

海相黏土孔压静力触探试验指标与离子化学特性的关系

邵光辉^{1,2}, 刘松玉¹, 杜广印¹, 蔡国军¹

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210093; 2. 南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要:通过孔压静力触探试验(CPTU), 获得连云港海相黏土的不排水抗剪强度、超固结比和静止侧压力系数, 并对土样进行离子化学分析。原位测试指标与各离子含量的相关性分析表明, 显著影响原位测试指标的是 Fe^{3+} 含量。 Fe^{3+} 在连云港海相黏土中以胶体方式存在, 影响土颗粒之间的胶结联结, 较多 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体形成的粒间联结能造成土体的轻微超固结性, 影响土的弹性特征。

关键词:孔压静力触探; 原位测试; 离子成分; 海相黏土; Fe^{3+} 含量

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)10-1582-05

作者简介:邵光辉(1973-), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事软土地基处理和深开挖工程研究。E-mail: gh_shao@njfu.com.cn。

Correlation between CPTU index characteristics and ion chemistry of marine clay

SHAO Guang-hui^{1,2}, LIU Song-yu¹, DU Guang-yin¹, CAI Guo-jun¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210093, China; 2. Civil Engineering College, Nanjing Forest

University, Nanjing 210037, China)

Abstract: The piezocone penetration tests (CPTU) were performed in Lianyungang, China, and several in-situ test indexes such as undrained shear strength (S_u), overconsolidation ratio (OCR) and coefficient of earth pressure at rest (K_0) were calculated. The ionic chemistry examinations were also adopted. It was shown that the Fe^{3+} concentration was the obvious factor influencing on in-situ test index of Lianyungang marine clay. The Fe^{3+} existed as colloid in Lianyungang marine clay, which might influence the cementation between soil particles. More $\text{Fe}(\text{OH})_3$ colloid content could lead to light overconsolidation and influence the elastic characteristics of the clay.

Key words: piezocone penetration test; in-situ test; ion component; marine clay; Fe^{3+} concentration

0 引言

我国江苏沿海地区广泛覆盖着自全新世以来历经多次海侵、海退而形成的海相黏土^[1], 与所有的沉积作用一样, 这些沉积物在沉积过程中也在发生矿物风化、表层的盐分淋滤、孔隙水的离子交换等作用。Quigley^[2]在研究了加拿大软黏土的沉积化学和岩土工程特性后指出, 黏土在沉积过程中的风化、盐分淋滤和离子交换等化学变化会影响其岩土工程性质。Ohtsubo等^[3]研究日本 Ariake 海湾黏土时, 重点讨论了铁氧化物的胶结作用对海相黏土超固结特性的影响, 并指出铁的氧化沉积后形成的土粒间的胶结硬化明显影响土的 OCR、 s_u/σ'_{vm} 值。江苏连云港地区的海相黏土, 是我国沿海地区海相沉积软土的一个重要代表。不少学者对其现场勘探、室内试验的相关指标特点进行过研究^[4-5]。近年来, 随着原位测试技术的发展, 又为我们研究该海相黏土提供了新的途径。与室内试

验相比, 现场原位试验能最大程度地保证土层原始的空间应力状态, 更详细真实地反映土体在空间竖直方向上的变化规律。把现场原位试验与室内的化学特性分析相结合, 来探讨土性本质与其工程表现之间的规律性, 能有助于对影响海相软土特性内因的把握, 为软土地基处理提供理论基础。

原位试验和取样地点位于连云港以南, 连云港至盐城高速公路 14 km+140 处。现场进行了孔压静力触探试验(CPTU), 并对该点所取土样进行了离子化学分析。

1 原位试验

1.1 孔压静力触探试验(CPTU)

