

# 江苏省太仓市的软土分布及力学特征

晁浩<sup>1</sup>, 骆佳樑<sup>2</sup>, 钱谨伟<sup>2</sup>, 张和森<sup>2</sup>, 吴宏伟<sup>2</sup>, 高彦斌<sup>1</sup>

<sup>1</sup>同济大学, 上海

<sup>2</sup>太仓市仓能电力集团有限公司, 江苏 太仓

收稿日期: 2021年12月24日; 录用日期: 2022年1月8日; 发布日期: 2022年1月24日

## 摘要

江苏省太仓市地处江苏省东南部与上海交界处, 在地质上处于长江三角洲南翼的边缘地带, 区内软土分布, 但详细的研究资料较少。本文搜集了太仓地区的地勘资料, 统计了软土地层的分布规律(包括地层层序、埋深、厚度等), 软粘土的物理力学性质(包括孔隙比、含水率、塑性指数、静力触探锥尖阻力、超固结比OCR等)。发现了太仓地区土层地质成因和分布较为复杂, 大致可以分为两大类; 软土土层多数为低塑性的粉质粘土, 塑性较低; 该地区在进行勘察时土层编号没有相应规范或标准层序, 较为混乱, 关于该地区软土地质历史以及土层编号的统一还需要进一步研究。

## 关键词

太仓, 长江三角洲, 软土, 物理力学特性

# Distribution and Mechanical Characteristics of Soft Soil in Taicang City, Jiangsu Province

Hao Chao<sup>1</sup>, Jialiang Luo<sup>2</sup>, Jinwei Qian<sup>2</sup>, Hesen Zhang<sup>2</sup>, Hongwei Wu<sup>2</sup>, Yanbin Gao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tongji University, Shanghai

<sup>2</sup>Taicang Cangneng Power Group Co., Ltd., Taicang Jiangsu

Received: Dec. 24<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jan. 8<sup>th</sup>, 2022; published: Jan. 24<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Soft soil is widely distributed in Taicang City of Jiangsu Province, located at the junction of south-east Jiangsu Province and Shanghai and geologically located at the edge of the south wing of the Yangtze River Delta. However, there is few detailed research on the characteristics on the soft clay in this region. This paper collects the geological exploration data in Taicang, studies on the distri-

bution of soft soils (including stratum sequence, buried depth and thickness), and the physical and mechanical properties of soft clays (including void ratio, water content, plasticity index, cone tip resistance of CPT, overconsolidation ratio OCR, etc.). The geological formation and distribution of the soft clays are very complex and the distributions of the soft clays can be approximately divided into two modes. Most of the soft soils in Taicang belong to silty clay with low plasticity. Further research is needed on the research of the geological history and unification of layer number of the soft clays in this area.

## Keywords

Taicang, Yangtze River Delta, Soft Soil, Physical and Mechanical Properties

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

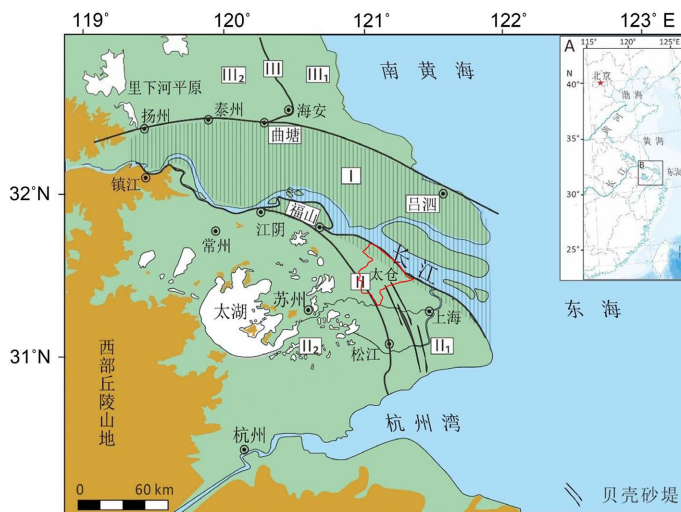
## 1. 引言

软土[1]泛指在静水或缓慢的流水环境中沉积、并经生物化学作用形成的土。软土属于粘性土的特殊类型,包括淤泥、淤泥质土、泥炭质土、泥炭等。淤泥质土是指天然含水量 $\omega$ 大于液限 $\omega_L$ 且天然孔隙比 $e$ 小于1.5但大于或等于1.0的土,在我国东南沿海地区软土广泛分布并对该地区的工程建设产生重要影响。太仓市位于江苏省东南部长江口南岸。东濒长江,与崇明隔江相望,南临宝山、嘉定,西连昆山,北接常熟市。全境总面积815.14平方公里,其中陆地面积644.97平方公里。太仓市背靠苏州市和上海两大城市,作为交通枢纽,太仓市的工程建设近几年来正在飞速发展。依据江苏省相关规程[2],根据地表形态和地质成因,江苏省共划分了七个地貌区,其中太仓处于长江三角洲平原区。长江三角洲平原区在长江及海侵的共同影响下与江苏省其他地区的地貌差别较大,属于典型的软土分布区。太仓区域软土广泛发育,软土具有含水量高、压缩性高、强度差、渗透性低的特点,是该地区工程建设中重点考虑的一类不良地层。

