

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.1109

瓯江口近岸海域软土分布特征及工程性质研究

李 昂¹, 柯凯豪^{1*}, 黄 瑶¹, 朱 博¹, 胡凯翔¹, 王泉文²

(1.浙江省工程勘察设计院集团有限公司, 浙江 宁波 315000; 2.西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 通过收集瓯江口近岸海域地质钻探以及土样测试数据等资料, 分析了区域内软土空间分布特征和物理力学性质指标, 并对各项指标之间的相关性及其随地层深度的变化规律进行对比分析。结果表明: (1)瓯江口近岸海域地区软土地层工程特征差, 普遍具有含水量高、孔隙比大、饱和度高、渗透性低、灵敏度高、压缩性高和抗剪强度低等特点; (2)软土的常规指标与其深度变化之间未显示出明显规律, 但土体强度随深度增加出现增长的趋势, 软土的孔隙比与含水量、重度等指标之间呈较好的线性关系。

关键词: 软土; 分布特征; 工程性质; 统计分析; 相关性

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2024) 06-0020-08

瓯江口地处浙江省温州市南面, 其近岸陆域及海域广泛分布着全新世时期形成的海相淤泥及淤泥质土层, 这类土体普遍具有高含水量、低透水性、高压缩性、高灵敏度和土质不均匀等特点, 工程性能差。瓯江口近岸不同海域分布的软土因应力历史、物源和沉积环境的不同, 工程性质也有所差异。

近年来, 学者们对软土地层的工程特性开展了广泛的研究。彭意等^[1]对连云港扒山头区海域软土的强度及其变形特征进行了系统性的研究, 总结出了该海域带的软土指标与物理力学性质之间的相互关系; 孔令伟等^[2]采用宏观与微观相结合的方法对海口海洋软土进行了研究, 并阐述了其不良工程特性; 骆以道等^[3]对深圳西部滨海海积软土工程特性指标进行统计, 并分析了软土的分布特征及其随地层深度变化的规律; 甘建军等^[4]对湖相软土的岩土特性进行研究, 得到了孔隙比与压缩模量、黏聚力、内摩擦角之间具有相关性的结论; 王奎峰等^[5]基于工程地质钻孔数据, 对黄河三角洲地区软土的各物理力学指标的概率分布模型及参数间的相关性进行了研究; 刘维正等^[6]分析了南沙

地区软土的基本物理特性, 以及强度、变形和状态等参数随深度的变化规律; 周书东等^[7]对东莞滨海软土进行数理统计分析, 结果表明, 固结快剪抗剪强度指标频数分布均匀, 且含水率对于土体各项常规物理性质指标影响显著; 刘伟等^[8]收集分析了南沙软土地区钻孔资料, 并对上下两层软土的工程性质进行了差异性比对, 结果显示, 此区域软土空间分布上呈“上厚下薄、上纯下杂”, 工程性质具有“上高下低、上弱下强”的特点; 曹子君等^[9]基于静力触探试验提出了一种土层界面快速识别方法, 该方法基于 I_c 的统计特性自动划分土层, 识别结果具有较高可靠性; 张国沅^[10]对汕头市区软土的工程特性进行分析, 指出了可能导致的沉降变形、滑移失稳等工程地质问题, 并建议对路基进行加固处理, 同时加强对施工过程的实时监测; 陆惠平等^[11]对绍兴地区典型的淤泥质软土力学特性进行取样分析, 发现绍兴地区软土层液限较高, 塑限指数偏低, 土体具有遇水膨胀、失水皱缩的性质特征。

尽管上述研究对于不同地区软土的工程特性进行了深入分析, 然而由于软土形成过程中涉及

收稿日期: 2023-11-06.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

第一作者: 李昂, 高级工程师, 主要研究方向: 水工环地质. E-mail: 495676405@qq.com

*通信作者: 柯凯豪, 工程师, 主要研究方向: 水工环地质. E-mail: 806549778@qq.com

到的沉积环境、地层结构和颗粒结构的复杂性, 其性质具有明显的地域性和空间变化性, 尤其对于瓯江口近岸海域而言, 相关软土工程特征性研究较少, 因此有针对性地研究本区域软土的工程特性对于解决由软土引发的诸多工程问题具有深远的意义。

本文通过分析瓯江口海域海底地区的工程地质和钻探样品资料, 对瓯江口近岸海域的软土工程性质进行深入研究, 以期为本地区以及其他类似地区的软土工程建设提供有效的参考和借鉴。

1 软土的分布特征

如图 1 所示, 瓯江口海域软土广泛分布于区内海底表面, 整体厚度 30~60 m, 软土层厚度在接近海岸线与水系河口时呈递减趋势, 且整体埋深较浅。土层为淤泥、淤泥质土, 整体特点为天然含水量高、孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低、易扰动变形、固结时间长、渗透性弱、黏粒占比高等特点, 局部夹杂粉土粉砂薄层、团块或透镜体^[12]。以搜集的区域钻探资料^[13-14]为基础, 参照浙江省地方标准《工程建设岩土工程勘察规范》(DB 33/T 1065—2019)^[15], 瓯江口近岸海域软土层自上而下可分为 3 层, 具体分层情况如图 2 所示。

