



# 鱼山海域促淤围涂工程 软土特征及土工指标分析

孙德科, 吴朝东

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 针对鱼山海域软土十分发育、对工程建设影响较大的问题, 进行该海域软土土工试验成果分析研究, 包括③<sub>2</sub>层淤泥质粉质黏土层物理、力学指标等影响因素; 采用数学统计方法分析主要指标的相关性。结果表明: 该层土工程性质差, 常规物理试验指标离散性较小; 天然含水率与孔隙比、液限与塑限、塑性指数具有明显线性相关特性; 抗剪强度随着深度增加而呈现十字板原位测试(原状)>直剪快剪>固结快剪规律。

**关键词:** 鱼山海域; 软土; 物理力学指标; 相关性

中图分类号: TU 411; U 652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)05-0158-04

## Soft soil characteristics and geotechnical indices of silt-promoting reclamation project in the Yusan sea area

SUN De-ke, WU Chao-dong

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** In view of the problem that soft soil in the Yushan sea area is very developed and has a great influence on the engineering construction, we analyze the results of the soft soil geotechnical test in this sea area, including the influential factors such as physical and mechanical indices of the ③<sub>2</sub> silty powder clay layer. Using mathematical-statistical methods and fitting the main indicators for correlation, we obtain the results which show that the layer has poor engineering properties and dispersion of conventional physical test indicators is small; the natural moisture content and pore ratio, liquid limit and plastic limit, plasticity index have obvious linear correlation characteristics; shear strength increases with depth, showing the rule of cross-slab in-situ test (in-situ) > straight shear fast shear > consolidation fast shear.

**Keywords:** Yushan sea area; soft soil; physical and mechanical indices; correlation

淤泥、淤泥质黏土等软土在浙江鱼山地区十分发育。软土具有含水率高、压缩性高的特点。为优化水运工程安全建设方案, 充分了解软土的物理力学参数相关性尤为重要。取土和试验过程中存在较多不确定因素, 会出现各种测试误差。采用数学统计方法分析测试结果是减小误差的有效手段。梁仕华等<sup>[1]</sup>研究成果显示, 中山港区域软土主要物理指标相关性较强; 彭立才等<sup>[2]</sup>分析珠海横琴地区

软土, 给出软土力学强度指标与含水率的关系。本文对鱼山海域促淤围涂工程中的大量软土样品进行研究, 采用数学统计方法, 分析③<sub>2</sub>层淤泥质粉质黏土各物理力学指标间的相关性, 为鱼山区促淤围涂工程的软土基础设计提供依据。

### 1 软土采集与试验方法

为确保软土采样质量, 采用提阀式敞口薄壁取

土器<sup>[3]</sup>, 可减少土样原始结构的扰动, 采样间距一般为 2.0 m, 浅部土样采用静压法或重锤少击法, 深部土样采用孔底锤击器, 从而保证获取土样的质量。主要试验项目包括常规试验、压缩试验、渗透试验、三轴试验、直剪试验等, 同时在钻孔附近

采用十字板剪切试验, 获得原位剪切试验指标。

## 2 主要试验指标

对③<sub>2</sub>层淤泥质粉质黏土物理指标和剪切强度等进行统计分析<sup>[4]</sup>, 结果见表 1 和表 2。

表 1 ③<sub>2</sub>层常规物理指标

	天然含水率 w/%	天然密度 $\rho$ /( $t \cdot m^{-3}$ )	孔隙比 e	饱和度 S <sub>r</sub> /%	液限 w <sub>L</sub> /%	塑限 w <sub>p</sub> /%	液限指数 I <sub>L</sub>	塑限指数 I <sub>p</sub>	压缩系数 $a_{0.1-0.2}/(t \cdot m^{-2})$	压缩模量 E <sub>s</sub> /(MPa)	水平渗透系数 $k_h/(10^{-7} cm^2 \cdot s^{-1})$	垂直平渗透系数 $k_v/(10^{-7} cm^2 \cdot s^{-1})$
最大值	52.1	0.186	1.443	100	42.2	25.6	2.55	17.0	1.46	5.25	7.6	3.30
最小值	36.1	0.167	1.018	86.1	27.9	16.1	1.04	10.2	0.39	1.66	2.7	1.70
平均值	43.2	1.76	1.212	96.7	35	21.1	1.61	13.9	0.74	3.22	4.7	2.53
变异系数/%	9.8	2.3	8.9	3.1	8.9	8.0	19.5	13.2	27.7	26.2	54.7	31.70
子样/个	78	78	78	78	78	78	78	61	61	10	10	10

