

# 上海地区第 4 层淤泥质黏土灵敏性试验与分析

高彦斌<sup>1,2</sup>, 鲍文鹏<sup>1</sup>, 楼康明<sup>3</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 广州市城市规划勘测设计研究院, 广东 广州 510060)

**摘要:** 采用无侧限抗压强度试验、室内微型十字板剪切试验和原位十字板剪切试验对上海地区广泛分布的第 4 层淤泥质黏土的灵敏性进行了研究, 并通过长达半年的触变恢复试验评价触变性对该软黏土灵敏性的作用。试验结果表明, 由无侧限抗压强度试验得到的灵敏度约为十字板试验的 1.8 倍, 手工重塑导致比十字板重塑更低的强度是造成这 2 种试验测得的灵敏度有较大差别的主要原因, 因此不能直接采用原位十字板试验结果来评价该土层的结构性。长达半年的触变恢复试验结果表明触变性对上海第 4 层淤泥质黏土灵敏性的作用不可忽视, 在采用传统的无侧限抗压强度试验所测得的灵敏度中至少有 1/3 是由于触变性造成的。

**关键词:** 软黏土; 灵敏性; 触变; 强度

**中图分类号:** P642, TU411

**文献标志码:** A

## Laboratory Studies on the Sensitivity of Layer No.4 Soft Clay in Shanghai

GAO Yanbin<sup>1,2</sup>, BAO Wenpeng<sup>1</sup>, LOU Kangming<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute, Guangzhou 510060, China)

**Abstract:** The sensitivity of layer No.4 soft clay in Shanghai was investigated by unconfined compression test, laboratory mini-vane shear test and field vane shear test. The thixotropy test lasting for about half one year was conducted to evaluate the effect of the thixotropy on the sensitivity for the soil. Results show that the sensitivities obtained by unconfined compression test is about 1.8 times that obtained by field vane shear test, smaller strength obtained by hand-remolding method than the vane-remolding method is the major reason that cause the huge difference between the results obtained by the two kinds of test. Therefore, the sensitivity measured by field vane shear test can't be used directly to evaluate the

sensitivity for the soil. The thixotropy test show the contribution of thixotropy on sensitivity of Shanghai soft clay can't be neglected and the thixotropy contributes at least 1/3 on the sensitivity that measured by unconfined compression test.

**Key words:** soft clay; sensitivity; thixotropy; strength

当受到外来因素扰动时, 土粒间的胶结物以及土粒、离子、水分子所组成的平衡体系受到破坏, 土的强度降低和压缩性增大。土的这种由于受到外界扰动导致其强度降低的特性被称之为灵敏性。灵敏性是软黏土的重要特征之一。1944 年, Terzaghi<sup>[1]</sup>最先以灵敏度  $S_t$  (sensitivity) 来衡量软黏土灵敏性大小, 并用该指标来评价软黏土结构性的强弱程度。 $S_t$  定义为原状(intact)和重塑(disturbed)状态下的无侧限抗压强度  $q_{ui}$  和  $q_{ud}$  的比值, 即

$$S_t = q_{ui}/q_{ud} \quad (1)$$

由于一些高灵敏性土及“流土”重塑后无法制成无侧限抗压试验所采用的标准圆柱形试样, 因此也可通过原位十字板剪切试验得到的原状和重塑状态下的不排水抗剪强度  $c_{ui}$  和  $c_{ud}$  来测定土体的灵敏度, 即

$$S_t = c_{ui}/c_{ud} \quad (2)$$

理论上讲, 由十字板试验测得的不排水抗剪强度  $c_u$  为无侧限抗压强度  $q_u$  的 1/2, 如不考虑其他因素, 2 种试验得到的灵敏度应该是相同的。