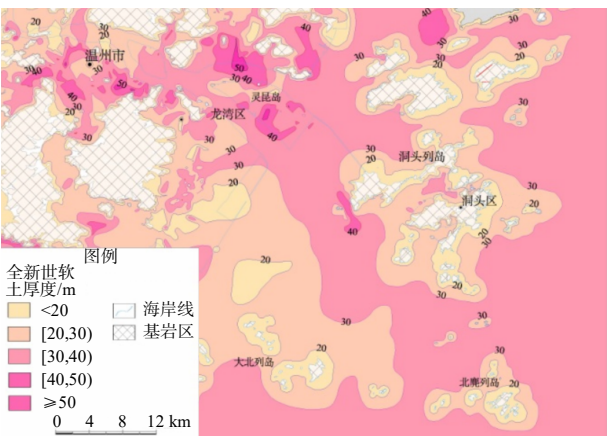


图 1 瓯江口海域软土空间分布

(1)第一层软土(①₂层), 为全新统上组海积(mQ₄³)淤泥、淤泥质土。土体呈流塑状, 灰色、青灰色, 上部与硬壳层过渡带偶见淤泥质黏土, 层顶标高-8.45~0 m, 层厚 0.5~5.2 m。主要分布于瓯江两岸及海域, 层位极不稳定。

(2)第二层软土(②₁层), 为全新统中组海积(mQ₄²)淤泥、淤泥质土。土体呈流塑状, 灰色, 厚层状, 层顶标高-23.4~0 m, 层厚 3.4~28.6 m。该层在瓯江口海域海底广泛分布。

(3)第三层软土(③₂层), 由全新统下组海积(mQ₄¹)淤泥质黏土和粉质黏土组成, 灰色、深灰色,

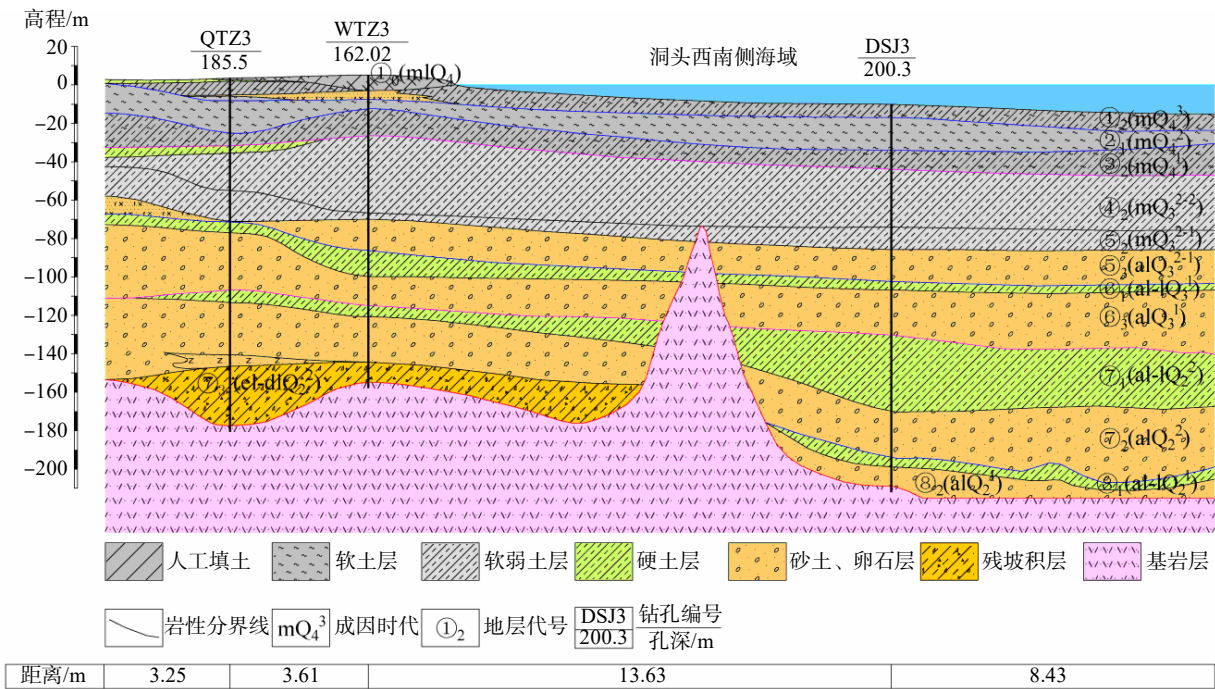


图 2 典型地质剖面

流塑-软塑状, 鳞片状构造. 该层在全区广泛分布, 层顶标高-27.5~-10.7 m, 层厚 4.2~23.3 m.

2 软土的工程特性

为了研究该区域软土工程性质, 本次研究收集了甬江口海域中较典型的 72 孔地质钻探数据结果进行汇总分析. 孔位分布如图 3 所示, 选取孔位来源于整个甬江口近岸海域平原区, 能有效反映出研究区软土的分布位置, 总结出该区域内工程地质特征.

