连云港海相软土特性研究

章定文[1]　刘松玉[1]　于新豹[1]

(1. 东南大学　交通学院, 江苏　南京　210096)

摘　要: 基于在连云港地区收集到的大量软土土样的试验结果, 对连云港海相软土的基本物理力学性质指标进行了统计与分析, 得到了其主要物理力学性质指标之间的相关关系. 并根据室内试验结果, 分析了连云港海相软土的强度特征、固结变形特征和蠕变特征.

关键词: 海相软土;　回归分析;　抗剪强度;　固结变形;　蠕变

中图分类号: TU 447　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-5730(2003)04-0071-04

近年来, 随着软土建设的迅速发展, 饱和软粘土物理力学特性的研究受到了极大重视. 目前国内一些地区已对软土工程特性进行了系统分析研究[1~3], 作者基于连云港地区历年来多项工程的试验资料, 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, 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, 这些相关关系式可以用于软土力学性质指标的估算, 对工程应用有较大的实际意义.

1　基本物理力学性质分析

1.1　成因及分布规律[4,5]

连云港地区位于鲁中南丘陵与淮北平原结合部, 整个地势自西北向东南倾斜, 平均海拔高度 1～4 m, 密布大中小河流和渠道. 在地质历史中广泛沉积了一套灰～灰绿色流塑淤泥及淤泥质粘土的软土, 随第四纪新构造运动、河流作用及海侵地质作用形成了一套广泛分布的典型的以海积作用为主, 以冲海积、残坡积为辅的软土层(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, 呈山楂薄饼状, 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(< 0.005 mm)含量较高, 超过 60%.

1.2　基本物理力学性质指标统计

表 1 列出了连云港海相软土的主要物理力学性质指标. 由表 1 可知:

a　连云港海相软土具有高含水量、高液限、低密度、低强度、高压缩性及高等灵敏度等特点. 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.

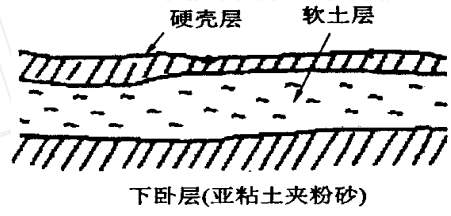


图 1　连云港软土典型工程地质纵断面示意

b　各指标变异系数都不随统计单元变化, 而是随着指标类型不同, 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.

1.3　指标间的相关关系

实际工程中经常建立土体物理力学性质指标之间的相互关系式, 从而根据容易测定的物理性质指标估算难以准确测定的力学性质指标. 因此, 可以用数理统计的方法建立软土主要物理力学性质指标之间的相关关系, 供工程应用参考.

采用一元线性回归方法, 对连云港海相软土的主要物理力学性质指标之间的相关关系进行统计分析, 回归结果见表 2、表 3[6~10]列出了我国部分地区软土物理力学性质指标的回归关系.

由表 2 和表 3 可知:

a　天然含水量 w 与孔隙比 e、湿密度 ρ、粘聚力 c_{cq}、摩擦角 φ_{cq} 和压缩系数 $a_{1\text{-}2}$ 都具有良好的相

收稿日期: 2003-06-16.

作者简介: 章定文(1978-), 男, 硕士研究生; 南京, 东南大学交通学院(210096).

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

表 1 连云港海相软土的物理力学性质指标统计

项目	含水量 /%	孔隙比	饱和度 /%	液限 /%	塑限 /%	塑性指数	液性指数	固结系数	压缩系数 /MPa^{-1}	粘聚力 /kPa	摩擦角 /°
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

注: 固结系数单位为 $10^{-3}cm^2/s$

表 2 连云港海相软土物理力学指标的统计关系

因变量	自变量	样本容量	回归方程	相关指数 R
e	w	97	$e=2.65w+0.089$	0.99
ρ	w	97	$\rho=-0.7w+2.07$	0.97
c_{cq}	w	68	$c_{cq}=-32.8w+29.6$	0.94
φ_{cq}	w	68	$\varphi_{cq}=-12.34w+12.2$	0.89
$a_{1\text{-}2}$	w	97	$a_{1\text{-}2}=4.24w-1.156$	0.91
I_p	W_L	97	$I_p=0.62(w_L-10.7)$	0.96

注: w 的范围为 $35\% \le w \le 90\%$; c_{cq} 单位为 kPa; $a_{1\text{-}2}$ 单位为 MPa^{-1}.