表 2 ③<sub>2</sub>层土剪切强度

	固结快剪试验		直剪快剪试验		三轴试验(UU)		十字板试验		
	黏聚力 $c_{eq}/kPa$	内摩擦角 $\varphi_{eq}/(^{\circ})$	黏聚力 $c_q/kPa$	内摩擦角 $\varphi_q/(^{\circ})$	黏聚力 $c_{uu}/kPa$	内摩擦角 $\varphi_{uu}/(^{\circ})$	原状土抗剪强度 $c_u/kPa$	重塑土抗剪强度 $c'_u/kPa$	灵敏度 $S_t$
最大值	15.0	25.0	16.0	12.0	24.0	0	29.1	9.5	4.0
最小值	11.0	9.0	60.	20.	110.	0	9.6	2.6	2.9
平均值	11.7	16.8	14.2	40.	15.7	0	19.4	6.0	3.3
变异系数/%	9	22.8	10.4	31.2	29.6	0	29.3	34.1	6.5
子样/个	32	32	10	10	9	9	106	106	106

根据表 1、2 统计成果可知③<sub>2</sub>层淤泥质粉质黏土具有以下特征。

1) 高液限、高含水率: 该软土层天然含水率范围 36.1%~52.1%, 加权平均值为 43.2%; 液限指数 1.04~2.55, 加权平均值为 1.61; 塑限指数 10.2~17.0, 加权平均值为 13.9。说明该软土为流塑状态的高液限淤泥质粉质黏土。

2) 高压缩性: 该软土层孔隙比范围 1.018~1.443, 加权平均值为 1.212; 压缩系数范围 0.39~1.46, 加权平均值为 0.74; 压缩模量为 1.66~5.25 MPa, 加权平均值为 3.22 MPa。可知该软土层具高压缩性。

3) 低强度: 该软土层直剪快剪试验的黏聚力范围 6.0~16.0 kPa, 加权平均值为 14.2 kPa; 固结快剪黏聚力范围 11.0~15.0 kPa, 加权平均值为 11.7 kPa; 三轴试验(UU) 黏聚力范围 11.0~24.0 kPa, 加权平均值为 15.7 kPa; 十字板试验黏聚力(原状)范围 9.6~29.1 kPa, 加权平均值为 19.4 kPa。不同试验条件下, 黏聚力都较低, 说

明该软土层具有较低的抗剪强度。

4) 低渗透性: 该软土层水平渗透系数范围  $2.7 \times 10^{-7} \sim 7.6 \times 10^{-7} cm^2/s$ , 加权平均值为  $4.7 \times 10^{-7} cm^2/s$ ; 垂直渗透系数范围  $1.70 \times 10^{-7} \sim 3.30 \times 10^{-7} cm^2/s$ , 加权平均值为  $2.53 \times 10^{-7} cm^2/s$ , 为极微渗透性土层, 可不考虑该层土渗透性。整体上, 垂直渗透能力小于水平渗透能力。

5) 高灵敏度: 根据现场十字板试验成果得知, 该软土层灵敏度  $S_t$  加权平均值达 3.3, 为灵敏度较高的软土。

6) 离散差异性: 通过表 1~2 可以看出, 常规物理土工指标变异系数较小、离散性较小, 可将其考虑设为常数, 但力学指标具有差异性, 其中直剪快剪试验和现场十字板试验结果变异系数较大, 说明不同试验条件下, 因加载方式和排水速率不同, 剪切强度有差异。

## 3 物理指标相关性分析

软土的物理指标可直接影响其力学特性, 同

时反映其本身特性。通过分析③<sub>2</sub>层统计数据, 对孔隙比  $e$ 、天然含水率  $w$ 、液限  $w_L$ 、塑限  $w_p$ 、塑限指数  $I_p$ 、压缩系数  $a_{0.1-0.2}$  等指标进行相关性拟合, 结果见表 3。

表 3 ③<sub>2</sub> 层常规物理指标拟合关系

土工指标		回归方程	相关性系数 $R^2$
自变量	因变量		
$w$	$e$	$e = 0.0239w + 0.1792$	0.8819
$w$	$a_{0.1-0.2}$	$a_{0.1-0.2} = 0.018w - 0.0457$	0.1668
$w_L$	$w_p$	$w_p = 0.4718w_L + 4.5875$	0.7606
$w_L$	$I_p$	$I_p = 0.5282w_L - 4.5875$	0.7993

主要指标拟合曲线见图 1。从表 3 和图 1 可以看出:

1) 天然含水率与孔隙比具有明显的线性相关性, 说明天然含水率随着孔隙比增加而升高, 天然含水率与压缩系数不具较显著的线性相关性, 但可看出整体上随着含水率升高, 压缩系数变大。