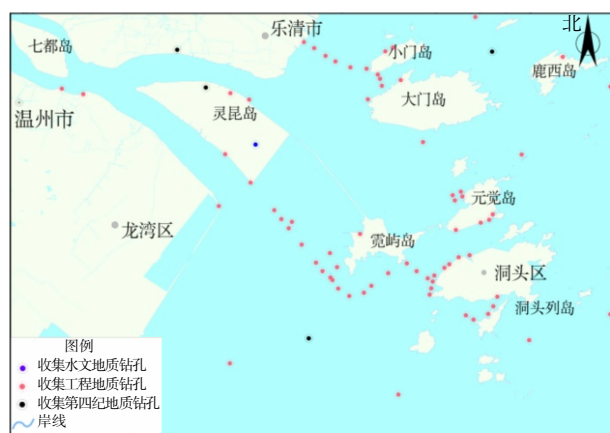


图 3 甬江口海域钻孔位置分布

本次研究对 446 份全新世软土样品测试数据进行筛选后采用 Grubbs 准则进行统计^[16], 结果见表 1. 按照规范^[15]规定的岩土参数分析方法进行统计, 计算公式如下:

$$\varphi_m = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i}{n}, \quad (1)$$

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\varphi_i - \varphi_m)^2}, \quad (2)$$

$$\delta = \sigma_f / \varphi_m, \quad (3)$$

$$\gamma_s = 1 \pm \left(\frac{1.704}{\sqrt{n}} + \frac{4.678}{n^2} \right) \delta, \quad (4)$$

$$\varphi_k = \gamma_s \varphi_m, \quad (5)$$

式中: φ_m 为岩土参数的平均值; φ_i 为第 i 个岩土参数; n 为岩土参数的样本数; σ_f 为岩土参数的标准差; δ 为岩土参数的变异系数; γ_s 为岩土参数的修正系数; φ_k 为岩土参数的标准值.

由表 1 可知, 甬江口海域浅部软土土层物理力学参数中重度、饱和度和比重三个指标所示的数值集中度最高, 三个指标的变异系数相对较低; 含水量、孔隙比和界限含水量三个指标集中度较高, 此三项指标变异系数小于 0.24; 压缩模量、压缩系数、黏聚力和内摩擦角四项指标集中度较好, 变异系数均小于 0.3. 整体而言, 本区域内浅部软土土层物理力学参数数据之间存在连续性关系, 说明本次统计结果能有效反映出甬江口海域软土的工程地质特征. 根据已有结果对比研究区内土样实物, 甬江口海域软土层具有以下工程特征:

(1) 土体颜色主要为灰色, 表层偶见灰黄色, 土体基本为细颗粒, 且有机质含量较高.

表 1 土层物理力学参数统计一览表(甬江口海域)

指标	单位	样本数量	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数	修正系数	标准值
含水量(w)	%	446	113.6	34.3	60.30	8.11	0.135	1.011	60.96
重度(γ)	$\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	444	18.5	14.9	16.46	0.57	0.035	0.997	16.41
孔隙比(e)		444	2.189	1.007	1.690	0.200	0.120	1.010	1.702
饱和度(S_r)	%	412	100	82.9	97.68	2.51	0.026	1.002	97.68
比重(G_s)		414	2.76	2.72	2.75	0.01	0.004	1.000	2.75
液限(W_L)	%	446	68.1	31.5	50.28	6.30	0.125	1.010	50.78
塑限(W_P)	%	446	38.2	18.0	27.91	3.47	0.124	1.010	28.19
塑性指数(I_p)		446	30.3	13.0	22.36	3.03	0.136	1.011	22.60
液性指数(I_L)		446	3.94	0.80	1.46	0.35	0.236	1.019	1.49
压缩系数($a_{0.1-0.2}$)	MPa^{-1}	438	3.52	0.55	1.46	0.41	0.281	1.023	1.50
压缩模量($E_{s0.1-0.2}$)	MPa	438	3.68	0.86	1.95	0.49	0.253	0.979	1.91
固快黏聚力(C)	kPa	303	26.0	7.0	14.16	3.19	0.225	0.978	13.85
固快内摩擦角(ϕ)	°	303	14.7	1.5	7.99	1.74	0.217	0.979	7.83

(2)含水量大,平均含水量达 60.30%,且不均匀,含量 34.3%~113.6%,含水量一般大于液限。孔隙比大(1.007~2.189),平均孔隙比为 1.690。饱和度高(82.9%~100%),平均饱和度达 97.68%,土质稀软。液性指数高,平均液性指数为 1.46,指数在 1~2 之间较集中,呈流塑状态。塑性指数 13.0~30.3,属于中等-高塑性土。

(3)压缩性高,压缩系数为 $0.55\sim 3.52\text{ MPa}^{-1}$,样本压缩系数平均值为 1.46 MPa^{-1} ,整体而言是压缩性较高的土。实际工程建设中发生沉降的可能性较大。