现场孔压静力触探试验(CPTU)采用多功能数字式 CPTU 系统, 不同于目前国内普遍使用的双桥静

力触探, 其多功能 CPTU 探头的数字化、多功能与多参数的优点彻底消除了测试时电缆阻力、噪音影响, 可进行温度、倾斜校正, 保证了测试精度。探头规格符合国际标准, 探头锥底截面积为 10 cm^2 , 锥角 60° , 锥底直径 35.7 mm , 贯入速率 20 mm/s 。试验除可测锥尖阻力 q_c 、侧壁摩擦力 f_s 外, 还可通过位于锥肩位置的 5 mm 厚孔压过滤器测试孔隙水压力 u_2 , 了解地下水位以下各土层的孔隙水压力及超孔隙水压力消散过程。根据测得的超孔隙水压力消散曲线, 可以推求土层的超固结比 OCR、静止侧压力系数 K_0 、渗透系数 k 及固结系数 C_h 等重要的土的工程性质参数。图 1 是静力触探试验所测得的锥尖阻力、侧壁阻力和超孔隙水压力曲线。锥尖阻力、侧壁阻力随深度的变化很明显地显示了具有低强度特性的连云港海相软黏土层的分布范围是从深度 1.8 m 到 12.0 m , 12.0 m 以下是夹砂的亚黏土层。在海相软黏土层中探头阻力都很小, 其中锥尖阻力随深度略有增加, 侧壁阻力则随深度几乎没有变化。本文的研究对象即为这一海相软黏土层。

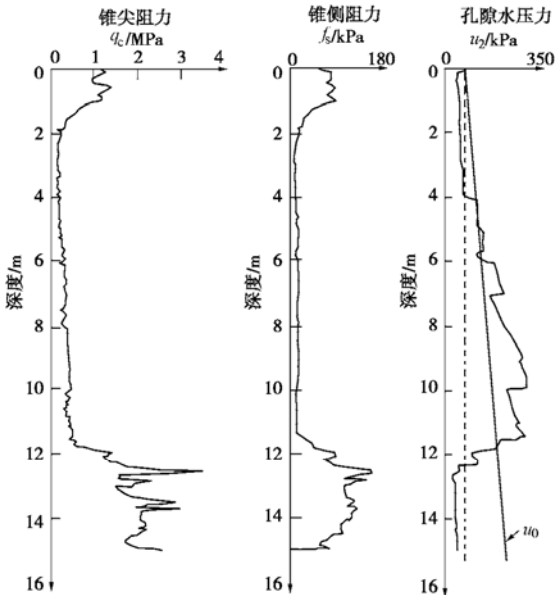


图 1 现场 CPTU 试验的锥尖阻力、侧阻和超孔隙水压力
Fig. 1 Tip resistance, local friction and pore pressure of in-situ CPTU

考虑到在锥体压入土层的过程中孔隙水压力对锥尖阻力的实际影响, 需要按式 (1) 对测得的总应力 q_c 进行孔隙水压力修正, 以获得实际的总应力 q_t 。

$$q_t = q_c + 0.2u_2 \quad (1)$$

式中, q_t 为修正后锥尖阻力, q_c 为修正前锥尖阻力, u_2 为位于锥肩位置的孔压过滤器测得的孔压。

1.2 孔压静力触探 (CPTU) 指标

Mayne^[6]基于孔穴扩张和临界状态土力学的理论方法, 提出了由静力触探指标计算超固结比 OCR 的

方法, 其后经过了一系列修正和改进, 本文根据 Mayne 等^[7]提出的关系式计算超固结比 OCR:

$$OCR = 2 \left[\frac{1}{1.95M + 1} \left(\frac{q_t - u_2}{\sigma'_{v0}} \right) \right]^{1.33} \quad (2)$$

式中, M 为临界状态线斜率, σ'_{v0} 为土层有效垂直压力。

基于 CPTU 资料建立超孔隙水压力 Δu 与不排水抗剪强度 s_u 之间的关系式, 采用公式:

$$s_u = \frac{\Delta u}{N_{\Delta u}} \quad (3)$$

计算饱和软黏土的不排水抗剪强度 s_u 。式中, $N_{\Delta u}$ 是根据 Lunne 等^[8]的研究成果由孔压系数得出, $\Delta u = u_2 - u_0$ 。

