维普资讯 http://www.cqvip.com

1004-9665/2005/13(01)-0029-05 *Journal of Engineering Geology* 工程地质学报

连云港浅层海相软土沉积环境及物理力学性质研究*

邓永锋 吴燕开 刘松玉 洪振舜
(东南大学交通学院 南京 210096)

摘 要 海相沉积软土在连云港有3层分布,他们在各自不同年代沉积,而浅层的软土对高速公路工程中路堤的变形和稳定性有很大影响,该土层在工程中备受关注。本文对连云港浅层软土的沉积环境,物理力学性质和结构性进行探讨和分析。收集的资料表明连云港浅层的软土是在全新世黄骅海进到19世纪60年代期间沉积形成的,其沉积历时漫长。统计表明该浅层软土含水量高、原位十字板剪切强度和有效上覆应力的比值约为0.2~0.4。最后根据Burland的理论分析了该层软土的结构性,结果表明连云港表层的海相软土为高位结构软土,土样易受到扰动,导致室内强度的失真。

关键词 连云港海相软土 沉积环境 物理力学性质 结构性
中图分类号:P642.13⁺3 **文献标识码**:A

SEDIMENT ENVIRONMENT OF SHALLOW MARINE CLAYS DEPOSITED IN LIANYUNGANG AREA AND THEIR PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

DENG Yongfeng WU Yankai LIU Songyu HONG Zhenshun
(*Transportation College, Southeast University, Nanjing* 210096)

Abstract Three layers of shallow marine clays with different sedimentary history are observed in Lianyungang area. The upper layer of the soft marine clays is a major concern in engineering practice because of possible settlement and stability problems of embankment built over it. This paper assessed the sediment environment of soft marine clays and their physical and mechanical properties. The shallow marine clays were formed chronically in the Holocene between Huanghua (the Yellow Sea) transgression and 1860's A. D. The statistical results show that the clays have high water contents, and the ratio of their vane test strength vs. the effective overburden pressure ranges from 0.2 to 0.4. Burland's void index and intrinsic compression line are then used to characterize structures of the marine clays. It is concluded that highly structured clays can be easily disturbed, and the laboratory strength is distorted.

Key words Lianyungang marine clay, Sediment environment, Physical and mechanical properties, Structural characteristics

1 引 言

目前国内对天津,广州和上海等地软土有了很深入的研究[1~3],而连云港海相软土在成因上与前面提及的软土有比较大的区别,对其成因和物理力学性质进行深入的研究显得很有必要。同时连云港

* 收稿日期:2004-08-12;收到修改稿日期:2004-10-09.
基金项目:本项研究得到教育部博士点基金项目(No.2001028618)和东南大学优秀博士学位论文基金(YBJJ0411)的资助.
第一作者简介:邓永锋(1978-),男,博士,主要研究方向为软基处理及变形分析. Email:noden@sohu.com

维普资讯 http://www.cqvip.com

在建工程非常多,就已建和在建高速公路而言就有连徐、汾灌和连盐高速公路等。连云港浅层软土一般厚度小于15m[4],而该软土物理力学性状对高速公路建设起至关重要的影响。对连云港所在地典型的浅层海相软土深入的认识有利于以后相关工程的实践。

2 连云港软土沉积环境

图1为连云港地区海相地层对比图,从图中可以看到,整个连云港地区均发育着不同厚度的海相地层[5~6]。该地层均是在第四纪期间不同的海侵旋回形成的。连云港地区在40m以上有3层海相地层,沿海岸线往南,海相地层的厚度增加。连云港最上一面一层海相地层厚度一般小于15m,其物源主要为海洋沉积物,当时的沉积环境据现土层性质推测是在一种还原环境下沉积而成的。

