

DOI: 10.11779/CJGE201501004

# 连云港海相软土在孔隙水盐分溶脱环境下的固结特性

邓永锋<sup>1, 2</sup>, 岳喜兵<sup>1, 2</sup>, 张彤炜<sup>1, 2</sup>, 刘松玉<sup>1, 2</sup>, 杨忠超<sup>3</sup>

(1. 东南大学交通学院岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210096;  
3. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

**摘要:** 随着江苏沿海开发战略的实施, 作为第四纪海进海退成因的典型区域性软土, 连云港海相土的工程特性也日益引起关注。海相软土沉积过程中孔隙水盐分较高, 而随着地表或地下淡水的冲刷, 孔隙水盐分发生溶脱, 土的物理力学特性会发生改变, 但是目前研究较少。以连云港海相沉积软土为研究对象, 首先依托离岸线不同距离的连临高速与临海高等级公路, 进行了多个场地的原位测试试验 (CPTu) 和孔隙水化学成分分析, 对比后发现, 两处场地具有相类似的沉积历史, 含水比  $w_0/w_L$ 、颗粒粒组与矿物成分基本相同; 而相同深度处, 孔隙水盐分高的场地土体强度较高。为了进一步探明其机理, 设计了换盐和固结装置, 即采用蒸馏水和取样点原位地下水 (盐水) 在一定水力梯度下淋洗原状土, 淋洗后进行固结试验。结果表明: 盐水淋洗的试样 LYGOed1 的压缩指数  $C_c$ 、回弹指数  $C_s$  和次固结系数  $C_\alpha$  小于蒸馏水淋洗试样 LYGOed2, 而 LYGOed1 的压缩模量  $E_{Oed}$ 、固结系数  $C_v$  与渗透系数  $k$  大于 LYGOed2, 说明了盐分溶脱环境下, 土的压缩性增大, 次固结变形增大, 固结时间变长, 渗透系数变小。研究成果不仅能加深对连云港海相软土的认识, 也为近岸或近海岩土工程设计提供参考。

**关键词:** 孔隙水盐分; 溶脱环境; 海相软土; 固结特性; 换盐与固结试验

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)01-0047-07

作者简介: 邓永锋 (1978-), 男, 福建清流人, 教授, 博士生导师, 主要从事软黏土工程特性与地基处理原理研究。  
E-mail: noden@seu.edu.cn。

## Consolidation behaviors of soft marine clay in Lianyungang under desalination environment of pore water

DENG Yong-feng<sup>1, 2</sup>, YUE Xi-bing<sup>1, 2</sup>, ZHANG Tong-wei<sup>1, 2</sup>, LIU Song-yu<sup>1, 2</sup>, YANG Zhong-chao<sup>3</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Transportation College, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Key Laboratory of Urban Underground Engineering and Environmental Safety of Jiangsu Province, Nanjing 210096, China; 3. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The marine soft clays, the quaternary sediments, are widely deposited in the sea transgression/regression environment in Lianyungang, Jiangsu Province, whose behaviors are focused recently with the implementation of the coastal development strategy. The salinity of pore water during deposition is relatively high, and with the erosion of the surface or underground freshwater, the desalination of pore water occurs, whilst its effect on soil behaviors of the natural soft clays is still unclear. The piezo-cone penetration tests (CPTu) and physical property experiments of the soft clays with salinity of pore water of 0.1% and 4.9% at two sites, e.g. Lianyungang-Linyi highway and Linhai highway, are conducted. The higher strength of the soils with more salinity at the same depth is observed, but they have the similar deposition environment, ratios of water content to liquid limit, particle-size distributions and mineral compositions. To further clarify the effect of pore water, the paralleled percolation and oedometer tests with the synthetic solution and deionized water are performed. The results show that the parameters of oedometer modulus  $E_{Oed}$ , consolidation coefficient  $C_v$  and hydraulic conductivity  $k$  with the synthetic solution are higher than those with deionized water, while the compression index  $C_c$ , swelling index  $C_s$  and secondary consolidation coefficient  $C_\alpha$  are on the contrary. Those results will deepen the understanding of behaviors of Lianyungang marine clays and provide the reference for the offshore engineering.

**Key words:** pore water salinity; desalination environment; soft clay; consolidation behavior; percolation and oedometer test

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51378117, 41330641); 水利水运工程教育部重点实验室暨国家内河航道整治工程技术研究中心开放基金项目 (SLK2012B01)

收稿日期: 2014-02-14

## 0 引言

随着江苏省沿海开发战略的实施和该区域内的建筑、交通等基础设施建设,中国典型的第四纪沉积软土(连云港海相软土)的工程特性日益引起重视。任美锷<sup>[1]</sup>对连云港地区地质演化进行了系统的研究,认为该区域该软土成因与4800年前开始的海退和1000年前的黄河改道有关。

图1为6000年内江苏海岸线历史变迁示意图,进一步表明连云港海相软黏土主要由黄海海退与黄河夺淮入海两大历史事件共同形成。魏汝龙结合连云港港口建设,在20世纪80年代便开始系统研究了连云港海相软土的工程特性<sup>[2]</sup>;东南大学交通学院结合连云港地区的交通基础设施建设,也对连云港海相软土的工程特性进行了较为深入系统的研究,结果均表明该区域的软土具有高含水率、大孔隙比、低强度、高灵敏度以及明显的次固结特性等特点<sup>[3-4]</sup>。