按照 Sully 和 Campanella^[9]提出采用归一化孔压差异计算静止侧压力系数 K_0 方法, 并结合 Kurup^[10]的经验公式按下式计算 K_0 :

$$K_0 = a + 1.5 + \frac{0.21(u_2 - u_0)(1 + 2a)}{\sigma'_{v0}} \quad (4)$$

式中, a 为常数, 小于正常固结土的 K_0 值。

图 2 是根据孔压静力触探试验 (CPTU) 按式 (2)~(4) 得到的相应测试指标随深度的变化。可见, 超固结比 OCR、不排水抗剪强度 s_u 和静止侧压力系数 K_0 随埋深的变化规律比较一致, 均在深度 6.0 m 和 10.0 m 处出现较大的值, 而这一变化在孔压静力触探试验 (CPTU) 的锥尖阻力、侧壁阻力和孔隙水压力曲线上并不能直接观察到。

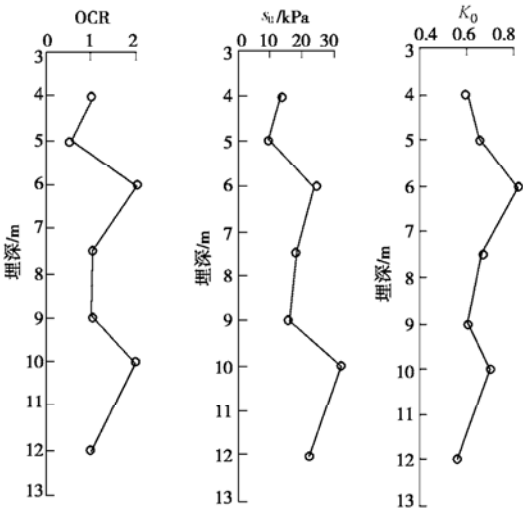


图 2 超固结比 OCR、不排水抗剪强度 s_u 和静止侧压力系数 K_0 随埋深的变化

Fig. 2 Variation of OCR, s_u and K_0 with depth

2 离子化学分析

2.1 离子分析试验

研究中采取对风干土样提取浸出液分析其阴、阳离子成分的方式来进行。为提取浸出液,对不同埋深的试样进行了如下处理:各称取过 2 mm 筛风干试样 70 g,按土水比 1:5 加入蒸馏水,电磁搅拌器中搅拌 30 min,然后对悬浊液采用离心机分离。所得透明滤液用来试验。阳离子采用原子吸收分光光度计测定,阴离子采用化学滴定法测定。

2.2 离子分布特征

图 3 给出了该黏土浸出液阴、阳离子的含量随深度的变化。可以看出,阳离子中 Na^+ 含量远远大于 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , 是最主要的阳离子,在阴离子中以 Cl^- 为主要成分, SO_4^{2-} 含量很少。由于不同种类离子含量存在数量级上的差别,所以图 3 在表示阳离子含量时采用了半对数坐标。连云港海相黏土的这一离子组成特点说明该土是较典型的单一 NaCl 型含盐黏土。其含盐成分随深度有变化,深度 6.0 m 和 10.0 m 处含盐量相对较少。

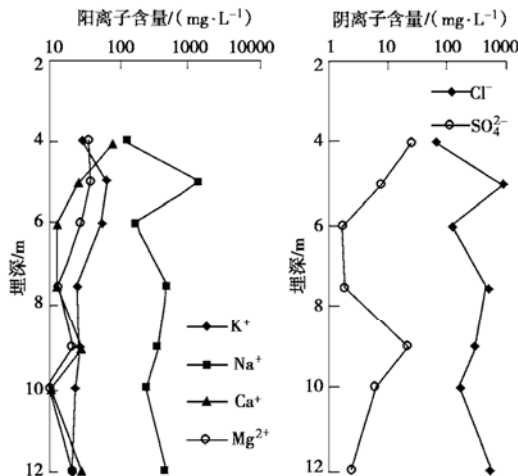


图 3 土中阴、阳离子含量分布

Fig. 3 Distribution of cation and anion concentration in the clay

图 4 表示了 Fe^{3+} 含量和 pH 值随深度的变化。土样 pH 值变化范围从 7.57 到 8.89。靠近地表处 pH 值较小,接近中性,5.0 m 以下 pH 值介于 8.0 到 9.0 之间,一致地呈现一定的弱碱性。通常河水的 pH 值约为 7,海水的 pH 值在 7.8~8.3 之间。因此,连云港海相黏土 pH 值随深度的变化规律也反映了浅部土体受地表水作用的影响,而深层土体则保留了原始海水沉积的碱性环境特点。