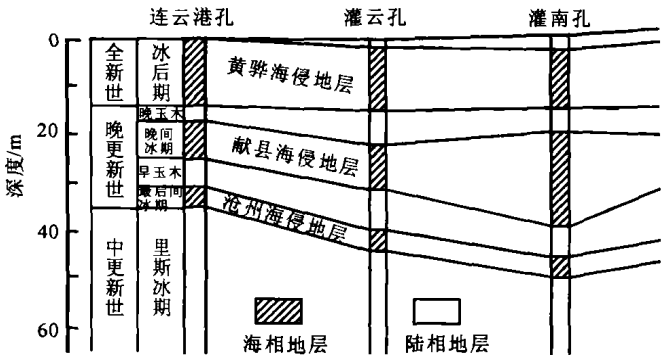


图1 连云港海相地层沉积剖面[5]

Fig. 1 The sedimentation section of Lianyungang marine clay[5]

图2为第四纪苏北最大的一次海进岸线图[7],称为黄骅海进,该海进在江苏境内到达了镇江,又称为镇江海进,该次海进淹没了苏北沿海的大部分地区,它对沿海的地层沉积有着重大的影响。这次海进海退形成了连云港表层的海相软土。

图3为镇江海进后不同年代连云港的海岸线图[8],它表明在6000年前到公元800年连云港大部仍处在海岸线以下,表层的海相软土早已开始沉积。

图4为连云港现存砂堤的示意图[9]。另外结合图3和图4以及连云港地方志,镇江海进后到公元19世纪60年代,不断发生海退,形成了表层海相软土。公元19世纪60年代后连云港又发生了较小规模的海进。

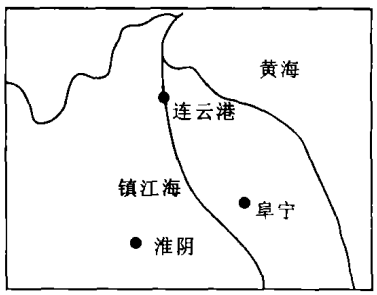


图2 镇江海进时的海岸线[7]

Fig. 2 The coastline during Zhenjiang transgression[7]

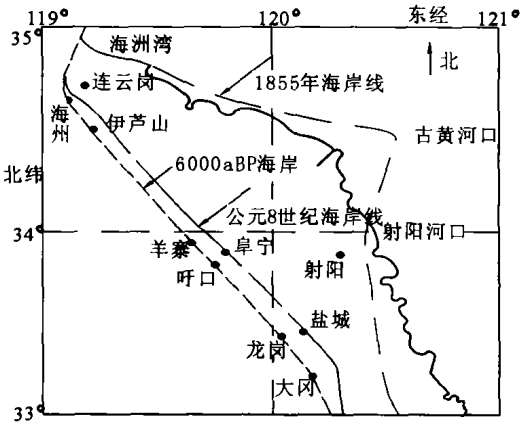


图3 不同时期连云港海岸线图[8]

Fig. 3 Lianyungang coastlines at different periods[8]

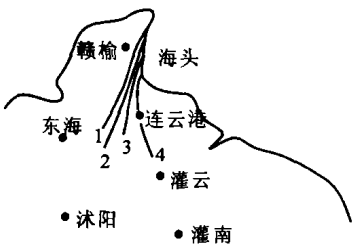


图4 不同时期连云港砂堤示意图[9]

Fig. 4 Lianyungang sandbars at different periods[9]

1.4~6.5万年;2.760aBP;3.2600aBP;4.800aBP

3 连云港表层海相软土物理力学性质

本文统计了连云港在建的几条高速公路(连徐,汾灌和连盐)的工程勘察资料。主要物理力学参数见表1。

图5为连云港表层软土的十字板剪切强度沿深度的变化;连云港浅层海相软土的天然容重平均为17.5 kN·m^{-3},因此可以进一步整理得到连云港浅层海相软土十字板剪切强度C_u与土体有效自重应力p_0'比值,即C_u/p_0'的频率分布(图6)。

维普资讯 http://www.cqvip.com

表1 连云港浅层海相软土的物理力学指标

Table 1 The physical and mechanical properties of Lianyungang shallow marine clay