更新世以来,整个长江三角洲地区地层接受了多次冰期-间冰期的气候变化影响,并伴随多次的海侵事件。根据三角洲地层古河谷层序的套叠结构表明,晚第四纪以来,长江三角洲地区存在三个“海侵-高海面-海退-低海面”周期,相应地长江古河谷经历了三次“下切-充填-海泛-三角洲进积-再下切”周期性发育过程[3]。对长江三角洲进行的划分[4],如图1所示,太仓区用红框表示,太仓市位于长江三角洲主体区与南翼前缘区的交界处。由于江苏省的地区复杂性加上长江三角洲的地区复杂性,太仓区域的软土分布特征以及物理力学特点具有一定的特殊性[5]。然而目前对太仓市的软土分布情况的研究并不充分,在太仓进行岩土工程勘察时使用江苏省规范难以满足太仓市工程勘察的需要。因此本文展开了对江苏省太仓市的软土分布特征的研究,为该地区的软土工程勘察以及工程建设提供依据。

## 2. 调查点位概况

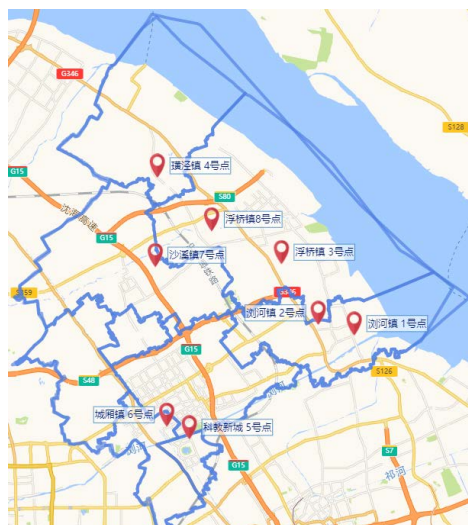
太仓全市共辖7个镇、1个街道办事处以及3个开发区,具体分别为城厢镇、沙溪镇、浏河镇、浮桥镇、璜泾镇、双凤镇、陆渡镇、娄东街道办事处,太仓港经济开发区——新区、太仓港经济开发区——港区以及科教新城。本文搜集了太仓各市镇的8份详尽的岩土工程勘察报告,具体包含浏河镇2份、浮桥镇2份、璜泾镇1份、科教新城1份、城厢镇1份以及沙溪镇1份,按照顺序依次命名为1~8号点,具体位置图2。



I 长江三角洲主体; II 长江三角洲南翼平原; II<sub>1</sub> 南翼前缘区; II<sub>2</sub> 南翼后缘区; III 长江三角洲北翼平原; III<sub>1</sub> 北翼前缘区; III<sub>2</sub> 北翼后缘区

**Figure 1.** Location of Taicang City and geological zoning map of the Yangtze River Delta (modified after Li *et al.*, 1999)

**图 1.** 太仓市所处位置以及长江三角洲地质分区图(据李从先等, 1999 有修改)



**Figure 2.** Distribution map of survey points

**图 2.** 调查点位分布图

根据各点位所在区域, 把浏河镇 1 号点、浏河镇 2 号点、浮桥镇 3 号点、璜泾镇 4 号点、浮桥镇 8 号点放在一起讨论, 命名为近长江东侧区; 把科教新城 5 号点以及城厢镇 6 号点、沙溪镇 7 号点放在一起讨论, 命名为远长江中、西侧区。

### 3. 太仓软土的分布特征

#### 3.1. 调查点位土层分布

根据勘探报告, 绘制如下土层分布图 3 和图 4, 包括岩土名称、岩土柱状图以及静力触探曲线, 其中采用的各土层的编号为原报告的编号。根据土层分布图, 可以得到各个调查点的土层分区, 土层定名以及各土层的厚度, 同时也可进行土层分布的对比。