表 3 国内部分地区软土物理力学性质指标的统计关系[6~10]

	回归方程	统计地区		回归方程	统计地区
	$e=2.73w+0.027$	现代黄河水下三角洲		$I_p=0.78(w_L-18.2)$	上海
	$e=2.74w-0.013$	厦门港湾		$I_p=0.68(w_L-12.5)$	天津
$e\sim w$	$e=2.65w-0.068$	浙江沿海		$I_p=0.55(w_L-10.9)$	福建
	$e=2.40w-0.160$	汕头市区		$I_p=0.56(w_L-8.1)$	广东沿海
	$a_{1\text{-}2}=3.36w-0.7$	湖北仙桃	$I_p\sim w_L$	$I_p=0.59(w_L-11.0)$	浙江沿海
$a_{1\text{-}2}\sim w$	$a_{1\text{-}2}=4.31w-1.006$	浙江沿海		$I_p=0.61(w_L-12.6)$	珠江三角洲
	$a_{1\text{-}2}=3.62w-0.808$	汕头市区			
	$a_{1\text{-}2}=2.71w-0.381$	珠江三角洲			

关性, 因此可以用天然含水量 w 估算软土的其它物理力学性质指标

b 孔隙比 e 与天然含水量 w 的回归关系、压缩系数 $a_{1\text{-}2}$ 与天然含水量 w 的回归关系, 都具有极大的相似性, 反映了软土的这几项基本物理性质指标具有明显关系

c 塑性指数与液限的回归方程为 $I_p=0.62(w_L-10.7)$, 结合其它各地的塑性图可见, 不同地区土性有一定的差异性 这些塑性图和《公路土工试验规程》[11]中的塑性图($I_p=0.73(w_L-20)$)又有所区别, 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

2 力学特性

2.1 抗剪强度特征

室内试验采用直剪快剪、固结快剪、三轴UU和CU 试验、无侧限抗压强度试验等方法, 野外现场采用十字板剪切试验、静力触探(CPT)试验等方法, 取得了较为全面的抗剪强度指标 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 c_u 随深度 h 的回归方程为

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

2.2 固结变形特征

连云港海相软土为第四纪沉积物, 沉积年代较短, 固结程度低, 淤泥及淤泥质粘土呈絮状结构, 具有较大的孔隙, 因而压缩性大, 渗透系数较小, 并且具有一定的流变性 由不同深度海相软土的典型压缩模量与竖直压力关系曲线(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

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

载力, 但是经过预压之后, 其承载能力能够获得较大的提高 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

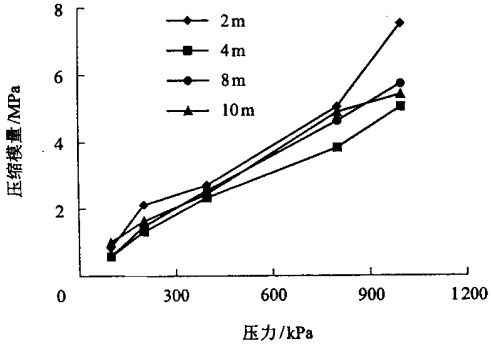


图 2　压缩模量 E_s 与竖直压力关系

固结系数与荷载的关系见图 3, 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

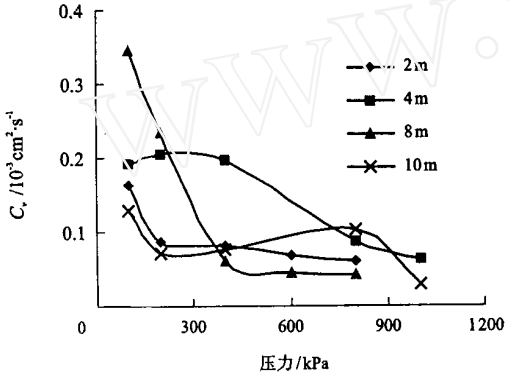


图 3　固结系数 C_v 与竖直压力关系

2 3　蠕变特征

通过海相软土的室内多级加荷一维固结蠕变试验, 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云港软土的蠕变特性 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 5, 6), 可以分析得到如下特性