不同黏土的灵敏度的数值变化范围很大, 可以从重超固结土(heavy over-consolidated soil)的 1 左右变化到超灵敏性土或“流土”(quick clay)的 100 以上。我国工程界<sup>[2]</sup>采用 Skempton 和 Northey<sup>[3]</sup>的分类标准, 按照  $S_t$  的大小将软黏土分为中等灵敏性 ( $2 < S_t \leq 4$ )、高灵敏性 ( $4 < S_t \leq 8$ )、极灵敏性 ( $4 < S_t \leq 16$ ) 和流性 ( $S_t > 16$ ) 4 类。我国沿海地区广泛分

布有海相沉积的软黏土,分为淤泥(孔隙比  $e_0 > 1.5$ )和淤泥质土( $1.5 > e_0 > 1.0$ )2 类. 国内学者对我国沿海地区软黏土灵敏性的研究表明(如钱征<sup>[4]</sup>对天津软土、樊向阳等<sup>[5]</sup>对上海软土、缪林昌和经绯<sup>[6]</sup>对江苏软土、李鹏娥<sup>[7]</sup>对闽南软黏土):我国沿海地区的软黏土灵敏度大多在 3 至 6 之间,绝大多数属于中等或高灵敏性土. 然而,工程经验表明,无侧限抗压强度试验和原位十字板试验得到的灵敏度并不完全相同,如樊向阳等<sup>[5]</sup>发现 2 种试验方法给出的上海软黏土的灵敏度差别较大. 这样,对于同一土层,不同的试验方法就可能给出不同的分类. 而造成这种差别的具体原因目前仍然不太清楚.

Mitchell<sup>[8]</sup>在前人研究工作的基础上总结了黏性土灵敏性的 8 个成因:①亚稳结构;②粉粒骨架-黏粒胶结结构;③胶结;④离子交换;⑤盐滤;⑥风化;⑦触变(thixotropy);⑧分散剂的添加. 国内不少学者从矿物组成和微观结构特征方面对我国软黏土的结构进行了分析,如雷华阳和肖树芳<sup>[9]</sup>对天津软黏土、龚士良<sup>[10]</sup>对上海软黏土、拓勇飞<sup>[11]</sup>对湛江软黏土、彭立才等<sup>[12]</sup>对珠海地区软黏土,这些研究认为我国软黏土具有的亚稳结构的团粒或絮凝结构是造成其具有中等-高灵敏性的主要原因. 除此之外,对 Mitchell 提到的其他因素对我国沿海软黏土灵敏性的作用目前仍然缺乏深入的研究和认识.

国外研究成果表明,触变性是造成饱和软黏土具有灵敏性的重要因素之一<sup>[3,8]</sup>. 饱和黏性土的触变性指的是软黏土的天然结构受到扰动后强度降低、而后在含水量不变的情况下恢复一定时间后土粒、离子和水分子体系逐渐趋于新的平衡、其强度也随之逐渐增长的现象. Skempton 和 Northey<sup>[3]</sup>通过对 6 种具有不同灵敏度的黏性土的触变性研究结果表明:虽然高灵敏性软黏土扰动后强度随时间的恢复较少(小于 20%),但中等灵敏性软黏土扰动后的强度恢复较快,有些试验结果表明在 1 年内甚至可恢复至天然强度,因此触变性是这一类软黏土具有灵敏性的主要因素. 而我国沿海地区的软黏土多属中等和高灵敏性土,触变性对这一类土的灵敏性和结构性贡献的研究值得重视.

本文研究不同测试方法(无侧限抗压强度试验、室内微型十字板剪切试验、原位十字板剪切试验)对上海地区第 4 层淤泥质黏土灵敏度测试结果的影响,并探索原因所在;通过试验评价触变性对该土层灵敏性的作用,并在此基础上讨论该土层结构性的地质成因.

## 1 土样特性及试验方案

### 1.1 土样特性

试验采用的土样为在上海徐汇区思南路某基坑工程采取的块状土样,系上海典型的第 4 层淤泥质黏土,局部有粉质黏土与贝壳夹层,取土深度为 9~10 m. 土样基本物理特性见表 1. 其中塑限、液限含水率采用落锥法测得,对应的落锥深度分别为 2 mm 和 17 mm. 该土层液限小于 50%,属于低塑性黏质土.