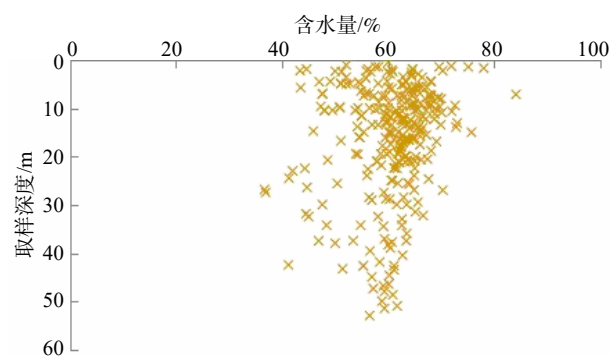
(4)强度低,软土的内摩擦角为 $1.5^\circ\sim 14.7^\circ$,固快黏聚力一般为 7~26 kPa。

此外,据搜集的其他勘察项目资料^[17-19]显示,研究区软土还具有明显的流变性、低渗透性、高灵敏度的特征。

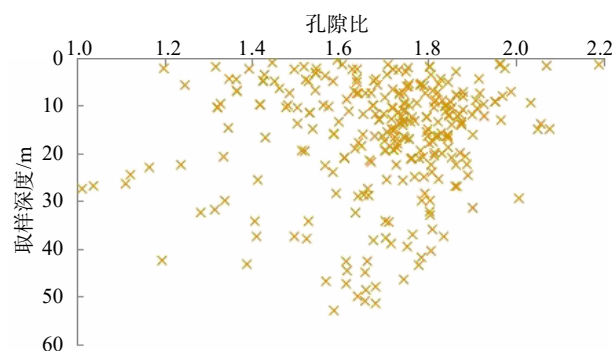
3 软土的力学指标相关性

3.1 常规指标

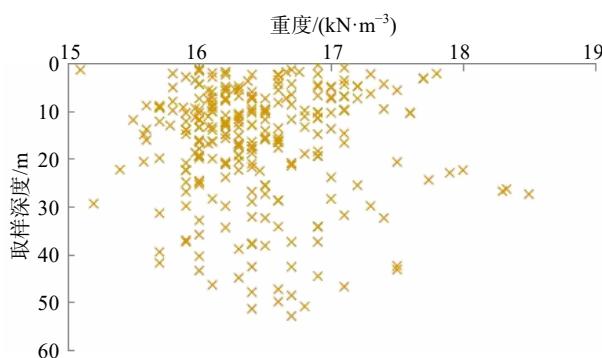
如图 4 所示,本次选取了瓯江口海域海积软土层内的 286 个样本,分别对含水量、孔隙比和重度随深度分布情况进行统计分析。



(a) 含水量随深度分布



(b) 孔隙比随深度分布

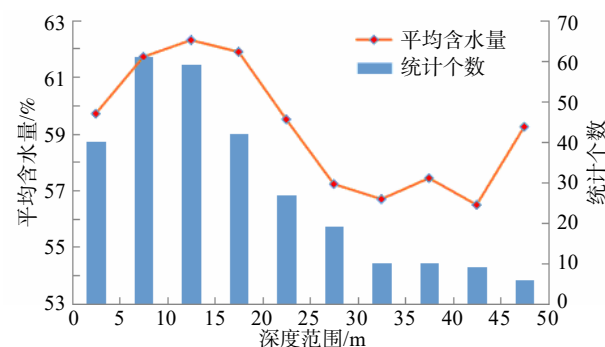


(c) 重度随深度分布

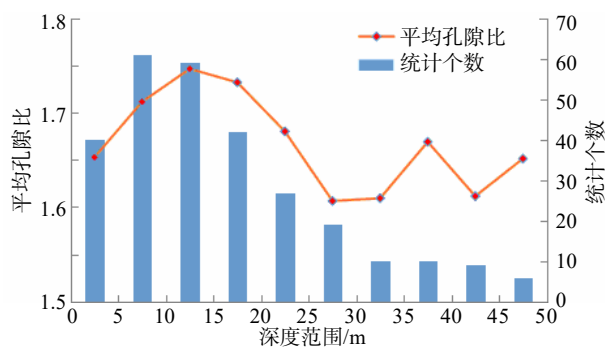
图 4 常规指标随深度分布

根据统计结果,样本含水量主要集中在 40%~80% 范围内,孔隙比主要分布在 1.4~2.0 范围内,重度在 $15.5\sim 17.5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内。对上述指标在不同深度结果进行统计分析可知:该区域含水量、孔隙比、重度与取样深度的相关性不大,反映出瓯江口海域分布的软土土质均一性较差。