图 4 中的 Fe^{3+} 分布可见,在深度 6.0 m 和 10.0 m 处,其含量最高,与其它深度的土层存在数量级上的差别。对比 pH 值的变化,也是这两个深度的 pH 值最大。在对连云港海相黏土土体浸出悬液进行离心分离时也发现,深度 6.0 m 和 10.0 m 处的土样需要明显高于其它深度样本的离心转速才能分离出清液。观察清液时,还能发现深度 6.0 m 和 10.0 m 处的浸出液不同

于其它深度的无色透明,而是呈深褐色,光束照射能够呈现丁达尔 (Tyndall) 效应^[11],表明该深度土体中有大量 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体存在。根据 Garrels R M 和 Christ C L^[12]对铁在不同 pH 值下的溶解度研究可知,铁在溶液中的溶解完全受环境的影响,控制铁的溶解度及溶解与沉淀的最根本因素就是 pH 值和氧化还原电位。在碱性海水环境下,铁呈三价存在, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 迅速沉积而形成一种非晶质的容积大的深褐色胶体。

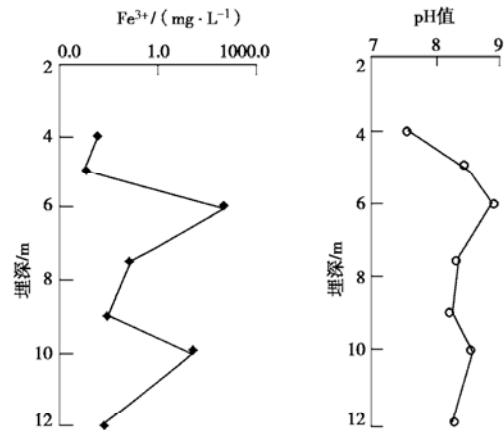


图 4 不同深度处的 Fe^{3+} 含量与 pH 值

Fig. 4 Fe^{3+} concentration and pH values in the clay

连云港海相黏土的离子含量和 pH 值分布情况表明,历经多次海侵、海退过程形成的软黏土沉积是非均质的,在不同深度存在离子化学特征上的差异。

3 相关性分析

通过图 2 的原位测试指标和图 3,4 的离子化学分析的结果可看到,深度 6.0 m 和 10.0 m 处的土体的原位测试指标变化与土的离子成分以及酸碱度可能存在关联,但仅凭相应的曲线变化趋势相近而作出这一判断还缺乏足够的根据。

为确定 CPTU 原位测试指标是否与土的离子化学特征存在客观的相关性,分别对原位试验得到的不排水抗剪强度 s_u 、超固结比 OCR 和静止侧压力系数 K_0 与土中的各离子含量进行了相关性分析,见表 1。通过相关系数和线性回归判定系数 R^2 两种方式判定其相关性,并对判定结果进行 F 检验。其中相关系数定义为

$$\rho_{xy} = \frac{\text{COV}(X,Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y}, \quad (5)$$

相关系数越大,说明两组统计数据之间的相关性越大。在表 1 中,判定系数大于 0.7 的 4 对组合分别是: s_u 与 Fe^{3+} 为 0.792、OCR 与 Fe^{3+} 为 0.955、 K_0 与 Fe^{3+} 为 0.870、 K_0 与 Fe^{3+} 为 0.872。

判定系数 R^2 定义为线性回归值与实际值之比, R^2 越大,表明两组数据之间的线性相关性越大。在表 1

表 1 CPTU 原位试验指标与土中离子含量 (mg/L) 相关性分析
Table 1 Correlation between the CPTU indexes and the ion concentration