表 1 上海第 4 层淤泥质黏土基本物理特性

Tab.1 Basic properties of the layer No.4 soft clay in Shanghai

土层序号	土层名称	含水率/%	孔隙比	塑限/%	液限/%	塑性指数
④	淤泥质黏土	42.70~ 52.17	1.20~ 1.37	25.61~ 26.00	46.15~ 49.08	20.15~ 23.27

### 1.2 灵敏性试验

采用无侧限抗压强度试验、室内微型十字板试验和现场十字板试验分别测得该土层的灵敏性,试验方案和试验过程如下.

(1) 无侧限抗压强度试验. 进行 5 组无侧限抗压强度试验. 从块状土样中切取圆柱形试样,先测得  $q_{ui}$ ,然后采用手工揉搓的方式重塑土样,尽量保持土样含水率不发生变化,再测得  $q_{ud}$ ,计算  $S_r$ . 由于重塑土峰值强度不明显,取竖向应变为 20%对应的强度作为重塑土的强度.

(2) 室内微型十字板试验. 直接在直径为 250 mm、高度为 200 mm 的块状土样中进行该试验,每个块状土样 4 个测点(见图 1). 用图 1 所示的微型十字板头分别测得  $c_{ui}$ 以及十字板旋转 6 圈后的  $c_{ud}$ ,计算  $S_r$ . 微型十字板的直径  $D$  为 20 mm,高度  $H$  为 40 mm,叶片厚度为 1 mm,轴杆直径  $d$  为 4 mm(见图 1). 轴杆长度  $L$  为 80 mm,这样可以保证十字板剪切

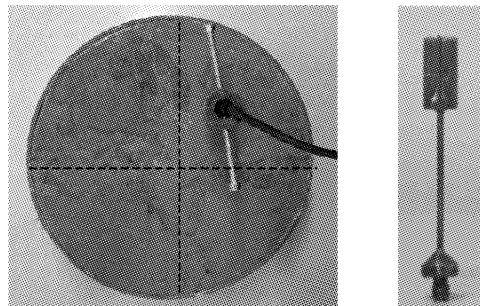


图 1 室内微型十字板试验

Fig.1 Laboratory mini-van-shear test

面积比小于 15%。试验过程中通过手工扭转十字板上的把手施加扭矩,由连接于十字板头的应变传感器向采集仪传递数据。

(3) 现场十字板剪切试验。在现场采用高度为 100 mm、宽度为 50 mm 的常规十字板头分别测得  $c_{ui}$  和十字板旋转 6 圈后的  $c_{ud}$ , 计算  $S_t$ 。

### 1.3 触变恢复试验

加工一长、宽和高分别为 622 mm、470 mm 和 258 mm 的模型箱用于静置重塑土样(见图 2)。模型箱用 2 mm 厚的隔板隔成  $4 \times 3 = 12$  个正方形格室, 每个格室边长为 150 mm, 大于微型十字板 4 倍直径, 避免边界条件对微型十字板试验结果的影响。在保持天然含水率条件下将原状土样手工重塑并搅拌均匀后填入模型箱的格室中, 填土高度约 170 mm。整平土面后立即在其中 2 个隔室中进行微型十字板剪切试验和微型贯入试验, 测得重塑后的强度, 也就是静置时间  $t=0$  时的强度。然后在剩余格室内土样表面涂抹一层凡士林, 铺设保鲜膜密封, 并将模型箱放置于湿度大于 95% 的养护室内静置养护, 以保证触变恢复过程中土样的含水率不发生明显的变化。静置过程中在不同的时间进行十字板剪切试验和微型贯入试验, 每次分别做 2 个格室, 取其平均值作为结果。每次试验结束后在对应格室的浅部和中部取土样测试含水率以了解土样含水率的变化情况。