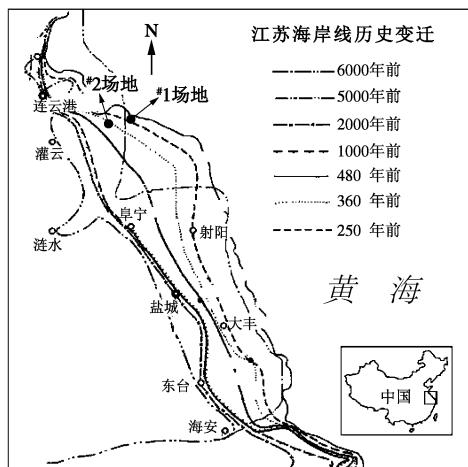


图1 黄海海岸变迁情况

Fig. 1 Coastline evolution of the Yellow Sea

虽然对连云港软土有了大量的研究,可是大多数研究都没有考虑地下水盐分变迁的影响。孔隙水盐分对土体的工程特性的影响是近年国际岩土工程领域的一个热点,Chen等<sup>[5]</sup>、Sridharan等<sup>[6]</sup>、Kaya等<sup>[7]</sup>对孔隙水对高岭土和膨润土的沉积特性进行研究,结果表明:最终体积沉降量受到离子化合价、浓度、溶液的pH值和矿物成分的影响。Abdullah等<sup>[8]</sup>、Kaya等<sup>[9]</sup>、Sridharan等<sup>[10]</sup>、Di Maio等<sup>[11]</sup>、Gajo等<sup>[12]</sup>、Yuksehen-Aksoy等<sup>[13]</sup>发现含蒙脱石系黏土的稠度指标对孔隙水盐分很敏感,而Yuksehen-Aksoy等<sup>[14]</sup>指出,当土体的液限小于110%时,盐分对土体的影响相对较小。Sridharan等<sup>[10]</sup>、Ören等<sup>[14]</sup>、Di Maio等<sup>[11]</sup>、Gajo等<sup>[12]</sup>对重塑土进行了控制孔隙水化学成分的压缩实验,发现孔隙水盐分对土体压缩特性有重要影响。

需要指出是目前关于孔隙水盐分对土体工程特性的影响大多集中在重塑土和其物理指标方面,对天然沉积的结构性黏土,尤其是软黏土的相关研究较少。

本文针对江苏沿海开发的工程需要和目前已有的研究现状,以连云港海相沉积的结构性软黏土为对象,首先对距海岸线不同距离处的两条公路(连临高速公路与临海高等级公路)进行多孔原位勘察和测试,分析其孔隙水盐分以及原位强度的特征;然后设计换盐固结装置,对原状土进行取样点原位地下水(盐水)和蒸馏水的平行换盐试验。换盐结束后,对土体进行压缩和回弹试验,获得固结试验参数,比对孔隙水盐分对压缩特性的影响。研究成果不仅可以加深对连云港海相软土工程特性的认识,还为近海/近岸的排淡过程中地基土的演化提供参考。

## 1 连云港海相软土的基本特性

本次试验涉及连临高速公路与临海高等级公路多个勘测场地,本文仅列出代表性的两个场地的数据。临海高等级公路#1场地距离海岸线50 m,连临高速公路#2场地距海岸线约30 km。两个场地5 m深度处土体的主要参数如表1所示,结果表明#1与#2场地土体天然孔隙比大于1.5,且天然含水率大于液限,根据《岩土工程勘察规范GB50021—2001》可划分为淤泥,天然含水率与液限含水率之比 $w_0/w_L$ 均接近1,同时颗粒试验的结果表明#1与#2场地黏粒与粉粒的含量相近。表1中粒组的划分依据《公路土工试验规程JTGE40—2007》,粒径2~0.074 mm为砂粒,0.074~0.002 mm为粉粒,<0.002 mm为黏粒。

表1 土体物理特性

Table 1 Physical properties of soils

取样点	初始含水率/%	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	孔隙比	液限/%	塑限/%	砂粒	粉粒	黏粒	颗粒/%
#1	58.1	16.8	1.52	51.4	25.6	0.2	70.3	29.5	
#2	80.9	15.3	2.18	79.0	30.4	0.0	77.7	22.3	

表2 土体的矿物成分

Table 2 Mineral analysis by XRD

取样点	黏粒总矿物成分分析/%					次生矿物成分分析/%			
	石英	长石	斜长石	方解石	次生矿物	伊利石	高岭石	绿泥石	伊蒙混层
#1	23.2	4.1	15.6	1.5	45.0	29.0	13.0	14.0	44.0
#2	30.0	4.0	13.0		53.0	32.0	5.0	6.0	57.0

表3 孔隙水化学成分

Table 3 Chemical compositions of pore water

取样点	离子浓度/(g·L <sup>-1</sup> )					总计/%
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	
#1	3.51	25.53	0.57	2.10	14.00	49.1
#2	0.01	0.37	0.03	0.02	0.45	0.9

