将主要讨论在连云港地区广泛采用的粉喷桩（或湿喷桩）复合地基和排水固结两种方法。

4.1 粉喷桩或湿喷桩

粉喷桩是加固饱和软粘土地基的一种有效方法，该方法在连云港地区已有成熟的施工经验和质量检测标准，因此在该地区被广泛采用。

粉喷桩的固化剂主要是水泥，有时也用水泥和石灰的混合物作为固化剂。固化剂用量通常是加固土体重量的 10%～15%，即每延米喷灰量为 50～75 kg·m^{-1}，随土体含水量的增加，每延米喷灰量逐渐增大。图 13 为连云港地区某工程粉喷桩不同喷灰量与桩体标准贯入击数之间的关系曲线。可见随喷灰量的增加，桩身质量也随之增加。

粉喷桩桩径常为 500～600 mm，一般按正三角形或者正方形布置，桩间距通常取 1.0～1.6 m，图 14 为连云港地区某工程粉喷桩不同间距时单桩复合地基载荷试验 $P-s$ 曲线。由图 14 可以得出，当粉喷桩桩间距为 1.1m 时复合地基的极限承载力比桩间距为 1.2 m 时有所提高，但增幅不大。而粉喷桩桩间距为 1.2 m 时复合地基极限承载力比桩间距为 1.4 m 时的复合地基承载力提高了 23%，但粉喷桩桩间距为 1.4m 时复合地基的极限承载力比桩间距为 1.6 m 时提高幅度液不是很大。同时从图 15 可以发现桩间距大于 1.4 m 时，复合地基沉降量增加幅度较大，因此可以认为：当粉喷桩桩间距为 1.2～1.4 m 时复合地基极限承载力较高，沉降量较小，是比较适宜采用的桩间距。

粉喷桩的桩长一般应穿过软土层，当软土层太厚时，可以根据建筑物的工后沉降和承载力要求确定桩长。粉喷桩最大处理深度可达 15 m，处理深度超过 15 m 时可以改用湿喷桩。

湿喷桩与粉喷桩的加固机理类似，但是湿喷桩的适用范围较粉喷桩更广泛，当软土的天然含水量小于 35% 时，或者处理深度大于 15 m 时宜采用湿喷桩而不采用粉喷桩。只要能够保证桩身质量，水

维普资讯 http://www.cqvip.com

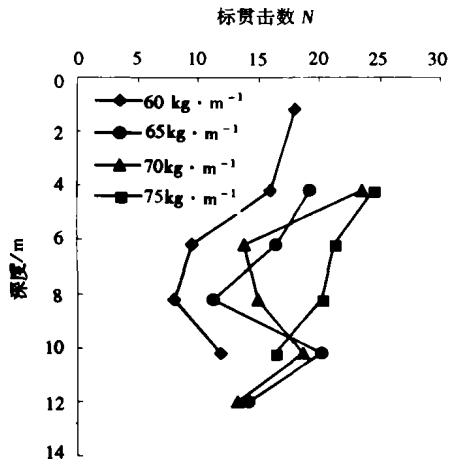


图 13 不同喷灰量时标贯击数随桩身分布

Fig. 13 Variation of SPT blow count along the column

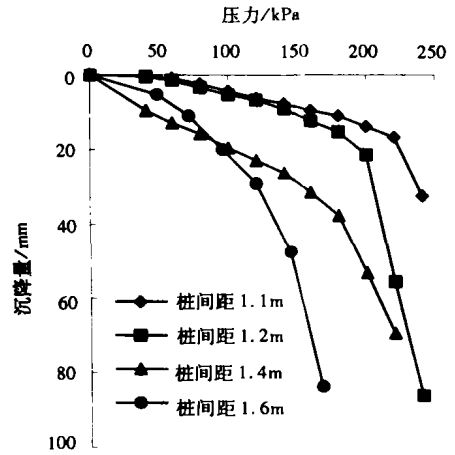


图 14 单桩复合地基载荷试验 $P-s$ 曲线

Fig. 14 $P-s$ curves of composite foundation with single pile

泥搅拌桩的有效深度可以达到 25 m,甚至更大。

粉喷桩(湿喷桩)质量检测方法有标准贯入试验、静力触探、现场取芯、静载荷试验以及沉降观测等等。在施工过程中的检测方法,文献[15]根据大量室内和现场试验推荐采用标准贯入试验(SPT)和现场取样的无侧限抗压强度试验来评价水泥土的强度,并根据标贯器中的芯样来直观的评定桩体搅拌的均匀性。