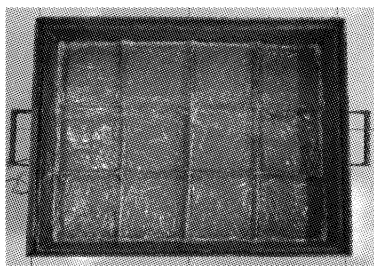


图 2 装有重塑土的模型箱

Fig.2 Box filled with remolded soil

微型贯入仪试验是将一定形状的测头压入被测试土样表面至规定深度, 通过测量测头单位面积的贯入阻力  $P$  来测试土的力学特性。本次试验采用的微型贯入仪探头见图 3 所示, 为圆柱形, 截面积  $1.5 \text{ cm}^2$ , 贯入深度为 6 mm。

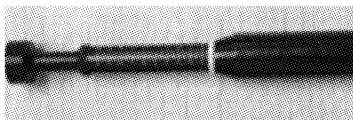


图 3 微型贯入测头

Fig.3 Mini-penetrator

## 2 灵敏度试验结果及分析

表 2 给出了 5 组无侧限抗压强度试验得到的结果。 $q_{ui}$  的平均值为 57.0 kPa (对应的  $c_{ui} = q_{ui}/2 = 28.5$  kPa), 手工重塑后  $q_{ud}$  的平均值为 10.8 kPa (对应的  $c_{ud} = 5.4$  kPa), 由无侧限抗压强度试验得灵敏度平均值为 5.6。

表 2 无侧限抗压强度试验结果

Tab.2 Results of unconfined compression tests

试样编号	$q_{ui}/\text{kPa}$	$q_{ud}/\text{kPa}$	$\frac{q_{ui}}{2}/\text{kPa}$	$\frac{q_{ud}}{2}/\text{kPa}$	$S_t$
S1	56.4	12.4	28.2	6.2	4.6
S2	55.9	9.9	28.0	5.0	5.6
S3	55.9	12.6	28.0	6.3	4.4
S4	58.7	9.5	29.4	4.8	6.2
S5	58.2	9.7	29.1	4.9	6.0
平均值	57.0	10.8	28.5	5.4	5.6

表 3 给出了 4 个测点的微型十字板试验的结果。 $c_{ui}$  平均值为 29.5 kPa。重塑强度  $c_{ud}$  包括 2 种, 一种是十字板在块状土样中旋转 6 圈后测得的重塑强度(即十字板重塑强度), 另外一种为手工重塑、填入模型箱后立即测得的重塑强度(即手工重塑强度)。可以看出, 2 种重塑方法得到的重塑强度  $c_{ud}$  差别较大, 平均值分别为 8.6 kPa 和 4.9 kPa, 对应的灵敏度也差别较大, 分别为 3.4 和 6.0。

表 3 室内微型十字板剪切试验结果

Tab.3 Results of laboratory mini-vane-shear test

测点	$c_{ui}/\text{kPa}$	$c_{ud}/\text{kPa}$		$S_t$	
		十字板重塑	手工重塑	十字板重塑	手工重塑
1	32.0	8.2	4.9	3.8	6.3
2	30.1	8.8	4.9	3.4	6.1
3	29.0	8.7	4.9	3.3	5.9
4	27.9	8.7	4.9	3.2	5.7
平均值	29.5	8.6	4.9	3.4	6.0

图 4 和 5 分别给出了原位十字板试验得到的强度和灵敏度。第 4 层淤泥质黏土的平均灵敏度为 3.0。在块状土样的取土深度处(即深度 9~10 m), 原位十字板试验测得的  $c_{ui}$  和  $c_{ud}$  分别约为 25.0 kPa 和 9.0 kPa。

表 4 汇总了以上 3 种试验的结果。可以看出, 不同试验方法测得的灵敏度差别较大: 采用十字板重塑方法的室内微型十字板试验和原位十字板试验得到的灵敏度较小(分别为 3.4 和 3.0), 而采用手工重塑方法的室内微型十字板试验和无侧限抗压强度试验得到的灵敏度较大(分别为 6.0 和 5.6)。无侧限抗压强度试验结果约为现场十字板试验的 1.8 倍。按

照我国采用的分类标准,该土层可分别划分为中等灵敏性土( $2 < S_t \leq 4$ )和高灵敏性土( $4 < S_t \leq 8$ ),不同试验方法给出了不同的结果.樊向阳等<sup>[5]</sup>统计了上海淤泥质黏土 44 个无侧限抗压强度试验结果以及 5 个钻孔的原位十字板试验结果,得到的灵敏度平均值分别为 5.18 和 2.54,前者为后者的 2 倍,这个比值与本次试验的结果非常接近.