项目	含水量/(%)	孔隙比 e	液限/(%)	塑限/(%)	塑性指数	液性指数	固结系数/$10^{-3}cm \cdot s$	压缩系数/MPa^{-1}	凝聚力(固快)/kPa	摩擦角(固快)/(°)
平均值	68.7	1.598	49.36	25.38	23.98	1.417	0.584	1.339	10.25	4.95
最大值	92.0	2.173	66.70	34.7	33.5	2.36	2.234	2.88	18	8
最小值	45.1	1.041	28.40	18.9	9.5	1.01	0.1	0.40	2.7	1.4
标准差	10.6	0.250	8.721	3.608	5.607	0.278	0.524	0.504	3.525	1.485
变异系数	18.1	15.65	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	81	97	68	68

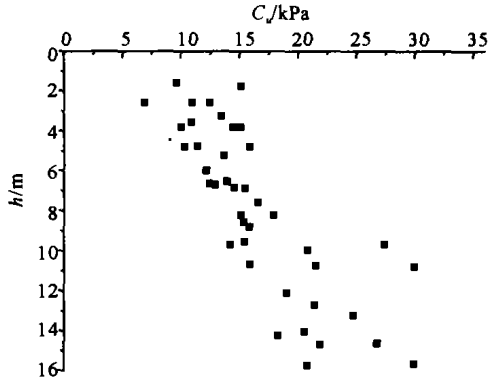


图5 十字板剪切强度沿深度变化[10]

Fig. 5 The strength of vane tests at depth [10]

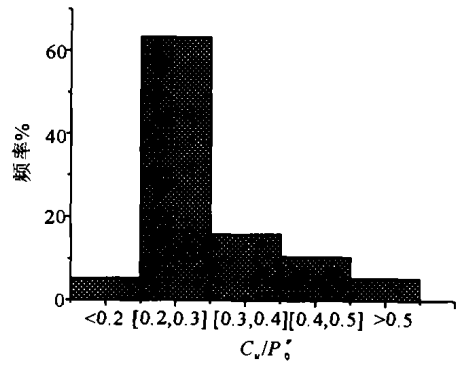


图6 C_u/P_0' 频率分布

Fig. 6 The frequency of C_u/P_0'

Leroueil 整理了 Bjerrum 等人的数据认为天然沉积土体的 C_u/p_0' 一般在0.2~0.35之间[11]。图6的统计结果表明63%左右的连云港海相软土的 C_u/p_0' 在0.2~0.3之间,78%的 C_u/p_0' 在0.2~0.4之间,它与 Mesri 的统计结果基本一致。

4 连云港表层软土结构性评价

为了了解连云港浅层海相软土的固结特性,在连盐高速公路连云港K4段用国内目前最先进的取样技术-薄壁取样,取了8孔原状样,并采用 Burland 理论分析连云港浅层海相软土的结构特性。

Burland[12]导入了一个评价天然沉积土压缩性状的归一化指标——孔隙指数,对各种初始含水量为液限1.0~1.5倍的重塑土的压缩曲线进行归一化。孔隙指数 I_v 的表达式如下。

$$I_v = \frac{(e - e_{100}^*)}{(e_{100}^* - e_{1000}^*)} \quad (1)$$

其中 e 为孔隙比,e_{100}^* 和 e_{1000}^* 分别是初始含水量为液限1.0~1.5倍的重塑土在一维固结试验中对应于外加固结应力 p = 100kPa 和 1000kPa 时的孔隙比。基于欧米的具有不同液限的初始含水量为液限1.0~1.5倍的重塑土固结试验数据,Burland 建立了归一化的固有压缩曲线(Intrinsic Compression Line,简称 ICL),其表达式如下[12]:

$$I_v = 2.45 - 1.285\lg p + 0.015(\lg p)^3 \quad (2)$$

当初始含水量为液限1.0~1.5倍的重塑土的固结试验数据欠缺时,Burland 建议用下列经验公式[12]计算和 e_{100}^* 和($e_{100}^* - e_{1000}^*$)。