浏河镇 1 号点 浏河镇 2 号点 浮桥镇 3 号点 璜泾镇 4 号点 浮桥镇 8 号点

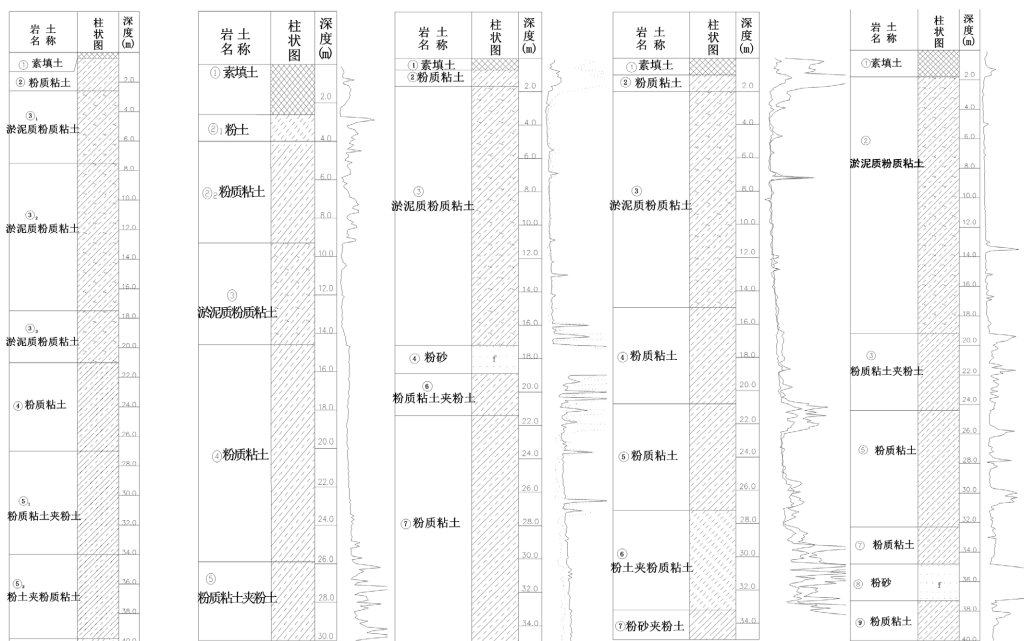


Figure 3. Soil layer distribution map—Eastern Region close to the Yangtze River  
图 3. 土层分布图——近长江东侧区

科教新城 5 号点 城厢镇 6 号点 沙溪镇 7 号点

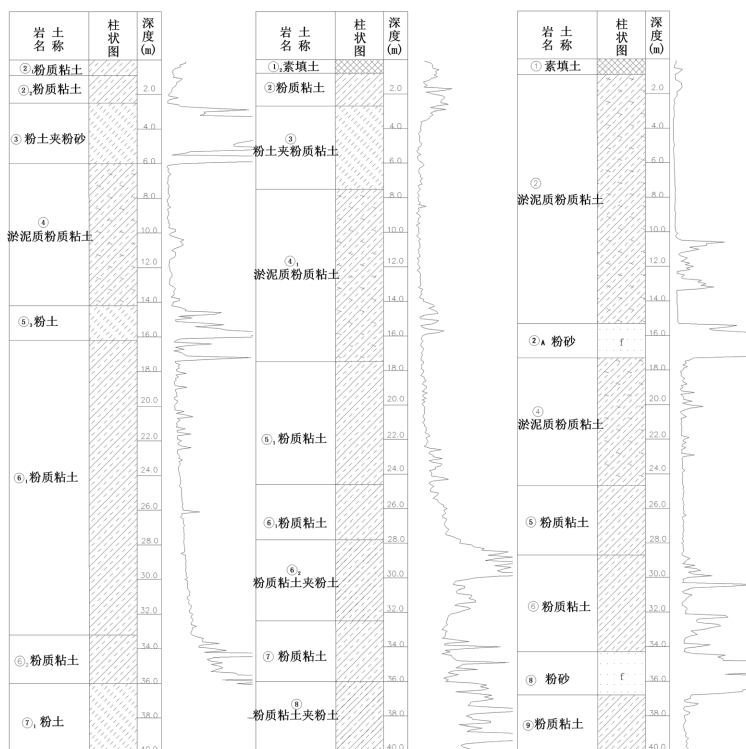


Figure 4. Soil layer distribution map—Central and Western Regions away from the Yangtze River  
图 4. 土层分布图——远长江中、西侧区

近长江东侧区 5 个调查点的上部土层有着相似的土层分布: 填土 - 粉质粘土(粉土) - 淤泥质粉质粘土 - 粉质粘土 - 粉质粘土夹粉土。其中对淤泥质粉质粘土编号, 除了浮桥镇 8 号点为第②层外, 其余均为第③层。最东侧浏河镇 1 号点的淤泥质粉质粘土层最厚, 达到了 20 多米。