土性指标	统计指标	Fe ³⁺	*Fe ³⁺ (Ln)	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
<i>s_u</i>	相关系数	0.379	0.792	-0.405	-0.568	-0.520	-0.743	-0.471	-0.502
	<i>R</i> ²	0.144	0.628	0.164	0.323	0.270	0.551	0.222	0.252
	<i>F</i>	0.840	8.439	0.981	2.383	1.849	6.146	1.424	1.684
OCR	相关系数	0.694	0.955	-0.124	-0.671	-0.392	-0.482	-0.303	-0.706
	<i>R</i> ²	0.481	0.911	0.015	0.450	0.154	0.232	0.092	0.498
	<i>F</i>	4.637	51.448	0.078	4.087	0.908	1.510	0.507	4.967
<i>K₀</i>	相关系数	0.870	0.872	0.506	-0.176	-0.486	-0.074	-0.438	-0.302
	<i>R</i> ²	0.757	0.760	0.256	0.031	0.237	0.005	0.192	0.091
	<i>F</i>	15.612	15.869	1.724	0.159	1.549	0.027	1.188	0.502

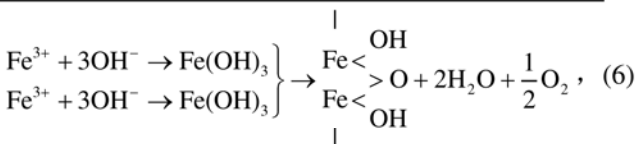
中, 判定系数大于 0.6 的 4 对组合分别是: *s_u* 与 *Fe³⁺ 为 0.628、OCR 与 *Fe³⁺ 为 0.911、*K₀* 与 Fe³⁺ 为 0.757、*K₀* 与 *Fe³⁺ 为 0.760, 表明在不排水抗剪强度与 Fe³⁺ 含量的对数值之间、超固结比 OCR 与 Fe³⁺ 含量的对数值之间、静止侧压力系数 *K₀* 与 Fe³⁺ 含量及其含量的对数值之间存在较大的相关性。需要说明的是, 表 1 中同时列出了 Fe³⁺ 含量及其对数值的相关性统计指标, 而没有列出其它离子含量对数值的统计指标, 主要是因为只有 Fe³⁺ 在不同埋深处存在数量级上的差别, 并且其它离子含量的对数值在进行相关性分析时反映出的相关性更差, 故未在表 1 中列出。

为了避免事实上在变量间不存在相关性, 但由于选用小样本进行统计分析却导致很强的相关性, 通过 *F* 统计来确定具有如此高的 *R*² 值的结果偶然发生的可能性。如果 *F* 观测统计值大于 *F* 临界值, 表明变量间存在相关性。*F* 临界值可以从许多的统计类书籍的 *F* 统计临界值表中查到。在该统计中, 显著性水平在 0.05 时的 *F* 临界值为 6.61。在表 1 中, 判定系数大于 0.6 的上述 4 对组合的 *F* 观测统计值分别为 8.439、51.448、15.612、15.869, 均大于 6.61, 说明其相关性是存在的且非是偶然, Fe³⁺ 含量明显影响 CPTU 原位试验的这 3 个指标, 而其它离子含量对原位测试指标无明显影响。OCR 与 Fe³⁺ 含量对数值之间的 *F* 观测统计值最大, 为 51.448, 远大于 *F* 统计临界值, 且其相关系数达 0.955, 说明 OCR 受 Fe³⁺ 含量影响最明显。*s_u* 与 *Fe³⁺ 为组合的相关系数和判定系数 *R*² 最小, *F* 观测统计值虽超过临界值却较小, 说明 Fe³⁺ 含量对 *s_u* 只有很小的影响。