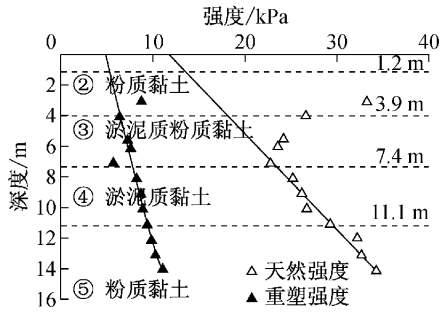


图 4 原位十字板试验测得的强度

Fig.4 Strengths obtained by field vane-shear tests

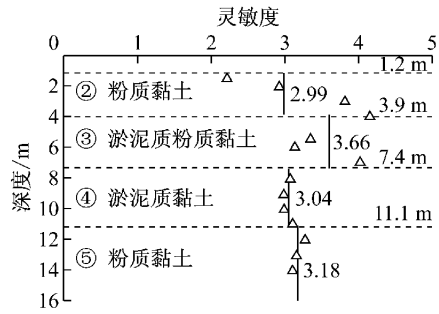


图 5 原位十字板试验测得的灵敏度

Fig.5 Sensitivities obtained from field vane-shear test

进一步对比表 4 给出的不同试验得到的  $c_{ui}$  和  $c_{ud}$  可以看出,不同试验方法得到的  $c_{ui}$  差别不大(在 25.0~29.5 kPa 之间),但  $c_{ud}$  却有较大的差别.采用手工重塑方法得到的强度约为 5 kPa,而采用十字板重塑方法得到的强度高达 9 kPa.可见十字板重塑并不能完全破坏剪切面周围的土体,导致测得的重塑强度约为手工重塑土样的强度的 1.8 倍,这应该是造成无侧限抗压强度试验得到的灵敏度约为原位十字板试验的 1.8 倍的主要原因.

表 4 灵敏性试验结果汇总

Tab.4 Summarized results of sensitivity test

试验方法	$c_{ui}/kPa$	重塑方法	$c_{ud}/kPa$	$S_t$
无侧限抗压强度试验	28.5	手工重塑	5.4	5.6
室内微型十字板试验	29.5	手工重塑	4.9	6.0
室内微型十字板试验	29.5	十字板重塑	8.6	3.4
现场十字板试验	25.0	十字板重塑	9.0	3.0

### 3 触变恢复试验结果

#### 3.1 含水率

图 6 给出了静置过程中土样的表层及中部的含水率随时间的变化情况.可以看出,在试验采用的密封方法下,土表层和中部含水率差值在 0.5% 以内.土样表层的含水率略低一些,中部的含水率基本保持恒定,其平均值为 45%.因此,本文所采取的土样密封措施是有效的,可以避免静置过程中土样含水率降低对强度的影响,能够真正反映软黏土触变恢复过程中微结构调整对强度的影响.

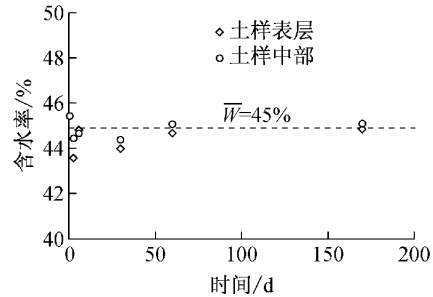


图 6 触变恢复过程中土样含水率变化

Fig.6 Change of water content during resting

#### 3.2 强度

图 7 给出了静置过程中由微型十字板试验和圆锥触探试验得到的重塑土的十字板强度和贯入阻力随时间的增长情况.可以看出,在含水率不变的静置过程中土的强度增长非常明显,尤其是在初期增长速率较大,而后放缓.图 8 给出了强度增长速率( $\Delta c_{ui}/\Delta t$ )随时间的变化曲线.可以看出,1 周内强度增长是最明显的,在这个时间段内的颗粒调整可能比较剧烈.1 周后强度增速率放缓,其他方面的因素(如离子交换和吸附水厚度的变化)可能是造成这个阶段强度微弱增长的主要原因.