表2是两个场地土体矿物成分XRD衍射的半定量分析结果,结果表明#1和#2场地的原生矿物均以石英、长石和斜长石为主,含量相近;另外#1场地的次生黏土矿物成分含量较#2场地略高;#1与#2场地的黏土矿物成分主要为伊蒙混层,含量接近于50%。从XRD实验分析结果得知,两个场地矿物成分较为相近,伊蒙混层的含量均较高,而蒙脱石族黏土矿物的力学性质受孔隙水盐分浓度的影响较大。

对两个场地土样的孔隙水进行取样分析,如表3所示。结果表明#1场地孔隙水的总含盐量为4.9%,而#2场地孔隙水的盐分约为0.09%,且孔隙水均以 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 两种离子成分为主。

## 2 现场原位测试

为进一步查明孔隙水盐分变化对土体原位强度的影响,分别对两条公路的多个场地进行多功能CPTu试验,图2列举了#1和#2场地土体静力触探试验结果。试验结果表明#1和#2场地表层硬壳层厚度大约为0.5 m和1.5 m,淤泥层深度为15.5 m和10.5 m。为了进一步明确两个场地孔压静力触探参数的差别,将2个场地的1.5~10.5 m间对应深度的净锥尖阻力 $q_t$ 、侧壁摩阻力 $f_s$ 、锥肩位置孔隙水压力 $u_2$ 、摩阻比 $R_t = f_s/q_t$ 和孔压系数 $B_q$ 进行对比,结果如图3所示。