$$e_{100}^* = 0.109 + 0.679e_L - 0.089e_L^2 + 0.016r_L^3 \quad (3)$$

$$(e_{100}^* - e_{1000}^*) = 0.25e_L - 0.04 \quad (4)$$

其中 e_L 为对应于液限时的孔隙比。

对连云港浅层软粘土的重塑样进行标准固结试验,并且用孔隙指数整理试验数据,典型的结果见图7。由图7可见,当固结压力大于30kPa时,连云港软粘土重塑样的试验数据与固有压缩曲线 ICL 很好地吻合。当固结压力小于30kPa时,试验数据与固有压缩曲线 ICL 的偏差是由于连云港大多数软粘土的天然含水量小于液限引起的。因此,连云港软粘土重塑状态的固结性状与一般的粘性土的重塑状态的固结性状没有根本性的区别。

维普资讯 http://www.cqvip.com

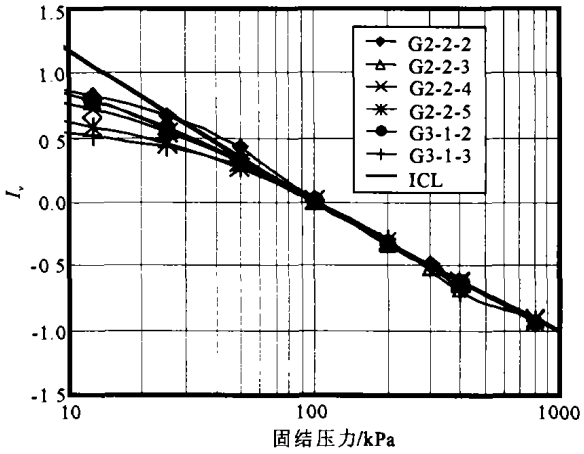


图7 重塑样孔隙指数-固结压力关系

Fig. 7 Relationship between the void index of remolded samples and the consolidation stress

薄壁取样器所得的不扰动土样的天然孔隙指数 I_{v0} 由下式表达：

$$I_{v0} = (e_0 - e^*_{100})/(e^*_{100} - e^*_{1000}) \quad (5)$$

天然孔隙指数 I_{v0} 和上覆压力 p_{v0} 的典型关系见图8。所有的天然孔隙指数 I_{v0} 均位于固有压缩曲线之上，除了浅层土之外，大部分天然孔隙指数 I_{v0} 高于沉积压缩曲线（Sedimentation Compression Line, SCL）。沉积压缩曲线（Sedimentation Compression Line, SCL）是由 Burland[12] 根据 Skempton[13] 发表的以欧米天然沉积土为主的沉积数据整理而成的。位于沉积压缩曲线 SCL 之上的天然沉积土具有强的结构性和较大的压缩性，其力学性状与重塑土样有着根本性的区别，易于受到机械扰动的影响，室内试验得到的力学参数容易失真。位于沉积压缩曲线 SCL 和固有压缩曲线 ICL 之间的天然沉积土的结构性较弱，压缩性一般。而位于固有压缩曲线 ICL 附近的天然沉积土灵敏度低，对机械扰动不敏感，压缩性低，其力学性状与重塑土样没有根本的区别。因此，大多数连云港软粘土有较强的结构性，压缩性较大，易于受到机械扰动的影响。

用孔隙指数整理的不扰动土样的固结压缩曲线见图9。由图可见，大部分土样（除了 G2-2-4）的固结压缩曲线均显示固结屈服前阶段的压缩性较小，达到屈服后随着应力水平的增大压缩性急剧增大，压缩曲线逐渐趋于固有压缩曲线。另外，应该指出，除了 G2-2-3 不扰动样的固结压缩曲线是穿过沉积压缩曲线而逐渐趋于固有压缩曲线的之外，其余的不扰动样固结压缩曲线均位于沉积压缩曲线