试验结果表明,在约 6 个月(180 d)时间内,十字板强度由 5 kPa 增长到约 9 kPa,强度达到了重塑时强度的 1.8 倍左右.但是与手工重塑造成的强度损失量(即原状强度 29.5 kPa 减去重塑强度 4.90 kPa,约 25 kPa)相比,6 个月内只恢复了强度损失量的 17%.由于上海软黏土具有非稳定性絮凝状结构,因此最终应该也不能恢复至 100%.

Skempton 和 Northey<sup>[3]</sup>的研究结果表明黏性土触变恢复速度大小受矿物成分的影响,由大至小依次为蒙脱石、伊利石、高岭石.何美临<sup>[13]</sup>对上海软黏土的矿物成分的研究表明,伊利石相对质量为

66.4%~79.0%，绿泥石和高岭石相对质量为 15.0%~29.7%，蒙脱石仅为 0%~12.0%。因此，本文得到的上海第 4 层淤泥质黏土的触变恢复规律可能主要是受伊利石矿物的影响。

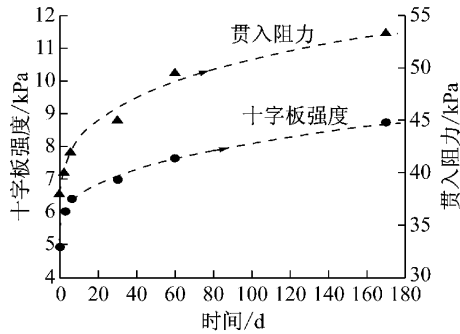


图 7 静置过程中土强度的增长

Fig. 7 Strength increase during resting

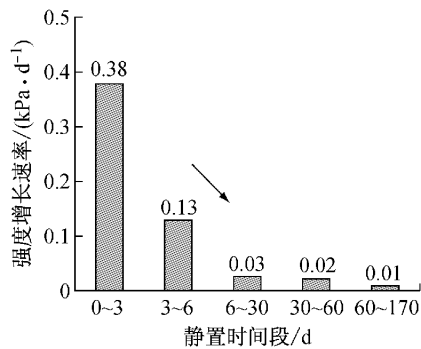


图 8 强度增长速率随静置时间的变化

Fig. 8 Change of strength increase rate with resting time

### 3.3 灵敏度

土样在手工重塑后( $t=0$ )的灵敏度为 1.0。随着静置时间的增长和结构的恢复,不排水抗剪强度会增加,灵敏度也会增大。采用  $S_t(t) = c_u(t)/c_u(0)$  来分析触变过程中灵敏度的变化,其中  $c_u(t)$  为静置  $t$  时刻的强度, $c_u(0)$  为手工重塑后( $t=0$ )立即测得的强度,得到的灵敏度随时间  $t$  的变化曲线如图 9 所示。在约 6 个月,灵敏度  $S_t$  由 1.0 增加为 1.8,达到了由无侧限抗压强度试验测得的灵敏度 5.6 的 1/3。因此可以看出,触变性对上海黏性土灵敏性的作用不可忽视,而这仅仅是 6 个月的试验结果,随着时间的增长,这个比例还会继续增大。

## 4 结论与讨论

(1) 由无侧限抗压强度试验得到上海第 4 层淤泥质黏土灵敏度约为现场十字板试验的 1.8 倍,这个结果与根据樊向阳等<sup>[5]</sup>给出的 2.0 非常接近。这

么大的差别会对该土层的结构性等级划分造成重要影响。根据无侧限抗压强度试验结果,该土层应该属于高灵敏性土,采用原位十字板试验的结果判定为中等灵敏性土应该是不合适的。