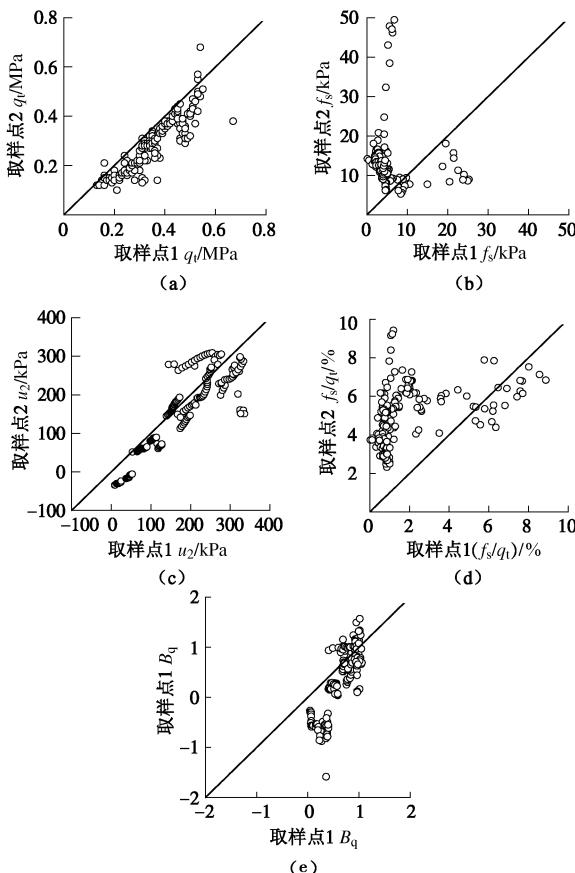


图2 两个场地静力触探参数对比

Fig. 2 Comparison of CPTu parameters

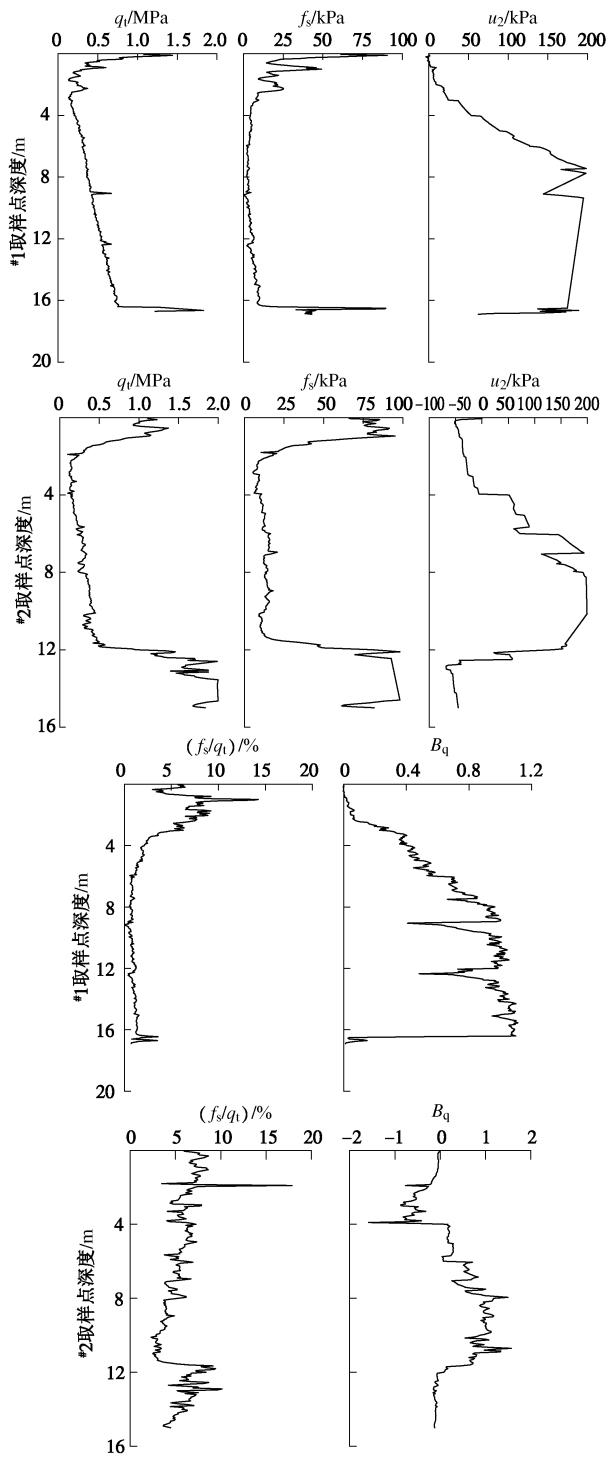


图3 CPTu曲线示意图

Fig. 3 Curves of CPTu investigations

以往对CPTu试验结果确定不排水抗剪强度的研究表明,净锥尖阻力 $q_t$ 、超孔隙水压 $\Delta u$ 和不排水剪切强度 $S_u$ 的关系可归纳如下<sup>[15-16]</sup>:

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \quad , \quad (1)$$

$$S_u = \frac{\Delta u}{N_{\Delta u}} = \frac{u_2 - u_0}{N_{\Delta u}} \quad , \quad (2)$$

式中,  $\sigma_{v0}$ 为上覆土体应力,  $N_{kt}$ 和 $N_{\Delta u}$ 为经验圆锥系数,  $u_2$ 为锥肩位置孔隙水压力,  $u_0$ 为静止孔隙水压力。

从式(1)、(2)可知相同深度的不排水强度与净锥阻力和锥尖位置处孔隙水压力呈正比。图3(a)和3(c)的统计结果显示, #1场地的净锥尖阻力、锥肩位置孔隙水压力较#2场地的大,说明#1场地的不排水剪切强度大于#2场地。

Hong 等<sup>[17]</sup>收集整理了国内外有关重塑淤泥不排水强度的试验数据,提出了重塑淤泥不排水强度与含水率/液限的关系式:

$$q_u = 1.4(w_0 / w_L)^{-4.5} \quad (4)$$

根据式(4),土的不排水抗剪强度与  $w_0/w_L$  有关,而取样点#1 和#2 的  $w_0/w_L$  非常接近,分别为 1.13 和 1.02,表明其重塑土强度应该比较相近。该两个场地土体颗粒粒组与矿物成分基本相同(验证了任美锷<sup>[1]</sup>成分来源的分析成果)及沉积环境和历史相近,而原状土不排水抗剪强度却有较大差异,笔者推测孔隙水盐分是其强度产生差异的重要原因。需要强调的是已有的研究成果<sup>[18]</sup>表明土体中孔隙水盐分增加会导致黏性土稠度降低;同时孔隙水离子浓度较高,其渗透吸力(溶质吸力)也较大,也会对土体的强度的产生影响。为了进一步验证孔隙水盐分对软黏土工程特性的影响,本研究设计了换盐与固结试验。

### 3 换盐与固结试验

#### 3.1 试验方法

海相软土具有一定的结构性,采用重塑土换盐的方法会导致原位结构发生破坏,为此东南大学岩土工程研究所设计了换盐的固结盒,并结合 GDS 公司的标准控制器(CPV),设计了特殊的渗透换盐装置,装置如图4所示。装置中土样为正常固结环刀试样,直径为 68.1 mm,高度为 20 mm。

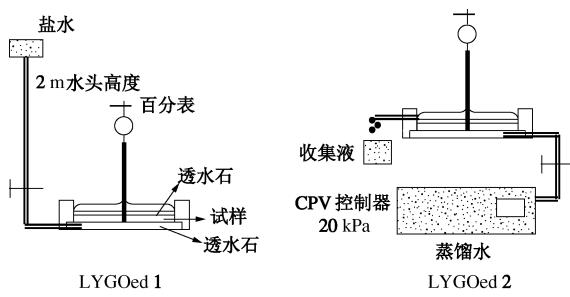


图 4 换盐/固结实验装置

Fig. 4 Equipment of percolation and oedometer tests

本次试验的土样取自#1 场地 2 m 深度处。试验过程中,首先将土样装入设计的固结试验盒,然后加压到小于前期固结压力的某一应力水平(本次试验中加压到 50 kPa,略小于前期固结压力),然后在固结盒底部通上一定水头(试验中水头为 2 m)的蒸馏水和#1 取样点原位地下水(盐水)。待固结盒顶部出水后,收集排出水,量测其电导率,当电导率趋于稳定时,认

为采用蒸馏水换盐试验结束。然后对经蒸馏水和盐水渗透后土体进行压缩(加压至 1600 kPa)和回弹(卸载到 12.5 kPa)试验,记录试样的变形,分析换盐前后土体的各项压缩指标变化。由于盐分会对标准控制器产生腐蚀,因此采用恒定水头的方法注入盐水。从固结盒底部注入盐水的试样记录为 LYGOed1,而从底部注入蒸馏水的试样记录为 LYGOed2。