2) 根据液限与塑限、塑性指数拟合曲线可知, 两者具有明显的线性相关性, 对工期要求较紧张或现场条件受限的情况, 可根据液限推算塑限和塑性指数。

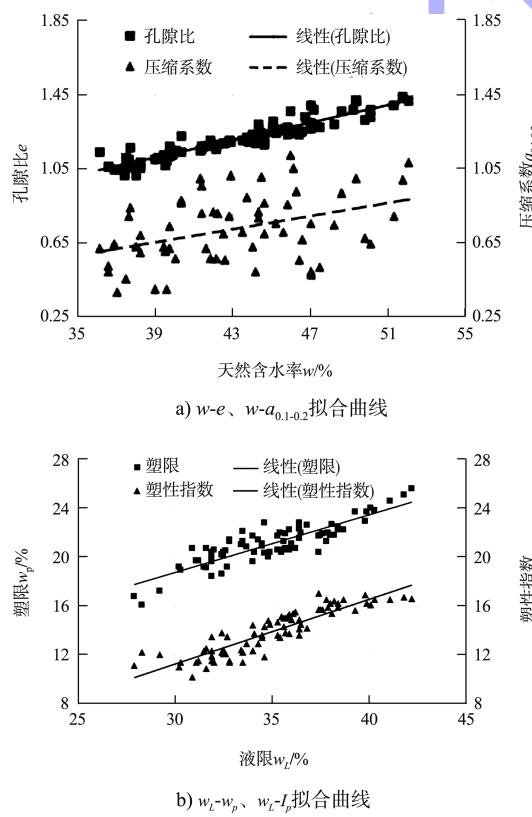


图 1 主要指标拟合曲线

#### 4 剪切强度指标相关性分析

##### 4.1 深度对剪切强度的影响

相同深度下将固结快剪、直剪快剪、十字板剪切试验(原状)剪切强度与土样埋深进行拟合对比分析<sup>[5-6]</sup>, 拟合曲线见图 2。可以看出浅部土层各试验指标相差不大, 但随着土层埋深增加, 土层指标的抗剪强度呈现以下规律: 十字板剪切试验(原状) > 直剪快剪 > 固结快剪。现场十字板原位测试结果受到外围因素影响较小, 在土壤原始位置进行测试, 可保持土壤处于天然结构和原始应力状态, 获取剪切强度参数可看作该层土原始状态抗剪强度值。实验室室内获取抗剪强度指标受到取样方式、运输等诸多因素影响, 土壤原始结构易破坏, 造成土样抗剪强度降低。

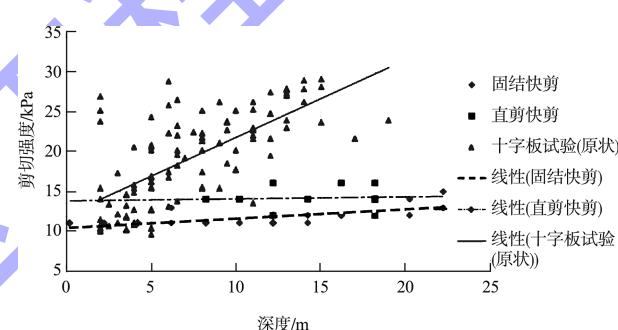
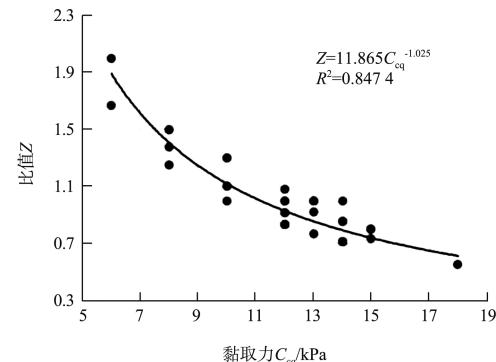


图 2 土样埋深与抗剪强度参数拟合关系曲线

##### 4.2 固结快剪试验与直剪快剪试验参数的关系

将相同土样直剪快剪内摩擦角、黏聚力分别于固结快剪内摩擦角、黏聚力比值  $Z$  作为因变量 ( $Z = C_q/C_{cq}$ ,  $Z = \psi_q/\psi_{cq}$ ), 固结快剪内摩擦角、黏聚力分别作为自变量, 获得图 4 关系拟合曲线。从图 4 可以看出, 随着黏聚力、内摩擦角增加, 比值  $Z$  呈规律性降低。