远长江中、西侧区的土层层序同近长江东侧区有明显不同, 5、6 号点两处调查点的淤泥质粉质粘土均为第④层, 而近长江东侧调查点的淤泥质粉质粘土大多为第③层。从城厢 6 号点的静力触探曲线上看第⑥<sub>1</sub>层的比较软, 虽然定名为粉质粘土, 但从静力触探曲线看其力学特性仍然较差, 下文中将详细讨论。靠近中部区域的沙溪镇 7 号点, 有着两层淤泥质粉质软土分别为第②层和第④层。

太仓区域位于长江三角洲南翼平原的边缘, 第四纪海侵, 长江古河道的影晌, 使得太仓区域在地质上具有复杂性。长江三角洲南翼经典的暗绿色土层全新世更新世的界限土层[6], 在远长江西侧发现而中、东侧区域并未发现, 即太仓受长江古河道的影晌。

### 3.2. 软土标高及层厚

根据软土的定义, 调查点内近长江东侧的第③层淤泥质粉质粘土、中间区域第②层淤泥质粉质粘土第④层淤泥质粉质粘土以及远长江西侧的第④层淤泥质粉质粘土均符合相关标准, 为淤泥质粉质粘土。

城厢镇 6 号点的第⑥<sub>1</sub>层粉质粘土, 平均含水量 36.1% < 平均液限 37.8%, 平均孔隙比 0.987 < 1.0, 定名为粉质粘土, 但部分位置存在天然含水量大于液限, 天然孔隙度大于 1 的情况, 因此, 城厢镇 6 号点的第⑥<sub>1</sub>层粉质粘土应是软土经过固结而成的粉质粘土。同时科教新城 5 号点的第⑦层有类似的情况。在工程上由于这两层的力学特性较为软弱, 仍需当做软土处理, 本文将这两层土层作为软土处理。

下表 1 汇总了各调查点软土的层顶标高、层底标高、层厚。太仓市的软土厚度为 10~20 m, 近长江东侧的软土层顶标高在-2.0~1.2 m, 总厚度 13~19.5 m; 远长江西侧的第一层软土层顶标高在-4.81~-2.51 m, 厚度 1~11.2 m, 第二层软土厚度以及标高不均匀。中侧区域的软土层顶标高在 0.46~1.94 m, 层厚 14.4~17.4 m。从远江到近江, 第二层软土层逐渐消失, 第一软土层越来越浅, 越来越厚。另外可以看出, 这些勘察报告中对软土层的编号是比较混乱的, 分别有②、③、④不同的编号。

Table 1. Elevation and layer thickness of soft soil

表 1. 软土的标高及层厚

位置	土层编号及名称	层顶标高	层底标高	层厚	备注
浏河镇 1 号点	第③层淤泥质粉质粘土	约-0.5 m	约-20.0 m	约 19.5 m	分布均匀
浏河镇 2 号点	第③层淤泥质粉质粘土	-5.48~0.01 m	-11.39~-10.78 m	5.30~11.40 m	分布均匀
浮桥镇 3 号点	第③层淤泥质粉质粘土	约 1.2 m	约-13.6 m	约 14.8 m	分布均匀
璜泾镇 4 号点	第③层淤泥质粉质粘土	约-2.0 m	约-15 m	约 13 m	分布均匀
科教新城 5 号点	第④ <sub>1</sub> 层淤泥质粉质粘土	约-5.50 m	约-16.7 m	约 11.2 m	分布均匀
科教新城 5 号点	第⑦层粉质粘土	-32.69~-29.47 m	-34.98~-33.36 m	1.80~4.70 m	分布不均匀
城厢镇 6 号点	第④层淤泥质粉质粘土	-4.81~-2.51 m	-14.77~-4.38 m	1.00~11.70 m	分布不均匀
城厢镇 6 号点	第⑥ <sub>1</sub> 层粉质粘土	-15.21~-13.48 m	-39.47~-27.66 m	13.00~24.70 m	分布均匀
沙溪镇 7 号点	第②层淤泥质粉质粘土	约 1.94 m	约-12.46 m	约 14.4 m	分布均匀
沙溪镇 7 号点	第④层淤泥质粉质粘土	约-14.46 m	约-21.86 m	约 7.40 m	分布均匀
浮桥镇 8 号点	第②层淤泥质粉质粘土	约 0.46 m	约-16.94 m	约 17.4 m	分布均匀

软土的厚度同古地形、海侵、古河道都有关系，近海地势低软土厚，近古长江则容易被剥蚀变薄或缺失，太仓浅部软土层由于西侧暗绿色标志层原因，应为全新世海侵形成。该地区土层同时受海侵，古长江影响，加上古河道的影响，层序混乱，地质历史需要进一步的研究。