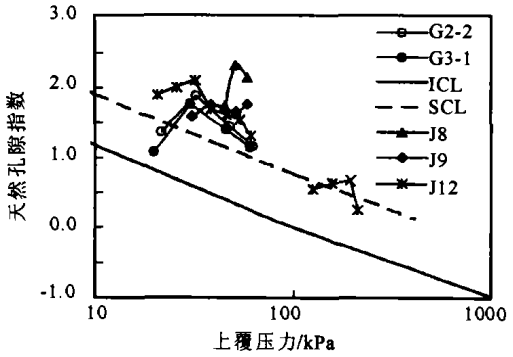


图8 I_{v0} 和 p_{v0} 的典型关系

Fig. 8 The typical curve between I_{v0} and p_{v0}

之下，结合图8的天然孔隙指数 I_{v0} 分布结果可知薄壁取样器所得的不扰动样在取样、运输、成样过程所受的扰动程度较大，室内试验得到的不扰动压缩曲线有一定程度的失真。

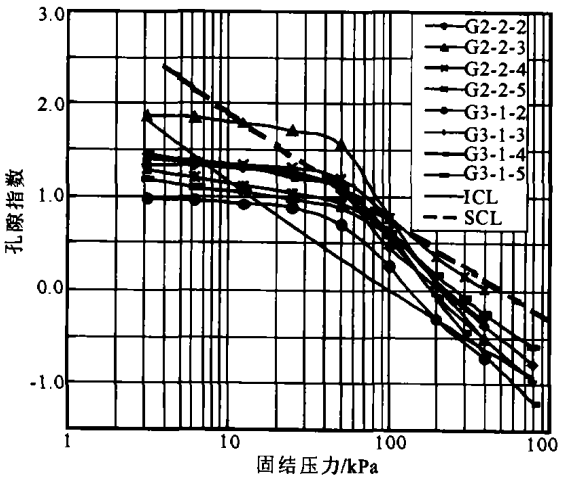


图9 不扰动土样的固结压缩曲线

Fig. 9 The consolidation curve of undisturbed samples

室内无侧限抗压试验也经常用于测定非排水强度，在此也对原状土不扰动样进行无侧限抗压试验（q_u），试样的尺寸为：直径 3.91cm，高度 7.94cm，剪切速率为 1% · min^{-1}。结果见表2，破坏应变为 3.4~10.0%，比日本标准软粘土取样器（固定活塞双管薄壁取样器）所得的不扰动软粘土样（一般不大于 1~2%）大得多，而 $E_{50}/(q_u/2)$ 值比固定活塞双管薄壁取样器所得的不扰动软粘土样的一般值 100~130 小得多，仅为 27.4~85.4，说明我国的活动活塞薄壁取样器所取得的不扰动软粘土样扰动程度偏大，这与不扰动样的固结试验结果一致。测定的无侧限抗压强度偏低，虽然偏于安全，但是可能造成不必要的浪费。从表2也可见（$q_u/2$）与十字板

维普资讯 http://www.cqvip.com

强度的相关性很差,这很可能是试样扰动引起的,每个试样的扰动程度变化较大。无侧限抗压强度($q_u/2$)与原位十字板强度之比为0.36~0.95,平均为0.63。

表2 室内无侧限抗压试验结果

Table 2 Results of unconfined compression tests in lab

土样编号	深度/m	q_u/kPa	破坏应变/(%)	E_{50}/kPa	$E_{50}/(q_u/2)$	C_u/kPa	$(q_u/2)/C_u$
G2-1-2	3.25	27.30	5.9	755	55.3	14.41	0.95
G2-2-3	5.25	28.41	3.7	958	67.4	18.65	0.76
G2-2-4	7.25	25.16	4.2	632	50.2	22.37	0.56
G2-2-5	9.25	32.30	3.4	883	54.7	25.39	0.64
G3-1-3	5.25	24.30	10.0	333	27.4	19.11	0.64
G3-1-4	7.25	18.39	7.1	302	32.8	22.50	0.41
G3-1-5	9.25	43.65	7.7	784	35.9	26.58	0.82