#### 3.2 试验结果与讨论

本次换盐和固结试验,共进行 1470 h(大约 61 d),换盐试验大约进行了 1000 h(大约 43 d),固结试验进行了 18 d。LYGOed2 换盐过程中总共注入了 334 cm<sup>3</sup> 的蒸馏水,为土样总体积的 5.6 倍,为初始孔隙体积的 11.5 倍。

换盐和固结试验过程中,加载过程、变形,LYGOed2 的排出水的电导率以及排水量如图 5 所示。从图 5 看出,LYGOed2 试样孔隙水溶液的电导率从 64.5 mS/cm 下降到 1.29 mS/cm(对应盐分含量约为 0.1%),最后 8 d 的电导率几乎保持不变,认为换盐基本完成。对比 LYGOed1 和 LYGOed2 的换盐试验过程中土体的变形曲线,发现 LYGOed1 的试样在换盐过

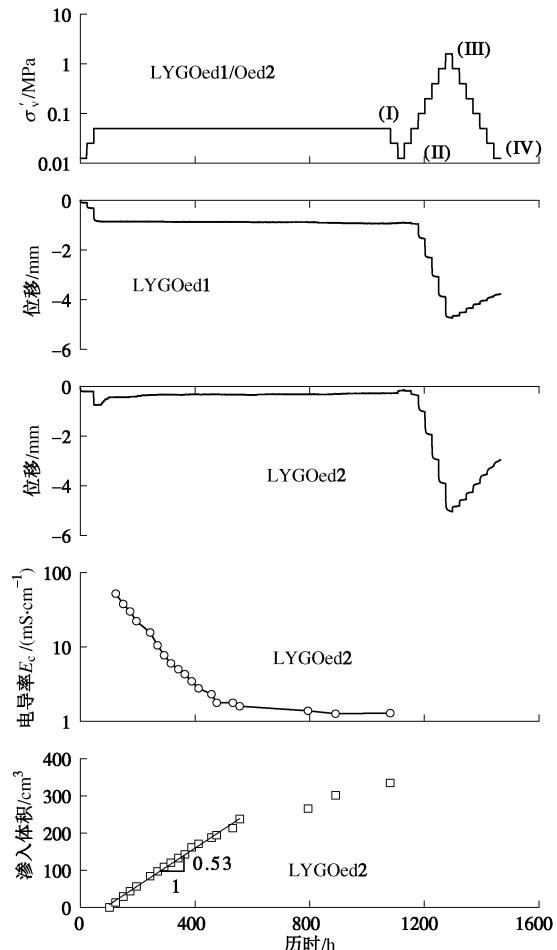


图 5 荷载、变形、电导率和渗透体积的历时曲线

Fig. 5 Time-dependent curves of loading, deformation, electric conductivity and percolation volume

程中土体产生较小的次固结变形, 而 LYGOed2 的试样土体发生一定的膨胀。这一现象可根据扩散双电层理论解释<sup>[19]</sup>, 即: 蒙脱石族晶体组成的黏土片与双电层间的阳离子形成的半透膜体系, 当孔隙水离子浓度低于层间离子浓度, 水分子进入黏土片, 体积膨胀。

根据图 5 的沉降历时曲线可以进一步整理得到土体的  $e - \lg \sigma'_v$  曲线, 如图 6 所示。结果表明未换盐前两个土样压缩曲线基本一致, 而蒸馏水渗透的 LYGOed2 试样发生了一定的膨胀, 土体孔隙比增大, 而盐水渗透的试样 LYGOed1 孔隙比保持不变。在第一个卸载阶段 (50 kPa → 12.5 kPa), LYGOed1 的回弹指数  $C_s$  相对较小。LYGOed1 在 50 kPa 至 12.5 kPa 这个加荷循环过程中为直线, 而 LYGOed2 则表现出滞回现象。再压缩阶段 (50 kPa → 1600 kPa) LYGOed2 的压缩曲线斜率  $C_c$  大于 LYGOed1。第二个卸载回弹阶段 (1600 kPa → 12.5 kPa) LYGOed2 的回弹指数  $C_s$  也大于 LYGOed1。

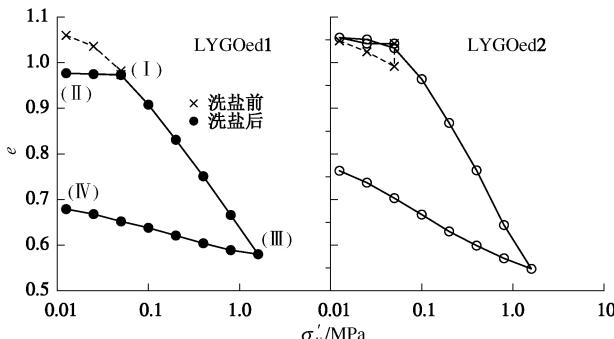


图 6 压缩曲线

Fig. 6 Compression and swelling curves

为了更好地定量评价孔隙水盐分对土体压缩特性影响, 对压缩指数  $C_c$ 、回弹指数  $C_s$  和压缩模量  $E_{Oed}$ 、固结系数  $C_v$ 、渗透系数  $k$  和次固结系数  $C$  进行对比分析, 计算方法如下所示:

$$E_{Oed} = h_i \frac{d\sigma'}{dh}, \quad (1)$$

$$C_v = \frac{0.197 H^2}{t_{50}}, \quad (2)$$

$$k = \frac{C_v \rho_w g}{E_{Oed}}, \quad (3)$$

$$C_\alpha = -\frac{de}{d \lg t}, \quad (4)$$

式中,  $h_i$  为试样厚度,  $dh$  为土样变形量,  $d\sigma'_v$  为竖向荷载增量,  $H$  为排水距离,  $t_{50}$  为完成 50% 固结度所需要的时,  $\rho_w$  为水的重度,  $g$  为重力加速度。

图 7, 8 进一步表明了 LYGOed1 的压缩指数和回弹指数小于 LYGOed2, 但是压缩模量正好相反, 说明孔隙水盐分浓度降低使土的压缩性增大。图 9 为试样固结系数的对比, 结果表明土体的固结系数随孔隙水

盐分降低而减小, 即达到相同固结度所需的时间越长。

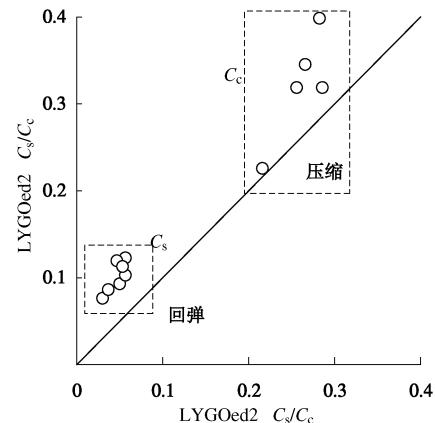


图 7 压缩指数与回弹指数对比

Fig. 7 Comparison between compression and swelling indice

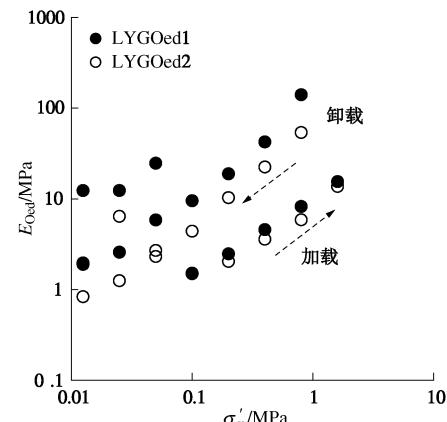


图 8 压缩模量对比

Fig. 8 Comparison of compression moduli

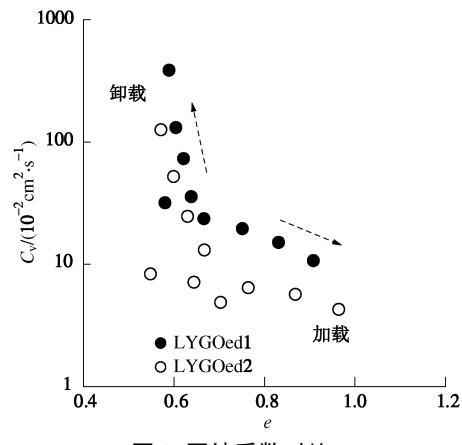


图 9 固结系数对比

Fig. 9 Comparison of consolidation coefficients

Tavenas 等<sup>[20]</sup>统计了多种土体渗透系数与孔隙比的关系, 发现渗透系数与孔隙比在  $e - \lg k$  的坐标中呈线性关系, 其斜率为 0.5 倍的初始孔隙比。图 10 给出了两个试样的  $e - \lg k$  曲线, 发现渗透系数与孔隙比在  $e - \lg k$  坐标中也呈较好的线性关系, 孔隙水盐分淋洗前两个土样渗透系数与孔隙比基本在同一直线上。孔隙水置换结束后, LYGOed2 渗透系数明显降低, 其  $e - \lg k$  曲线明显位于盐水淋洗试样的下方, 斜率保持不

变, 截距变小。

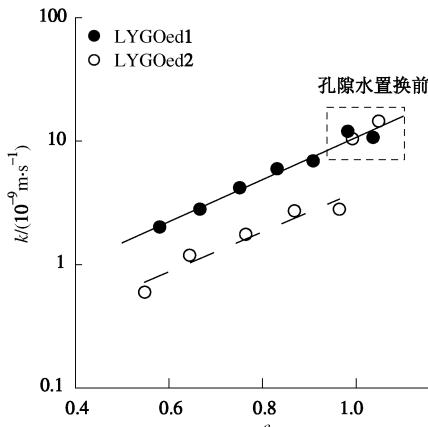


图 10 渗透系数对比

Fig. 10 Comparison of hydraulic conductivities

根据 Carman<sup>[21]</sup>和 Kozeny 等<sup>[22]</sup>对多孔介质渗透性的研究, 渗透系数与孔隙比的关系可以表述为

$$k = \frac{\rho_w}{\mu C_{K-C} S_{SA}} \frac{e^3}{1+e} \quad , \quad (5)$$

式中,  $\mu$  为某一温度下水的黏滞系数,  $C_{K-C}$  为卡尔曼常数,  $S_{SA}$  为土体的比表面积。Deng 等<sup>[23]</sup>结合 Carman<sup>[21]</sup>、Kozeny 等<sup>[22]</sup>、Tavenas 等<sup>[20]</sup>的研究以及比表面积和液限的关系, 根据比利时 Boom 黏土渗透特性的测试结果, 将 Carman 等渗透系数与孔隙比的关系式拟合为