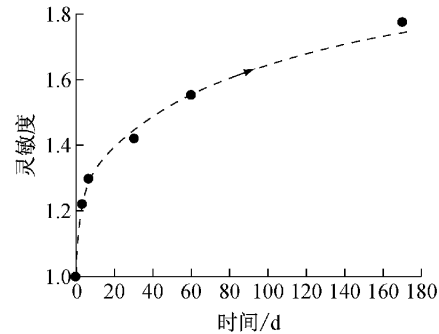


图 9 灵敏度随静置时间的变化

Fig. 9 Change of sensitivity with resting time

(2) 室内微型十字板试验结果表明,重塑方式是导致这 2 种试验所得灵敏度差别较大的原因。无侧限抗压强度试验采用手工重塑,得到比十字板重塑较小的重塑强度,因此得到较大的灵敏度。

(3) 触变恢复试验结果表明,在 6 个月时间内,灵敏度  $S_t$  增长到了由无侧限抗压强度试验测得的灵敏度值的 1/3。因此,除了非稳定结构外,触变性也是上海第 4 层淤泥质黏土具有高灵敏性的一个主要原因。

上海软黏土属海相沉积地层。龚士良<sup>[10]</sup>、龚士良和茅鸿妹<sup>[14]</sup>通过分析上海软黏土水化学特性认为上海软黏土在海相沉积环境中因电解质(NaCl)过高而絮凝沉淀,形成絮凝结构,后期地下淡水的作用使电解质浓度降低。这种含盐量减小的淋滤作用(leaching)可能也是造成上海淤泥质黏土具有灵敏性的一个因素。我国沿海各地区海相沉积软黏土的地质成因和力学特性具有一定的相似性,希望本文的研究成果能够对我国沿海地区海相沉积软黏土的结构性判别以及结构性成因的研究有所帮助。

### 参考文献:

- [1] Terzaghi K. Ends and means in soil mechanics[J]. Engineering Journal, 1944, 27(12): 608.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ83—2011: 软土地区岩土工程勘察规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JGJ83—2011: Specification for geotechnical investigation in soft clay area [S]. Beijing: Chinese Building Industry Press, 2011.
- [3] Skempton A W, Northey R D. The sensitivity of clays[J].