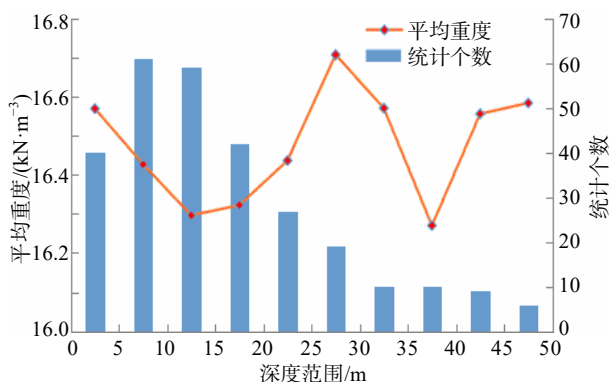
为进一步研究区域内软土含水量、孔隙比和重度随深度的分布规律,对 50 m 深度内的软土物理指标均值进行统计,结果如图 5 所示。从图中可以看出,上述指标均值与软土分布深度的关联性不大,这表明瓯江口海域软土土质均一性较差,究其原因可能与局部含粉土、粉砂薄层或团块有关。



(a) 不同深度范围内的平均含水量



(b) 不同深度范围内的平均孔隙比

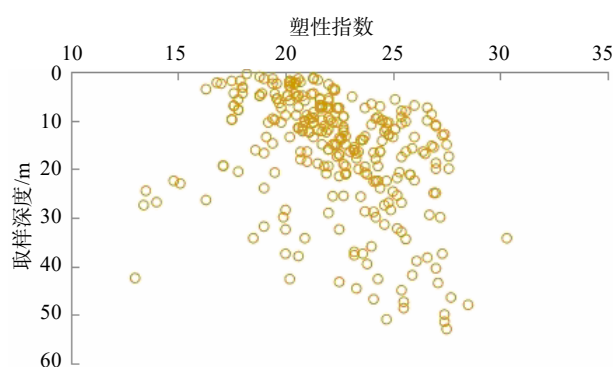


(c) 不同深度范围内的平均重度

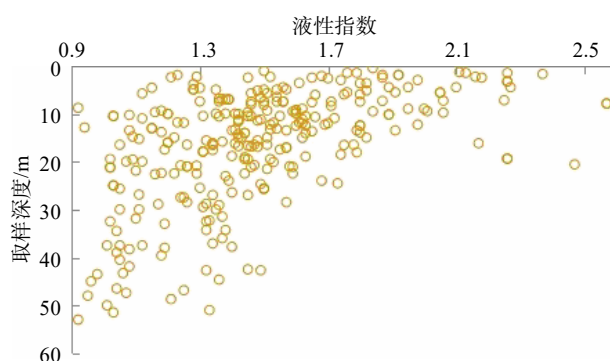
图5 不同深度范围内常规指标均值

3.2 界限含水量

用上述两种方法统计样品的界限含水量四个指标, 结果如图6和图7所示. 对结果进行统计得出结论: ①平均塑限含水量分布在 25%~30%范围; ②平均液限含水量分布在 44%~57%范围; ③平均塑性指数主要分布在 19~27范围. 上述三项指标随深度的增加总体呈增长的趋势; 平均液性指数主要分布在 1.0~1.8 范围, 该指标随深度的增大总体呈减小的趋势.