### 3.3. 太仓软土的物理力学特性

取具有代表性的浏河镇 1 号点，科教新城 5 号点以及城厢镇 6 号点进行物理力学特性的分析，具体包括：含水量等物理参数平均值，孔隙比、塑性指数和 OCR 随深度的分布。

#### 1) 物理力学参数平均值

表 2 汇总了软土物理力学参数的平均值，包括含水量、孔隙度、液限、塑限、塑性指数、液性指数、静力触探锥尖阻力。根据表中数据可得这 3 个调查点的平均含水量  $\omega$  在 40% 左右，塑性指数  $I_p$  为 13.5~15.5，静力触探锥尖阻力  $q_c$  为 0.40~0.71 MPa，含水率、塑性、力学性质均差异不大。浏河镇 1 号点处软土近江稍湿稍软。

**Table 2.** Average value of physical and mechanical properties of soft soil

**表 2.** 软土的物理力学特性平均值

点号	软土	含水量 $\omega$ /%	孔隙度 $e$	液限 $\omega_L$ /%	塑限 $\omega_p$ /%	塑性指 数 $I_p$ /%	液性指 数 $I_L$	静力触探锥尖 阻力 $q_c$ (MPa)
浏河镇 1 号点	第③层淤泥质粉质粘土	42.1	1.235	34.4	18.9	15.5	1.49	0.40
科教新城 5 号点	第④ <sub>1</sub> 层淤泥质粉质粘土	38.9	1.08	36.1	21.2	14.9	1.19	0.71
城厢镇 6 号点	第④层淤泥质粉质粘土	39.3	1.091	36.4	22.9	13.5	1.22	0.57

#### 2) 孔隙比 $e$ ~深度 $H$ 关系

孔隙比随深度变化曲线见图 5 所示。根据该图可以更好得理解各土层孔隙比变化的原因，也更好得理解土层的性质。浅部土层经过固结沉降以及表面风化作用的影响下形成硬壳层，孔隙比较小；淤泥质粉质粘土处明显孔隙比较大且大于 1，硬壳层下土层有着随深度孔隙比变小的规律，这符合土层固结的规律，但在科教新城 5 号点的第⑦层粉质粘土及城厢镇 6 号点的第⑥<sub>1</sub>层粉质粘土处出现孔隙比上升的异常情况，这也佐证了上文的猜想，科教新城 5 号点的第⑦层粉质粘土及城厢镇 6 号点的第⑥<sub>1</sub>层粉质粘土应是软土经过固结而成的粉质粘土。总体上讲，软土的孔隙比随深度渐变而非突变。

#### 3) 塑性指标~深度 $H$ 关系

图 6 给出了塑性指标随深度的变化曲线，包括塑性指数  $I_p$ ，液限  $w_L$  以及塑限  $w_p$  随深度  $H$  的变化曲线，来表征土层的塑性。曲线图中的右侧放置土层柱状图给出了土层的分布信息。浏河镇 1 号点上部塑性变化不大，随后塑性随深度减小；科教新城 5 号点以及城厢镇 6 号点，软土的塑性明显大于其他土层。总体上讲，太仓软土的土层塑性指数  $I_p$  都不大，均小于 15，属于典型的粉质黏土层。

显然，太仓软土与南边的上海的塑性有着明显的区别。上海地区分布两种主要的软土，淤泥质粉质粘土和淤泥质粘土，粘土的塑性要比粉质粘土的塑性大一些[7]。土的塑性主要与粘土矿物成分以及粘土颗粒含量有关。太仓与上海同属于长江三角洲南翼，粘土矿物成分应当差别不大，因此太仓软土塑性偏低很可能是粘粒含量偏小的原因。太仓地区相比上海地区更靠近长江古河道，其特殊的沉积环境造成了粘粒含量较小，而导致土的塑性较低。