- Geotechnique, 1952, 3(1):30.
- [4] 钱征. 天津新港软土的一些工程特性[M]. 天津:天津科学技术出版社, 1987.  
QIAN Zheng. Engineering properties of soft soils in Tianjin new port[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1987.
- [5] 樊向阳,顾国荣,黄宏伟. 上海地区土体灵敏度的研究[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(3):130.  
FAN Xiangyang, GU Guorong, HUANG Hongwei. Study on soil sensitivity in Shanghai region[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2004, 18(3):130.
- [6] 缪林昌,经绯. 江苏海相灵敏性软土特征研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(8):1283.  
MIAO Linchang, JING Fei. Features research of Jiangsu marine sensitive soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8):1283.
- [7] 李鹏娥. 闽南地区软黏土灵敏度试验及分析[J]. 华侨大学学报:自然科学版, 2006, 27(1):61.  
LI Peng'e. Test and analysis of the soft clay sensitivity in south Fujian Province [J]. Journal of Huaqiao University: Natural Science, 2006, 27(1):61.
- [8] Mitchell J K. Causes of clay sensitivity[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division; Proceedings of the American Society of Civil Engineerings, 1969, 95(3): 845.
- [9] 雷华阳,肖树芳. 天津海积软土微观结构与工程性质初探[J]. 地质与勘探, 2002, 38(6):81.  
LEI Huayang, XIAO Shufang. Primary exploration on engineering properties of marine soft soil microstructure in Tianjin region[J]. Geology and Prospecting, 2002, 38(6): 81.
- [10] 龚士良. 上海软黏土微观特性及在土体变形与地面沉降中的作用研究[J]. 工程地质学报, 2002, 10(4):378.  
GONG Shiliang. The microscopic characteristics of Shanghai soft clay and its effect on soil mass deformation and land subsidence[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(4): 378.
- [11] 拓勇飞. 湛江软土结构性的力学效应与微观机制研究[D]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所, 2004.  
TUO Yongfei. Research on mechanics effect & micro-mechanics of structural soft clay in Zhanjiang area [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [12] 彭立才,蒋明镜,朱合华,等. 珠海地区软土微观结构类型及定量分析研究[J]. 水利学报, 2007, 10(增刊):687.  
PENG Licai, JIANG Mingjing, ZHU Hehua, et al. Microstructure classification and quantitative study on soft clay in Zhuhai [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 10 (Supplement): 687.
- [13] 何美临. 上海市区浅层土黏土矿物、微结构与地面沉降[J]. 上海地质, 1989, 32(4):31.  
HE Meilin. The clay cinerals and cextures of shallow soil related with landsurface settlement in Shanghai city [J]. Shanghai Geology, 1989, 32(4):31.
- [14] 龚士良,茅鸿妹. 上海软黏土微观特征及在土体变形中的应用[J]. 上海地质, 1994, 52(4):29.  
GONG Shiliang, MAO Hongmei. Microcosmic characteristics in Shanghai soft clay and its effect in soil body deformation[J]. Shanghai Geology, 1994, 52(4):29.

~~~~~

(上接第 132 页)

- [2] 丁承先,段元峰,吴东岳. 向量式结构力学[M]. 上海:科学出版社, 2012.  
DING Chengxian, DUAN Yuanfeng, WU Dongyue. Vector mechanics of structrues [M]. Shanghai: Science Press, 2012.
- [3] Ting E C, Shih C, Wang Y K. Fundamentals of a vector form intrinsic finite element: Part I. Basic procedure and a plane frame element[J]. Journal of Mechanics, 2004, 20(2): 113.
- [4] Ting E C, Shih C, Wang Y K. Fundamentals of a vector form intrinsic finite element: Part II. Plane solid elements [J]. Journal of Mechanics, 2004, 20(2): 123.
- [5] Shih C, Wang Y K, Ting E C. Fundamentals of a vector form intrinsic finite element: Part III. Convected material frame and examples[J]. Journal of Mechanics, 2004, 20(2): 133.
- [6] 吴乐南. 数据压缩[M]. 2版. 北京:电子工业出版社, 2006.  
WU Yuenan. Data compression [M]. 2<sup>nd</sup> ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [7] 吴家安. 数据压缩技术及应用[M]. 上海:科学出版社, 2009.  
WU Jiaan. Data compression techniques and applications [M]. Shanghai: Science Press, 2009.
- [8] Witten I H, Neal R M, Cleary J G. Arithmetic coding for data compression [J]. Communications of the ACM, 1987, 30(6) : 95.
- [9] Chen D, Chiang Y J, Memon N, et al. Optimal alphabet partitioning for semi-adaptive coding of sources of unknowns parse distributions [C]//Proceedings of Data Compression Snowbird. Los Alamitos: [s. n.], 2003:372-381.
- [10] Kobbelt L, Botsch M. A survey of point-based techniques in computer graphics[J]. Computers & Graphics, 2004, 28(6): 801.
- [11] Grossman J P, Dally W J. Point sample rendering [C]// Proceedings of the 9th Eurographics Workshop on Rendering. Vienna: Springer-Verlag/Wien, 1998: 181-192.
- [12] Waschbüsch M, Gross M, Eberhard F, et al. Progressive compression of point-sampled models [C]//Proceedings of Eurographics Symposium on Point-Based Graphics. Zurich: Eurographics Association, 2004: 95-102.
- [13] Chen D, Chiang Y J, Memon N. Lossless compression of point-based 3D models [C]//Proceedings of Pacific Graphics. Macao: Polytechnic University, 2005: 124-126.
- [14] 古天龙. 软件开发的形式化方法[M]. 北京:高等教育出版社, 2005.  
GU Tianlong. Formal methods of software development[M]. Beijing: China Higher Education Press, 2005.