$$k = \frac{A}{w_L^{2.9}} 10^{Be} \quad , \quad (6)$$

式中,  $A$ ,  $B$  为常数,  $w_L$  为液限。

根据图 9 土体的渗透系数与孔隙比的统计关系, 认为渗透系数减小的原因是孔隙水盐分降低导致了液限增加; 孔隙水盐分降低会导致液限增加这一结论, 与 Di 等<sup>[11]</sup>和 Gajo 等<sup>[12]</sup>成果是一致的。

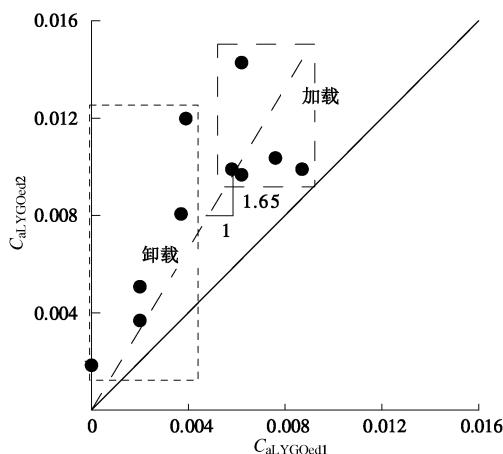


图 11 次固结系数对比

Fig. 11 Comparison of secondary consolidation coefficients

图 11 为 LYGOed1 与 LYGOed2 次固结系数的对比, 发现 LYGOed2 的次固结系数较 LYGOed1 大 1.65

倍, 即采用蒸馏水洗盐后的试样较仅注入原位地下水 (或者不换盐) 的试验大 1.65 倍。图 12 对比了 LYGOed1 与 LYGOed2 次固结系数与压缩指数比值  $C_a/C_c$ , 结果表明 LYGOed1 较 LYGOed2 略低。

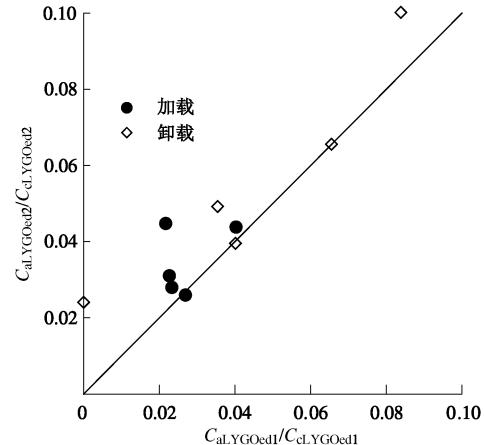


图 12 次固结系数/压缩指数比值的对比

Fig. 12 Comparison of ratios of secondary consolidation coefficient to compression index

## 4 结 论

连云港软土是中国东南沿海第四纪沉积海相软土的代表, 孔隙水盐分对其工程特性的影响认识仍不明晰, 而国内外已有的研究表明, 孔隙水盐分对软黏土的压缩和强度特性有重要影响。本文采用原位测试和自行设计的室内换盐试验装置, 探讨了孔隙水盐分对连云港典型的天然沉积结构性软黏土强度和压缩特性的影响, 取得了以下结论:

(1) 对比了离海岸线 50 m 处<sup>#1</sup>场地与离海岸线 30 km 处<sup>#2</sup>场地土样的基本物理参数, 结果显示  $w_0/w_L$  非常接近, 同时土的颗粒粒组与矿物成分基本相同, 而<sup>#1</sup>场地的孔隙水离子浓度是<sup>#2</sup>场地的 50 倍。多功能 CPTu 获得两处取样点 1.5~10.5 m 间对应深度的净锥尖阻力  $q_t$ 、侧壁摩阻力  $f_s$ 、锥肩位置孔隙水压力  $u_2$ 、摩阻比  $R_t=f_s/q_t$  和孔压系数  $B_q$  等原位测试参数, 对比后发现, 相同深度的<sup>#1</sup>场地不排水抗剪强度大于<sup>#2</sup>场地。两个场地的沉积环境, 含水比  $w_0/w_L$  与基本物理参数和矿物成分基本相同, 排除对软黏土强度产生影响的其他因素后, 推测孔隙水中盐分差异是影响强度的重要因素。