5 结 论

(1)连云港浅层海相软土沉积年代久远,早在黄骅海进,即镇江海进时就已经开始沉积,并且在公元800年的时候仍处于海洋中。

(2)连云港浅层海相软土具有高含水量的特性,土体原位十字板剪切强度沿深度增加而增大,C_u/p_0一般在0.2~0.4之间,这与Mesri研究的结果基本一致。

(3)连云港表层海相软土具有很高的结构性,该土层在取样的过程中极易受到扰动,导致室内测得的强度指标与土体真实的强度指标有较大幅度的减小。

参 考 文 献

[1] 倪一鸿.京津塘高速公路软土地基的处理.京津塘高速公路论文集[M].西安:陕西科学技术出版社,1996.
Ni Yihong. Improvement of soft clay foundation along Beijing-Tianjin-Tanggu highway. Beijing-Tianjin-Tanggu highway papers collection. Xi'an: Shanxi science and technology press, 1996.

[2] 杜建成,张利民.广州地区软土应力应变特性研究[J].四川联合大学学报,1997,**1**(1):24~28.
Du Jiancheng, Zhang Limin. Study on the stress-strain Behavior of Soft Clay of Guangzhou, J. Sichuan Union U., 1997, **1**(1):24~28.

[3] 袁聚云,杨熙章,赵锡宏,董建国.上海软土各向异性性状的试验研究[J].大坝观测与土工测试,1996, **20**(2):10~14.
Yuan Juyun, Yang Xizhang, Zhao Xihong, Dong Jianguo. Experimental Study on Anisotropic Characteristic of Shanghai Soft Clay. Embankment Observationand Soil Testing, 1996, **20**(2):10~14.

[4] 吴燕开,刘松玉,洪振舜.土层工程性质与其沉积环境关系研究[J].工程地质学报,2004,**12**(3):263~267.
Wu Yankai, Liu Songyu, Hong ZhenShun. The Relationship between the Geotechnical properties and the Deposited Environment-for the Soil. J. Engineering Geology, 2004, **12**(3):263~267.

[5] 赵松龄.中国东部沿海近三十万年以来的海侵与海面变动[J].中国第四纪研究, 1986, **6**(2):97~103.
Zhao Songling. Transgression and sea level undulationat East china coastland since 300000 years before. China Quaternary Research, 1986,**6**(2):97~103.

[6] 石文慧.论中国东南地区第四纪软土建造[J].中国第四纪研究, 1986, **6**(2):158~168.
Shi Wenhui. Soft clays creation during Quaternary at Southeast China. China Quaternary Research, 1986,**6**(2):158~168.

[7] 凌申.苏北全新世海进与古砂堤研究[J].台湾海峡.1994, **13**(4):338~345.
Ling Shen. Study on Holocence transgression and sandbar in North Jiangsu. J. of Oceanography in Taiwan Strait, 1994,**13**(4):338~345.

[8] 朱玉荣.苏北中部滨海平原成陆机制研究[J].海洋科学, 2000, **24**(12):33~37.
Zhu Yurong. Preliminary study on formation mechanism of the middle littoral plain in the northern part of Jiangsu province. Marin Science, 2000,**24**(12):33~37.

[9] 朱诚.长江三角洲及苏北沿海地区7000年以来海岸线演变规律分析[J].地理科学, 1996,**16**(3):207~213.
Zhu Cheng. Coastline evolvementresearch of Yangze river delta and North Jiangsu coastland since 7000 years before. Geography-Science, 1996,**16**(3):207~213.

[10] 陈艺南.谈清.殷红岩.江苏高速公路软土路基工程地质问题研究[J].华南地质与矿产, 2001, (3):30~35.
Chen Yinan. Tan Qing. Yin Hongyan. Engineering geology research of soft clays on Jiangsuhighways. Geology and Mineral Resources of South China, 2001, (3):30~35.

[11] Serge Leroueil, Jean-Pierre Magnan. Francois Tavanas. Embankments on soft clays[M]. England: Ellis Horwood LT, 1990, 185~187.

[12] Burland. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. Geotechnique, 1990, (40):329~378.

[13] Skempton. The consolidation of clays by gravitational compaction [J]. Q. J. Geol. Soc, 1970, (125):373~411.