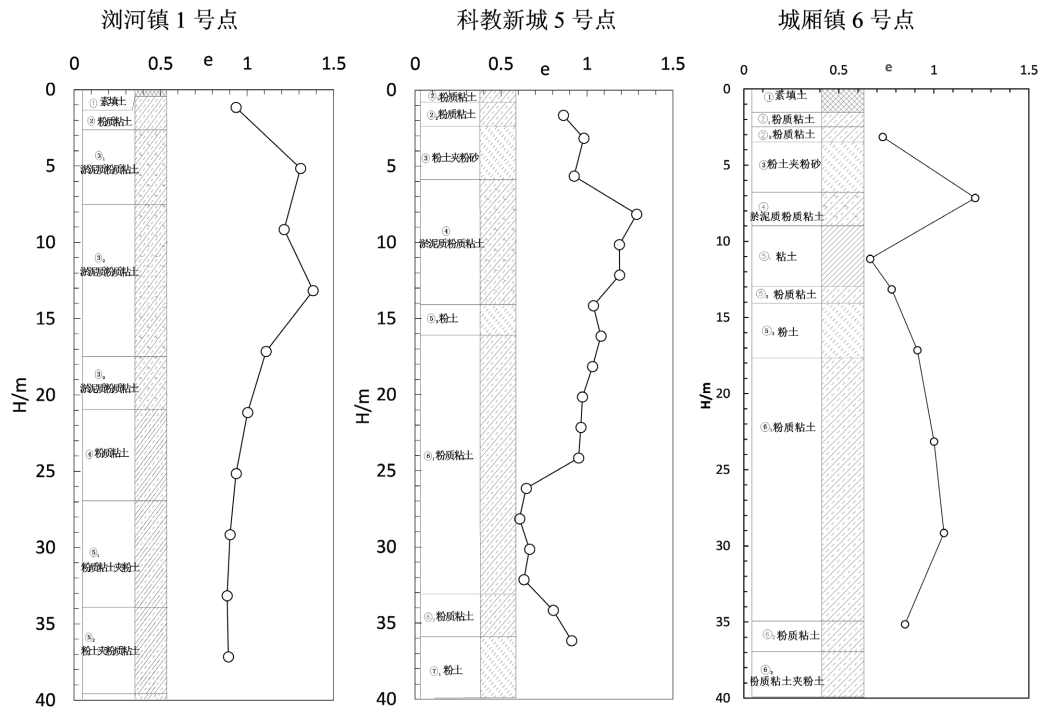


Figure 5.  $e-H$  relationship graph  
图 5. 孔隙比随深度变化曲线

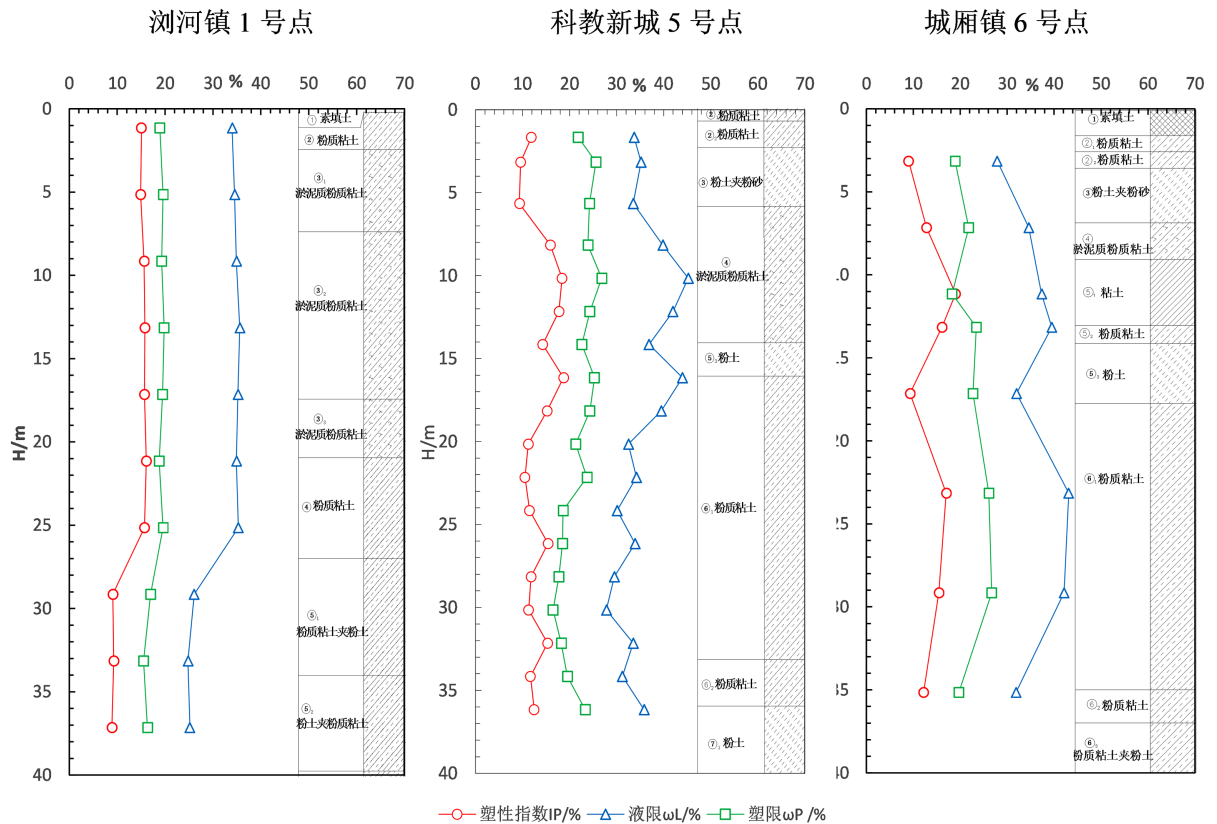


Figure 6.  $I_p, w_L, w_p-H$  relationship graph  
图 6. 塑性指标随深度变化曲线

4) OCR~深度  $H$  关系

超固结比 OCR 是评价软粘土变形和强度特性的重要参数。软粘土的不排水抗剪强度  $S_u$  与 OCR 之间的关系如下:

$$\frac{S_u}{\sigma'_{v0}} = \left( \frac{S_u}{\sigma'_{v0}} \right)_{NC} OCR^m \quad (1)$$

式(1)中:  $S_u$  为不排水抗剪强度(kPa);  $\sigma'_{v0}$  为有效上覆压力(kPa);  $\frac{S_u}{\sigma'_{v0}}$  为天然土的归一化强度;  $q_c$  为正常固结土(即  $OCR = 1$ )的归一化强度;  $m$  为经验参数, Mayne 和 Mitchell [8] 建议  $m$  可简化为 1.0, 采用 Skempton [9] 公式取得  $\left( \frac{S_u}{\sigma'_{v0}} \right)_{NC} = 0.184$ 。软粘土的不排水抗剪强度  $S_u$  由静力触探锥尖阻力  $q_c$  得到:

$$S_u = \frac{(q_c - \sigma_{v0})}{N_k} \quad (2)$$

式(2)中:  $\sigma_{v0}$  为土中原位竖向总应力;  $N_k$  为经典圆锥系数, 根据经验, 本文取 15。

根据式(1)、(2)计算软土 OCR, 并绘制了 OCR 随深度变化的曲线图 7, 图中标黄区域为软土所在位置。由图 7 可知, 浏河镇 1 号点上部软土 OCR 接近 1.5, 下部软土 OCR 接近 1.0; 科教新城 5 号点 OCR 接近 1.5; 城厢镇 6 号点浅部软土 OCR 接近 1.0, 深部软土 OCR 接近 1.5。高彦斌和陈忠清[10]根据十字板强度对沿海软土的 OCR 进行了评价, 本地区全新世沉积的软土层, 地质历史上并没有施加过一个更大的荷载, 因此 OCR 接近 1.0, 属于正常固结状态, 有些位置略大于 1.0, 很可能是次压缩的影响。浅部土层的 OCR 显著大于 1.0 的原因应当是风化胶结的影响[11]。这些特征及机理与上海软土具有一定的相似性。