a) 黏聚力相关性拟合曲线

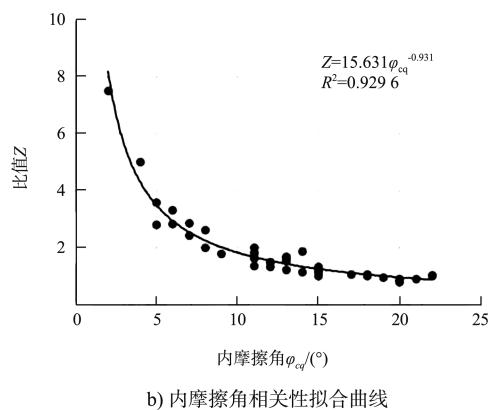


图4 关系拟合曲线

拟合关系公式见表4。利用该关系式, 可以根据直剪快剪试验参数推算固结快剪指标, 对工程勘察具有指导意义。

表4 直剪快剪与固结快剪试验指标拟合关系公式

土工指标		回归方程	相关性系数 $R^2$
自变量	因变量		
$C_{eq}$	Z	$Z = 11.865C_{eq}^{-1.025}$	0.847 4
$\varphi_{eq}$	Z	$Z = 15.631\varphi_{eq}^{-0.931}$	0.929 6

## 5 结语

1) 鱼山区促淤围涂工程③<sub>2</sub>层淤泥质粉质黏土常规土工指标显示, 该区域土层具有较高的含水率、压缩性和灵敏度, 以及较低的抗剪切强度和渗透性。常规物理试验指标离散性较小, 可视为常数, 但力学指标具有差异性。

(上接第157页)

## 5 结论

1) 通过采取海上十字板剪切试验精度保障措施, 获得的试验数据较为准确, 为鱼山工程的基础设计提供了可靠的岩土参数, 取得了显著的经济效益和良好的社会效益。

2) 通过采取上述措施, 解决了复杂海况下海上十字板剪切试验的难题, 丰富了水运工程勘探手段, 对我国海域水上十字板剪切试验的应用起到了推动作用, 具有广泛的应用前景。

## 参考文献:

- [1] American Society for Testing and Materials. Standard test method for field vane shear test in cohesive soil: D 2573-94 [S].

2) ③<sub>2</sub>层淤泥质粉质黏土天然含水率与孔隙比具有显著的线性关系特性, 说明孔隙比越大, 含水率越高。根据液限与塑限、塑性指数拟合方程, 两者具有明显线性相关特性。

3) 随着③<sub>2</sub>层淤泥质粉质黏土层埋深增加, 抗剪强度具有十字板原位测试(原状) > 直剪快剪 > 固结快剪规律。

4) 直剪快剪与固结快剪指标具有一定的相关性, 分别通过黏聚力、内摩擦角与比值Z拟合获得相应关系公式, 对工程勘察具有指导意义。

## 参考文献:

- [1] 梁仕华, 戴君. 中山港地区软土物理力学指标统计分析[J]. 广东工业大学学报, 2016, 33(3): 81-87.
- [2] 彭立才, 温勇, 杨光华, 等. 珠海横琴新区软土物理力学指标统计分析[J]. 广东水利水电, 2016(4): 29-32.
- [3] 张俊杰. 宁波软土取样方法与土的物理力学指标研究[J]. 勘察科学技术, 2014(3): 1-5.
- [4] 吉兴伟. 昆明南市区软土物理力学参数相关性分析与模拟[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005.
- [5] 尹利华, 王晓谋, 张留俊. 天津软土土性指标概率分布统计分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(S2): 462-469.
- [6] 孙莉萍, 杨玉春, 刘槊. 土工直接剪切试验和三轴剪切试验优缺点及适用范围[J]. 水利水电工程设计, 2013, 32(4): 40-42, 47.

(本文编辑 郭雪珍)

New York: American Society for Testing and Materials, 1994.

- [2] 陶凯, 赵家明, 徐绪程. 海上十字板剪切试验的影响因素及应对措施[J]. 中国水运(下半月), 2013, 13(9): 329-330.
- [3] 胡建平, 冯蓓蕾. 洋山深水港区工程海上勘探关键技术实施[J]. 海洋工程, 2012, 30(3): 164-169.
- [4] 徐威, 乌孟庄. 两种水域十字板剪切试验的对比研究[J]. 工程勘察, 2009(S2): 99-104.
- [5] 姚首龙, 郑喜耀. 海上原位十字板剪切试验方法介绍[J]. 岸海工程, 2015, 34(2): 67-73.
- [6] 吴朝东, 顾敏智, 陈凯, 等. 鱼山工程一~三期岩土工程勘察报告[R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计有限公司, 2016—2019.

(本文编辑 郭雪珍)