(2) 为了更好地定量评价孔隙水盐分对土体压缩特性影响, 设计了特殊的换盐与固结仪, 对取自<sup>#1</sup>场地的两组试样 LYGOed1 与 LYGOed2 分别注入盐水与蒸馏水, 置换孔隙水, 并对置换后的试样进行固结试验, 获取压缩指数  $C_c$ 、回弹指数  $C_s$  和压缩模量  $E_{Oed}$ 、固结系数  $C_v$ 、渗透系数  $k$  和次固结系数  $C$  等参数, 对比分析结果显示: 孔隙水置换后, LYGOed1 的压缩

指数和回弹指数小于 LYGOed2, 但是压缩模量正好相反; LYGOed1 的固结系数与渗透系数较大, LYGOed2 次固结系数较大, 说明了盐分溶脱环境下, 土的压缩性增大, 次固结变形增大, 固结时间变长, 渗透系数变小。研究成果能为研究近海结构性软黏土提供参考。

## 参考文献:

- [1] 任美锷. 江苏省海岸带与海涂资源综合考察报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1987: 517. (REN Mei-e. Investigation report of coastal zone and tideland resource in Jiangsu Province[M]. Beijing: Ocean Press, 1987: 517. (in Chinese))
- [2] 魏汝龙. 我国沿海软黏土特性及其工程问题[J]. 水利水运科学研究, 1985(3): 109 - 121. (WEI Ru-long. The engineering behavior of coastal soft clay in China[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1985(3): 109 - 121. (in Chinese))
- [3] LIU S Y, CAI G J, TONG L Y, et al. Approach on the engineering properties of Lianyungang marine clay from piezocone penetration tests[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2008, **26**(3): 189 - 210.
- [4] 邓永锋, 吴燕开, 刘松玉, 等. 连云港浅层海相软土沉积环境及物理力学性质研究[J]. 工程地质学报, 2005, **13**(1): 29 - 34. (DENG Yong-feng, WU Yan-kai, LIU Song-yu, et al. Sediment environment of shallow marine clays deposited in Lianyungang area and their physical and mechanical properties[J]. Engineering Geology, 2005, **13**(1): 29 - 34. (in Chinese))
- [5] CHEN J, ANADARAJAH A. Influence of pore fluid composition on volume of sediments in kaolinite suspensions[J]. Clays and Clay Minerals, 1998, **46** (2): 145 - 152.
- [6] SRIDHARAN A, PRAKASH K. Influence of clay mineralogy and pore medium chemistry on clay sediment formation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, **36**: 961 - 966.
- [7] KAYA A, ÖREN A H, YUKSELEN-AKSOY Y. Settling of kaolinite in different aqueous environment[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2006, **24**(3): 203 - 218.
- [8] ABDULLAH W S, AL-ZOU'BI M S, ALSHIBLI K A. On the physicochemical aspects of compacted clay compressibility[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, **34**(4): 551 - 559.
- [9] KAYA A, FANG H Y. The effects of organic fluids on physicochemical parameters of fine-grained soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**: 943 - 950.
- [10] SRIDHARAN A, EL-SHAFFEY A, MIURA N. Mechanisms controlling the undrained strength behavior of remolded Ariake marine clays[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2002, **20**: 21 - 50.
- [11] DI Maio C, SANTOLI L, SCHIAVONE P. Volume change behavior of clays: the influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state[J]. Mechanics of Materials, 2004, **36**: 435 - 451.
- [12] GAJO A, MAINES M. Mechanical effects of aqueous solutions of inorganic acids and bases on a natural active clay[J]. Géotechnique, 2007, **57**(8): 687 - 699.
- [13] YUKSELEN-AKSOY Y, KAYA A, ÖREN A H. Seawater effect on consistency limits and compressibility characteristics of clays[J]. Engineering Geology, 2008, **102**: 54 - 61.
- [14] ÖREN A H, KAYA A. Some engineering aspects of homoionized mixed clay minerals[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2003, **84**: 85 - 98.
- [15] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J J M. Cone penetration testing in geotechnical practice[M]. London: Blankie Academic and Professional, 1997.
- [16] 蔡国军. 现代数字式多功能CPTU技术理论与工程应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2010. (CAI Guo-jun. Study on theory and engineering application of digital multifunctional piezocone penetration test (CPTU)[D]. Nanjing: Southeast University, 2010. (in Chinese))
- [17] HONG Z, LIU S, NEGAMI T. Strength sensitivity of marine Ariake clays[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2005, **23**(3): 221 - 233.
- [18] GENS A. Soil-environment interactions in geo-technical engineering[J]. Géotechnique, 2010, **60**(1): 3 - 74.
- [19] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: Wiley, 1976.
- [20] TAVENAS F, JEAN P, LEBLOND J, et al. The permeability of natural soft clays Part II: permeability characteristics[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, **20**(4): 645 - 660.
- [21] CARMAN P C. Flow of gases through porous media[M]. London: Butterworths Scientific Publications, 1956.
- [22] KOZENY J. Ueber kapillareleitung des wassers im boden[J]. Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien, 1927, **136**(2): 271 - 306. (KOZENY J. About capillary pipe of the water in the soil[J]. Proceedings of the Academy of Sciences in Vienna, 1927, **136**(2): 271 - 306. (in German))
- [23] DENG Y F, TANG A M, CUI Y J, et al. Study on the hydraulic conductivity of Boom clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **48**: 1461 - 1470.