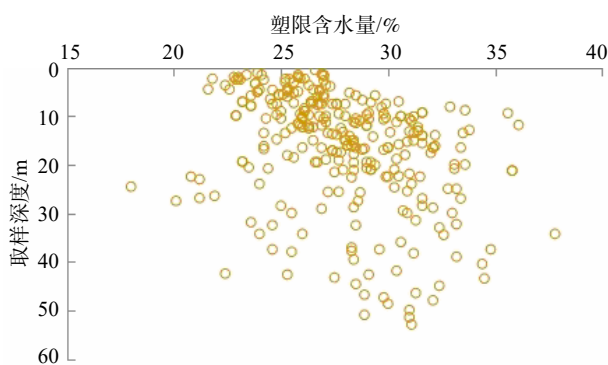


(c) 塑性指数随深度分布

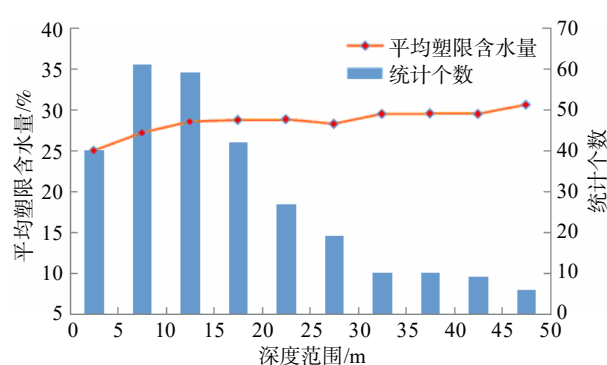


(d) 液性指数随深度分布

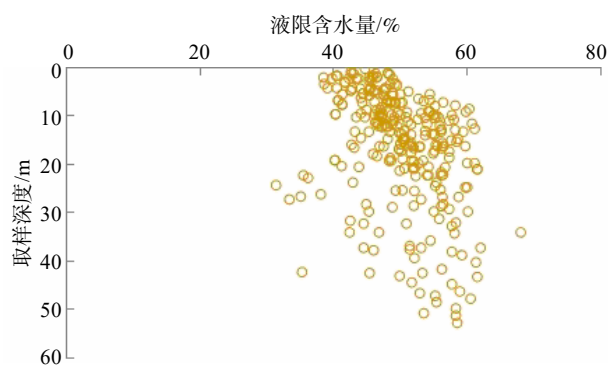
图6 界限含水量随深度分布



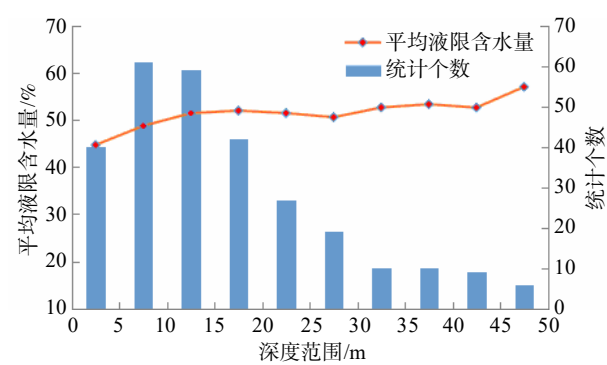
(a) 塑限含水量随深度分布



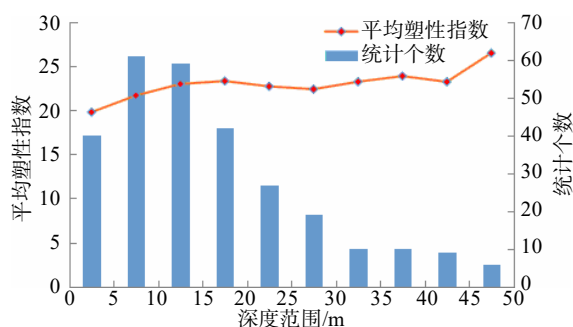
(a) 不同深度范围内的平均塑限含水量



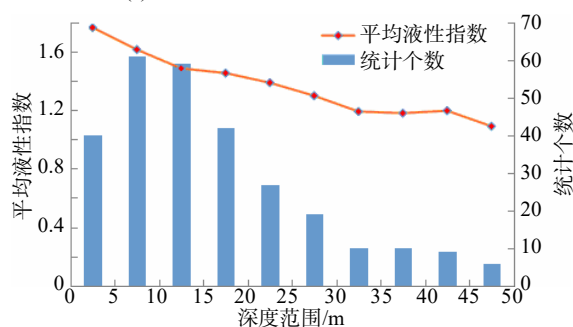
(b) 液限含水量随深度分布



(b) 不同深度范围内的平均液限含水量



(c) 不同深度范围内的平均塑性指数



(d) 不同深度范围内的平均液性指数

图7 不同深度范围软土层界限含水量均值统计

3.3 压缩性

对瓯江口海域海积软土层 286 个样本的常规压缩试验指标随深度的分布情况进行了统计分析, 结果如图 8 和图 9 所示. 结果显示, 平均压缩系数 $a_{v0.1-0.2}$ 主要分布在 $0.9 \sim 1.7 \text{ MPa}^{-1}$ 范围, 随深度的增加呈减小的趋势, 符合土体正常固结的规律.

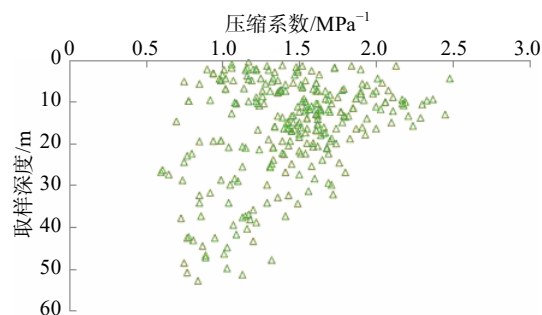


图8 软土层压缩系数随深度分布

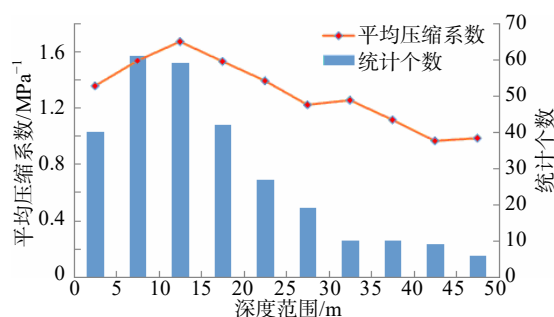
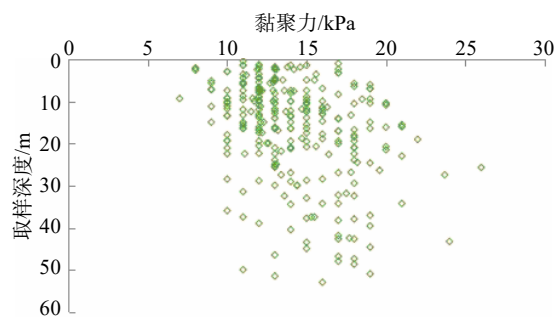