4.2 排水固结法

根据连-霍高速公路连云港段、汾灌高速公路

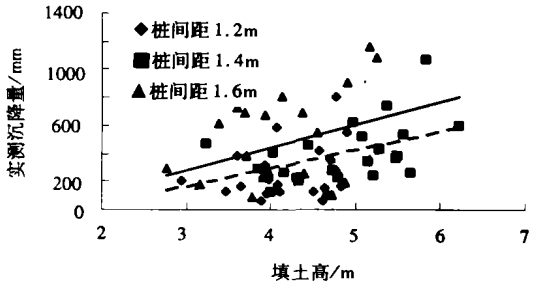


图 15 填土高与实测沉降量关系散点图

Fig. 15 Variation of settlement with loading

等工程沉降资料统计分析,发现当软土层厚度小于 4 m 时,砂垫层处理效果较好,软土层厚度大于 4m 时,会产生较大的沉降,且固结时间长,不利于稳定。

5 结 论

(1)连云港海相软土的主要类型为淤泥和淤泥质土,具有高含水量、高液限、高孔隙率、低强度、高压缩性等特点。

(2)连云港海相软土力学指标明显随深度增加而增加,线性关系显著,十字板抗剪强度随深度的回归方程为:

$$c_u = 1.571h + 5.50 \quad (h > 3.0\text{m})$$

(3)连云港海相软土压缩模量 Es 随应力水平的增大而增大,并且基本呈线性增长,曲线的斜率较大。并且各深度土体的压缩模量与压力关系曲线基本重合,表明其变形特性的相似性质。主固结系数随荷载的增大而减小。

(4)连云港海相软土粘塑性应变占总应变的主要部分,蠕变具有非线性,与时间相关,且不可逆。当应力水平较低时,蠕变是衰减稳定的,最终的变形是一常数,此时,蠕变变形较小,而且较快能达到稳定值。当应力水平较大时,蠕变成为非稳定的等速蠕变。连云港海相软土次固结系数与压缩系数的比值 C_a/C_c 为 0.018。

(5)连云港海相软土的主要物理力学指标具有较好的线性相关性,回归方程分别为:

$$e = 2.65w + 0.089 \quad (R = 0.99)$$

$$\rho = -0.7w + 2.07 \quad (R = 0.97)$$

$$c_{cq} = -32.8w + 29.6 \quad (R = 0.94)$$

$$\varphi_{cq} = -12.34w + 12.2 \quad (R = 0.89)$$

$$a_{1-2} = 4.24w - 1.156 \quad (R = 0.91)$$

$$I_p = 0.62(w_L - 10.7) \quad (R = 0.96)$$

维普资讯 http://www.cqvip.com

式中，w =35% ~90%。

这些回归方法可用于连云港地区软土力学性质指标的预测和控制，对工程应用有较大的实际意义。

(6)根据软土层厚度和荷载、承载力、沉降和工期等要求，综合考虑合适的软基处理措施。软土层小于4 m时，砂垫层处理效果较好，软土层小于15 m时，可以采用水泥粉喷桩处理，软土层大于15 m时，可以采用深层搅拌桩处理，粉喷桩处理时桩间距取1.2~1.4 m比较合适。

参 考 文 献

[1] 东南大学岩土工程研究所. 连徐高速公路连云港A1~A7标段软土地基加固设计与施工评价研究报告[R]，2001，3：6~19.
Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Report of evaluation of soft soil improvementdesign and construction in segmentof A1 ~ A7 of Lianyungang - xuzhou highway, 2001, 3: 6 ~ 19.

[2] 东南大学岩土工程研究所. 连盐高速公路软土地基处理设计方案评估报告[R]，2003，3：51~56.
Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Report of evaluation of soft soil improvementdesign of Lianyungang - yancheng highway, 2003, 3: 51 ~ 56.