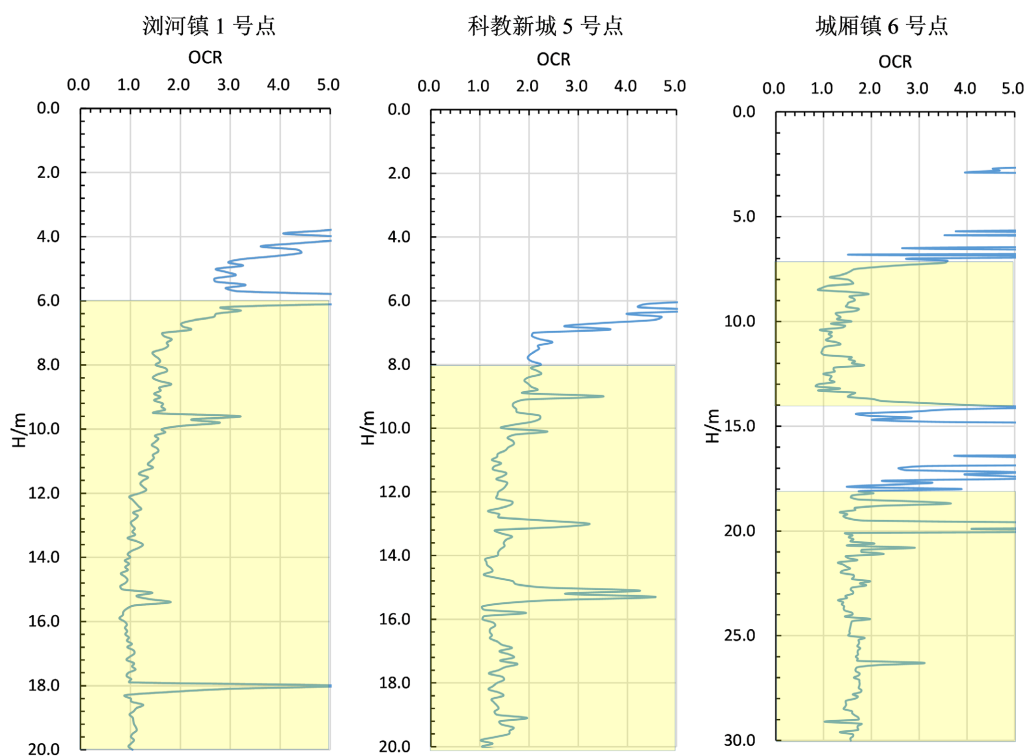


Figure 7. OCR- $H$  relationship graph

图 7. OCR 随深度变化曲线



## 4. 结论

太仓地区的软土分布不均匀,具有一定的复杂性。地质上介于长江三角洲主体的边缘,深切河谷成为影响太仓软土厚度分布的主要因素。本文对太仓区域软土分布进行了汇总展示,并对软土的物理力学的指标进行了分析。得到的主要结论如下:

1) 太仓地区受到海侵以及长江深切河谷的双重影响,区内软土分布复杂,近长江东侧区只有一层软土层,远长江西侧区具有双层软土,中间区域则是过渡区域。太仓从远江端到近江端第一层软土埋深越来越浅层厚越来越厚,最浅层顶标高可达 2 m,最厚可达 20 m。软土层的形成主要与第四纪全新世海侵有关,但受长江古河道地形以及古河道的影响,在厚度上比较复杂。

2) 太仓区内软土均属于典型的低塑性粘性土,大多为粉质黏土,塑性指数小于 15,太仓地区相比上海地区更靠近长江古河道,其特殊的沉积环境造成了粘粒含量较小,而导致土的塑性较低。孔隙比大多为 1.2,静力触探锥尖阻力  $q_c$  在 0.4~0.8 MPa;太仓区内土层除表层硬壳层外,孔隙比随着深度增大而减小,软土层孔隙比大于 1 且上下有渐变的孔隙比变化;太仓区域软土 OCR 值各场地有差异,反映了软土的地质历史上固结有差异,需要进一步研究。

3) 太仓区域内的土层编号混乱,淤泥质粉质粘土就有②、③、④、④<sub>1</sub> 等不同的编号,工程编号规范化问题迫在眉睫。

更近一步的研究是深入研究该地区的地质历史以及各土层的地质成因,揭示全新世大海侵以及长江古河道下切等地质事件对土层分布的影响。由于本文收集的资料有限,适用于工程应用的地质分区图的完成,以及土层工程编号的规范化还需要后期进行更为细致和全面的地质调查工作。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国建设部. GB 50021-2001. 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [2] 江苏省地质工程勘察院. DGJ32/TJ 208-2016. 江苏省岩土工程勘察规范[S]. 南京: 江苏省住房和城乡建设厅, 2016.
- [3] 张家强, 张桂甲, 李从先. 长江三角洲晚第四纪地层层序特征[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1998(4): 438-442.
- [4] 姜锋. 长江口下切古河谷全新世充填过程及其控制因素[D]: [博士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2020.
- [5] 张云, 薛禹群, 吴吉春, 等. 江苏太仓浅部淤泥质土层的工程地质特征[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(4): 43-47.
- [6] 林钟扬, 金翔龙, 管敏琳, 潘少军, 赵旭东. 长江三角洲平原南部上新世以来古环境演变及多重地层划分[J]. 地球与环境, 2019, 47(4): 464-476. <https://doi.org/10.14050/j.cnki.1672-9250.2019.47.053>
- [7] 孟德强. 中国软土分区讨论及其参数统计特征研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
- [8] Mayne, P.W. and Mitchell, J.K. (1988) Profiling of Overconsolidation Ratio in Clays by Field Vane. *Canadian Geotechnical Journal*, **25**, 150-157. <https://doi.org/10.1139/t88-015>
- [9] Skempton, A.W. (1948) Vane Tests in the Alluvial Plain of the River Forth near Grangemouth. *Geotechnique*, **1**, 111-124. <https://doi.org/10.1680/geot.1948.1.2.111>
- [10] 高彦斌, 陈忠清. 基于原位十字板强度的沿海地区软粘土超固结比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2572-2579.
- [11] 高彦斌, 王同宇. 杭州湾地区钱塘江深切河谷软土工程地质分层探讨[C]//全国工程地质学术年会. 第十届全国工程地质大会论文集, 2016 年卷. 2016: 950-956.