4 离子含量对原位测试指标的影响

相关性分析表明, 在连云港海相黏土的主要阴、阳离子中, 对原位测试指标有显著影响的只有 Fe³⁺ 的含量, 其它离子含量则对其无明显影响。

Fe³⁺ 在土体孔隙溶液的碱性环境中, 会以携带结晶水的 Fe(OH)₃ 胶体方式存在, 这种胶体能缓慢地老化, 其生成过程为



这种褐色胶体的通用的化学式是 Fe(OH)₃·*n*H₂O, 低温和高 pH 值下, 有利于老化发展^[13]。这一老化产物形成土体颗粒间的原始胶结物, 使土体在很疏松的絮凝结构下形成一定的胶结联结, 从而影响土体的结构强度。

图 5, 6, 7 表示的是连云港海相黏土的 *s_u*、OCR、*K₀* 随 Fe³⁺ 含量的变化。*s_u*、OCR、*K₀* 均与 Fe³⁺ 含量的对数值呈正相关。图 6 中 OCR 与 Fe³⁺ 含量的关系说明土粒间的胶体凝聚对土粒间的联结有贡献, 较多的 Fe(OH)₃ 胶体凝聚物能增加土的初始结构强度, 提高土的固结屈服强度, 造成土体的轻微超固结性。图 5 反映 *s_u* 随 Fe³⁺ 含量的对数值增加而增加, 结合相关性分析中 Fe³⁺ 含量与 *s_u* 相关性较小的结论可见, Fe(OH)₃ 胶体及其老化的胶结物主要影响的是土的初始结构强度, 一旦外力超过这一强度, 则土粒间的胶结联结遭到破坏, 土体的强度主要由其颗粒间咬合摩擦及电分子引力提供, 胶结物对其强度的影响不再明显甚至不表现。由于 *K₀* 与土的弹性常数泊松比 *μ* 存在客观上的对应关系 *K₀* = *μ*/(1 - *μ*), 所以图 7 中 *K₀* 与 Fe³⁺ 含量的关系说明土的弹性特征也与土中 Fe(OH)₃ 胶体含量相关。土粒间胶体含量越高, 土体的泊松比 *μ* 越大。

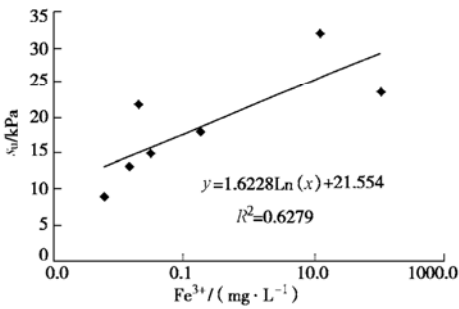


图 5 不排水抗剪强度 *s_u* 与 Fe³⁺ 含量的关系
Fig. 5 Correlation of iron cation concentration and undrained shear strength *s_u*

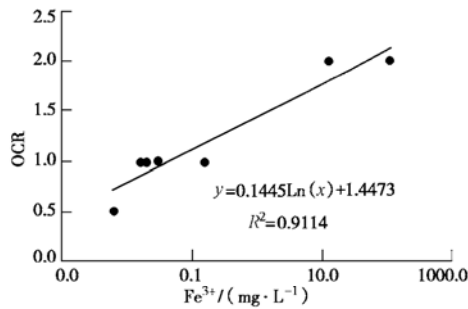
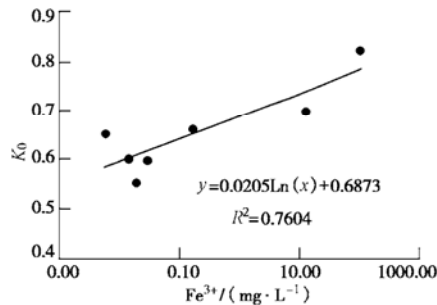
图6 超固结比 OCR 与 Fe^{3+} 含量的关系

Fig. 6 Correlation of iron cation concentration and OCR

图7 静止侧压力系数 K_0 与 Fe^{3+} 含量的关系Fig. 7 Correlation of iron cation concentration and K_0