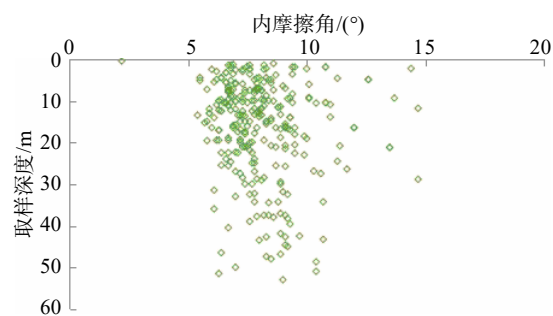
图9 不同深度范围软土层压缩系数均值统计

3.4 强度

对瓯江口海域软土区收集的 286 个样本的强度试验指标随深度的分布情况进行了统计, 结果如图 10 和图 11 所示.

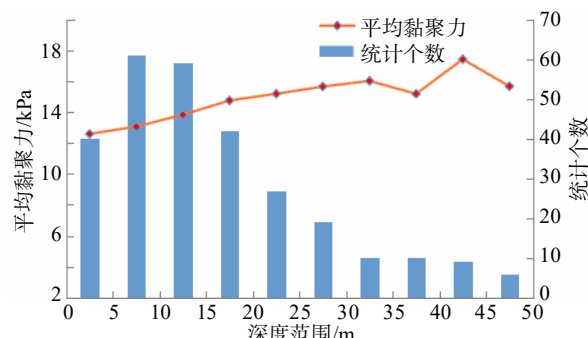


(a) 黏聚力随深度变化

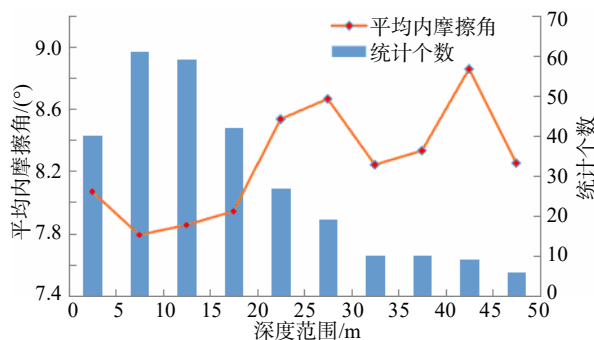


(b) 内摩擦角随深度变化

图10 软土层强度指标随深度分布



(a) 不同深度范围内的平均黏聚力



(b) 不同深度范围内的平均内摩擦角

图11 不同深度范围软土层强度指标均值统计

统计结果显示,平均黏聚力主要分布在 12~18 kPa 之间,随深度的增加呈变大的趋势,但平均内摩擦角随深度无明显变化规律。

通过分析以上各项指标在不同深度的变化规律得出结论:瓯江口海域分布的软土,其含水量、重度、孔隙比等常规指标随分布深度变化规律不明显,压缩性和强度随着深度增加而增大。该结论大体上符合土体沉积固结的发展规律。另外,局部范围内统计结果出现异常可能与该区域内含较多粉砂和粉土团块及该区间软土土质分布不均匀相关。

3.5 各指标相互关系

通过分析总结上述各项指标之间的关联性,可以根据方便测定的数据指标推算不易直接测定的数据指标,并且可对土工试验的结果是否准确做进一步验证。

统计结果如图 12 所示,研究区软土的含水量和重度与孔隙比的关联性较强。其中,孔隙比与含水量的相关系数 R^2 为 0.893 3,与重度的相关系数 R^2 为 0.814 5。

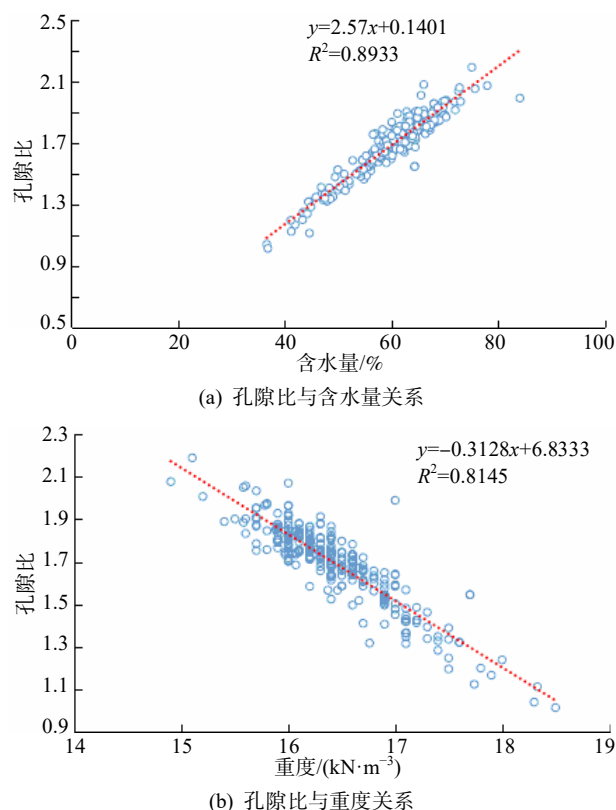


图 12 软土层在研究区内部分指标之间关系

以软土含水量与软土的孔隙比相关性为例,

其拟合关系式为: $e=2.57w+0.1401$ 。

将表 1 中含水量的标准值 $w=60.96\%$ 代入,得 $e=1.707$,与统计获得的孔隙比标准值 $e=1.702$ 十分接近,误差约为 0.3%,可以验证本文统计工作方法和结果的合理性。