[3] 赵维炳，施建勇. 软土固结与流变[M]. 南京：河海大学出版社，1996，1~3.
Zhao Weibin and Shi Jianyong, Consolidation and creep of soft soil [M], Nanjing: Hehai university Press, 1996, 1 ~ 3.

[4] 雷华阳，肖树芳. 天津软土的次固结变形特性研究[J]. 工程地质学报，2002，**10**(4)：385~389.
Lei Huayang and Xiao Shufang, Study on second - consolidation deformation characteristics of soft soil in Tianjin. Journal of Engineering Geology, 2002, **10**(4): 385 ~ 389.

[5] 王旭东，肖树芳，房后国. 天津海积软土结合水固结分析[J]. 工程地质学报，2002，**10**(4)：390~394.
Wang Xudong, Xiao Shufang, Fang Houguo. Analysis on the bound water consolidation of marine soft soil in Tianjin. Journal of Engineering Geology, 2002, **10**(4): 390 ~ 394.

[6] Mesri, G., and Castro, A. 1987. $C\alpha/C_c$ concept and K_0 during-secondary compression[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 113: 230 ~ 247.

[7] 冯秀丽，沈渭铨，杨荣民等. 现代黄河水下三角洲沉积物工程地质特性[J]. 青岛海洋大学学报，1994，**24**(增刊)：36~41.
Fen Xiuli, Shen Weiquan and Yang Rongmin, et al.. The geotechnical characteristics of mud sediment in the modern subaqueous Huanghe delta. Journal of Ocean University of Qingdao, 1994, **24**(Supp): 36 ~ 41.

[8] 王海鹏，陈峰. 厦门海湾软土的工程地质特性的研究[J]. 台湾海峡，1998，**17**(3)：235~242.
Wang Haipeng and Chen Feng, Study of engineering geological properties of soft soil in Xiamen Harbour. Journal of Oceanography in TaiwanStrait, 1998, **17**(3): 235 ~ 242.

[9] 梁国钱，张民强，俞炯奇等. 浙江沿海地区软土工程特性[J]. 中国矿业大学学报，2002，**31**(5)：435~441.
Liang Guoqian, Zhang Mingqiang and Yu Jiongqi, et al, Technical characteristics of mild clay in coastal areas of Zhejiang province. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, **31**(5): 435 ~ 441.

[10] 陈慕杰. 汕头市区软土的工程地质特性[J]. 桂林工学院学报，1998，**18**(3)：261~265.
Chen Mujie, Engineering properties of soft soil clay Shantou. Journal of Guilin Institute of Technology, 1998, **18**(3): 261 ~ 265.

[11] 白冰，肖宏彬. 软土工程若干理论与应用[M]. 北京：中国水利水电出版社，2002，6~8.
Bai Bin and Xiao Hongbin, Some theories and application of soft soil engineering. Beijing: Chinese Water Conservancy and Hydropower Press, 2002, 6 ~ 8.

[12] 孙更生，郑大同. 软土地基与地下工程[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1989，1~26.
Sun Gengsheng and Zhen Datong, Soft soil foundation and underground engineering. Beijing: Chinese Construction Industrial Press, 1989, 1 ~ 26.

[13] 候钊，陈环，钱征等. 天津软土地基[M]. 天津：天津科学技术出版社，1987，17~55.
Hou Zhao, Chen Huan and Qian Zheng, et al, Tianjin soft soil foundation. Tianjin: Tianjin Science and Technology Publishing House, 1987, 17 ~ 55.

[14] 中华人民共和国行业标准. 公路土工试验规程[S]. 北京：人民交通出版社，1993，9~11.
Criterionof ministry of communication, China, Test methods of soils for highway engineering. Beijing: The People's Communication Press, 1993, 9 ~ 11.

[15] 刘松玉、章定文、邵俐. 标准贯入试验(SPT)在水泥粉喷桩质量评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报，2002，**21**(增2)2382~2386
Liu Songyu, Zhang Dingwen and Shao Li, Application of SPT in evaluation and quality control of dry jet mixed soil - cement columns. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(Supp.2): 2382 ~ 2386.