a 不同时刻的应力-应变曲线是不同的, 而且一般均不是直线, 为一簇曲线, 说明蠕变是非线性的, 与时间相关, 且不可逆

b 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

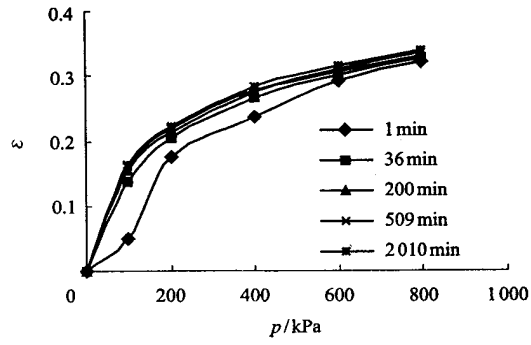


图 4　不同时刻的应力应变关系

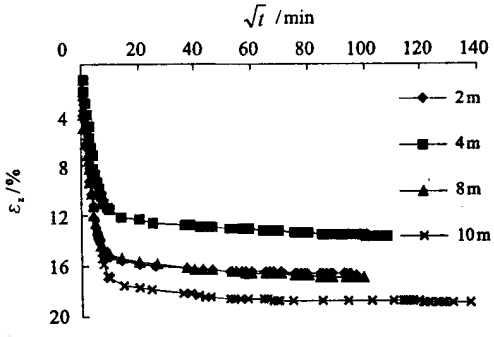


图 5　100 kPa 下轴向应变与时间曲线

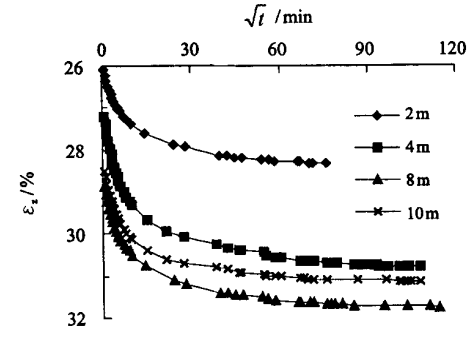


图 6　600 kPa 下轴向应变与时间曲线

近似是线性的, 且时间较短, 较快就进入粘塑性阶段, 从各图可见, 粘弹性应变和粘塑性应变约各占总应变一半, 应力水平较低时, 粘弹性应变所占比例更大

c 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, 用其它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来估算次固结系数 连云港海相软土次固结系数与压缩系数的比值为 0 018, 这比国内外的一些统计结果稍小 Mesri[12] 和 Leroueil[13] 推荐许多种类的土的比值的取值范围在 0 02～0 07 之间

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

3 结 论

a. 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、低强度及高压缩性等特点.

b. 主要物理力学性质指标具有较好的线性相关性, 这些回归方程可用于连云港地区软土力学性质指标的预测和估算, 对工程应用有较大的实际意义.

c. 连云港海相软土力学性质指标明显随深度增加而增加, 线性关系显著.

d. E_s 随应力水平增大而增大, 并基本呈线性增长, 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, 表明其变形特性相似. 主固结系数随荷载的增大而减小.

e. 粘弹性应变和粘塑性应变约各占总应变一半, 蠕变非线性, 与时间相关, 且不可逆. 应力水平较低时, 蠕变是衰减稳定的, 最终的变形是常数, 蠕变变形较小, 而且能较快达到稳定值. 应力水平较大时, 蠕变成为非稳定的等速蠕变.

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 候 钊, 等. 天津软土地基[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1987.

[3] 陈晓平, 黄国怡, 梁志松. 珠江三角洲软土特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 137-141.

[4] 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]. 南京: 东南大学, 2001.

[5] 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]. 南京: 东南大学, 2003.

[6] 冯秀丽, 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.

[7] 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.

[8] 梁国钱, 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] JTJ 051-93, 公路土工试验规程[S].

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

[13] Leroueil S, et al. Embankment on soft clays[M]. England: Ellis Horwood, 1990.

Study on Engineering Characteristics of Marine Clay in Lianyungang

ZHANG Ding-wen[1] *LIU Song-yu*[1] *YU Xing-bao*[1]

(1. Transportation College, Southeast Univ., Nanjing 210096, China)

Abstract: Based on the test results of a large number of samples of marine soft soil ingathered in Lianyungang, the statistics and analysis about physical and mechanical indexes of marine clay are made, and the relationships between these indexes have been obtained by using linear regression analysis. Finally, the characteristics of shear strength, consolidation deformation and creep of marine soft clay in Lianyungang are studied.

Key words: marine clay; regression analysis; shear strength; consolidation deformation; creep

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