4 结论

通过对瓯江口近海域钻孔数据的分析,本文揭示了瓯江口近海域软土的分布特征,绘制了高精度的软土厚度分布图;同时对区域软土的物理力学指标进行了统计、分析和对比,结果如下:

(1)该区域的软土分布广泛且厚度较大,主要为淤泥和淤泥质土。该类软土普遍具有含水量高、孔隙比大、饱和度高、渗透性低、灵敏度高等特点,土体呈流塑状态,同时具有高压缩性和低抗剪强度等特征,工程性质较差。

(2)瓯江口海域软土的含水量、重度、孔隙比等常规指标随深度变化规律不明显,但孔隙比与含水量、重度等指标有较好的线性关系,且软土力学性质整体随地层深度的增加而增强。这些发现对于深入了解该地区软土的工程性质以及对于工程设计和施工具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 彭意,周炳源,张清萍. 连云港扒山头区海域软土的特性[J]. 西部探矿工程, 2000, 12(2):39-41.
- [2] 孔令伟,吕海波,汪稔,等. 海口某海域软土工程特性的微观机制浅析[J]. 岩土力学, 2002, 23(1):36-40.
- [3] 骆以道,杨光华,张玉成,等. 深圳西部滨海海积软土工程特性及统计分析[J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(2):79-86.
- [4] 甘建军,李荐华,唐春,等. 鄱阳湖区深厚湖相沉积软土工程特性研究[J]. 南昌工程学院学报, 2019, 38(6):1-12.
- [5] 王奎峰,秦学全. 黄河三角洲北部地区软土工程地质特性及空间分布[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(1):31-41.
- [6] 刘维正,葛孟源,李天雄. 南沙海相软土工程特性原位测试对比与统计规律分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊 2):267-275.
- [7] 周书东,黄锦盛,张彤炜,等. 东莞滨海软土物理力学指标统计与相关性分析[J]. 土工基础, 2022, 36(6):992-996.

- [8] 刘伟, 陈凌伟, 张庆华, 等. 广州南沙区软土分布特征及工程性质[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(1):94-99.
- [9] 曹子君, 胡超, 苗聪, 等. 基于分层贝叶斯学习的滨海软土地层高效识别方法[J]. 地球科学, 2023, 48(5): 1730-1741.
- [10] 张国沅. 汕头市区软土空间分布及其工程地质特性[J]. 西部资源, 2023(3):19-20, 23.
- [11] 陆惠平, 朱挺, 刘泽, 等. 绍兴淤泥质软土工程特性[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(15):155-157
- [12] 李昂, 柯凯豪, 黄瑶, 等. 三门湾地区海相软土工程特征研究[J]. 地基处理, 2022, 4(3):206-214.
- [13] 浙江省水文地质工程地质大队. 浙江省海岸带重点区综合地质调查(温州重点区)报告[R]. 宁波, 2022.
- [14] 浙江省第十一地质大队. 浙江省温州市城市地质调查报告[R]. 温州, 2008.
- [15] DB 33/T 1065—2019. 工程建设岩土工程勘察规范[S].
- [16] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册(第五版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [17] 浙江省工程勘察院. 温州港状元乔港区围垦工程[R]. 宁波, 2003.
- [18] 浙江省工程勘察院. 温州港龙湾港区一期技改工程[R]. 宁波, 2005.
- [19] 浙江省工程勘察院. 温州市大门大桥大门连接线公路工程[R]. 宁波, 2009.

Research of distribution and engineering properties of soft soil in Oujiang coastal area

LI Ang¹, KE Kaihao¹, HUANG Yao¹, ZHU Bo¹, HU Kaixiang¹, WANG Xiaowen²

(1.Zhejiang Engineering Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Ningbo 315000, China;

2.School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In this paper, the spatial distribution characteristics and physical and mechanical properties of soft soil in the Oujiang coastal area were analyzed by collecting data from geological drilling and soil sample test. The correlation between the indexes characterizing the above distribution and properties, as well as their variation with the depth of soft soil stratum, was also analyzed. The results show that: (1) The engineering characteristics of soft soil stratum in the Oujiang coastal area are poor, with high water content, large pore ratio, high saturation, low permeability, high sensitivity, high compressibility and low shear strength. (2) There is no obvious rule between the conventional indexes of soft soil and their depth variation, but the soil strength tends to increase with the increase of the depth, and the pore ratio of soft soil has a good linear relationship with the indexes such as water content and weight.

Key words: soft soil; distribution characteristics; engineering properties; statistical analysis; relevance

(责任编辑 韩 超)