5 结 论

连云港海相黏土是较典型的单一 NaCl 型含盐黏土, 在碱性环境下沉积。影响连云港海相黏土原位测试指标的主要离子成分是 Fe^{3+} , Fe^{3+} 含量与 pH 值呈正相关, 而 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 含量对原位测试指标无明显影响。

历经多次海侵、海退过程形成的连云港海相软黏土沉积是非均质的, 不同深度土体的原位测试指标和离子化学特征存在差异。尤其深度 6.0 m 和 10.0 m 处的土体由于 Fe^{3+} 含量较高而表现出不同于其它深度土体的原位测试指标特征。在研究连云港海相软黏土的工程性质时, 应认识到这一点。

连云港海相黏土中的 Fe^{3+} 含量对 s_u , OCR, K_0 有影响。 s_u , OCR, K_0 均与 Fe^{3+} 含量的对数值呈正相关。 Fe^{3+} 在碱性环境下会明显影响土体的结构强度, 较多 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体形成的粒间联结能造成土体的轻微超固结性, 并影响土的弹性特征。

参考文献:

[1] 邓永锋, 吴燕开, 刘松玉, 洪振舜. 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 - 33. (DENG Yong-feng, WU Yan-kai, LIU Song-yu, HONG Zhen-shun. Sediment environment of shallow marine clay in Lianyungang area and their physical and mechanical properties[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(1): 29 - 33. (in Chinese))

[2] QUIGLEY R M. Geology, mineralogy and geochemistry of soft soils and their relationship to geotechnical problems[C]//Canadian Geotechnical Conference, Quebec, 1979, 2: 39.

[3] OHTSUBO M, EGASHIRA K, KASHIMA K. Depositional and post-depositional geochemistry, and its correlation with the geotechnical properties of marine clays in Ariake Bay, Japan[J]. Geotechnique, 1995, 45(3): 509 - 523.

[4] 陈艺南, 刘松玉. 江苏沿海高速公路软土路基问题的工程地质分析[J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2001, 23(6): 507 - 511. (CHEN Yi-nan, LIU Song-yu. Engineering geological analysis of problems of soft-soil foundation for expressway in coastal area of Jiangsu province[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2001, 23(6): 507 - 511. (in Chinese))

[5] 章定文, 刘松玉, 于新豹. 连云港海相软土工程特性及处理方法探讨[J]. 工程地质学报, 2003, 11(3): 250 - 257. (ZHANG Ding-wen, LIU Song-yu, YU Xin-bao. Discussion on the engineering characteristics of marine soft soil and method for its treatment in Lianyungang[J]. Journal of Engineering Geology, 2003, 11(3): 250 - 257. (in Chinese))

[6] MAYNE P W. Determining preconsolidation pressures from DMT contact pressures[J]. Journal of Geotechnical Test, 1987, 10: 146 - 150.

[7] MAYNE P W, ROBERTSON P K, LUNNE T. Clay stress history evaluated from seismic piezocone[C]// Proc, ISC '98 Geotech. Site Characterization, Atlanta, 1998, 2: 1113 - 1118.

[8] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J J M. Cone penetration testing in geotechnical practice[M]. London: Blackie Academic & Professional, Chapman & Hall, 1997: 312.

[9] SULLY J P, CAMPANELLA R G. Effect of lateral stress on CPT penetration pore pressure[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 117(7): 1082 - 1088.

[10] KURUP P U, VOYIADJIS G Z, TUMAY M T. Calibration chamber studies of piezocone tests in cohesive soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(1): 81 - 107.

[11] 冯绪胜, 刘洪国, 郝京诚. 胶体化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 41. (FENG Xu-sheng, LIU Hong-guo, HAO Jing-cheng. Chemistry of colloid[M]. Beijing: China Chemical Industry Press, 2005: 41. (in Chinese))

[12] GARRELS R M, CHRIST C L. Solutions, minerals, equilibria[M]. New York: Harper & Row 1965: 175 - 184.

[13] OADES J M. The nature and distribution of iron compounds in soils[J]. Soils and Fertilizers, 1963, 26(2): 69 - 80.