



# 内河疏浚土抗剪强度 随含水率变化规律的试验研究

邬德宇<sup>1</sup>, 曲贝贝<sup>1</sup>, 李金峰<sup>2</sup>, 赵建豪<sup>3</sup>

(1. 中交(苏州)城市开发建设有限公司, 江苏苏州 215100; 2. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461;  
3. 中交(天津)生态环保设计研究院有限公司, 天津 300202)

**摘要:** 疏浚土的综合利用在促进社会和谐发展、建设节约型资源、发展低碳经济方面具有举足轻重的作用。采用大变形多功能土工环剪仪, 对京杭运河施桥船闸段疏浚淤泥土的物理力学特性进行试验分析, 研究约束压应力对固化土强度的影响。结果表明, 内河淤泥试样的密度、孔隙比、液限、塑限、液性指数、塑性指数等物理参数随着淤泥含水率的增加而降低; 生石灰固化剂的添加能够明显改良淤泥土的物理参数; 淤泥固化土料的压缩模量、黏聚力、内摩擦角受到轴向约束压应力的显著影响。实际工程中建议增大固化土料的轴向压缩应力以提高土料强度。

**关键词:** 疏浚淤泥土; 试验分析; 压缩模量; 内摩擦角; 黏聚力

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)S2-0022-07

## Experimental study on variation law of shear strength of river dredged silt with water content

WU De-yu<sup>1</sup>, QU Bei-bei<sup>1</sup>, LI Jin-feng<sup>2</sup>, ZHAO Jian-hao<sup>3</sup>

(1.CCCC(Suzhou) Urban Development and Construction Co., Ltd., Suzhou 215100, China;

2.CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

3.CCCC(Tianjin) Eco-Environmental Protection Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300202, China)

**Abstract:** The utilization of dredged soil plays an important role in promoting the harmonious development of society, building energy-saving resources and developing low-carbon economy. The properties of dredged silt in Shiqiao Lock section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal are tested and analyzed by large deformation multi-functional geotechnical ring shear instrument, and the influence of restrained axial compressive stress on the strength of curing soil is studied. The test results show that the physical parameters such as bulk density, void ratio, liquid limit, plastic limit, liquid index and plastic index of river silt samples decrease with the increase of silt's water content. The addition of curing agent can obviously improve the physical parameters of silt soil. The compression modulus, cohesion and internal friction angle of curing silt are significantly affected by the axial confined compressive stress. In practical engineering, it is suggested to increase the axial compressive stress of curing soil to further improve the strength of soil.

**Keywords:** dredging silt; test analysis; compression modulus; internal friction angle; cohesion

港口和航道建设产生的疏浚土往往被认为是废弃物, 会对海洋环境及水域生态造成污染。目前, 在大量科学的研究和工程实践的基础上, 认为疏浚土是一种可被利用的资源的观点已被社会各

界接受, 要求对疏浚土进行充分利用的呼声也日益高涨<sup>[1]</sup>。实际上, 疏浚土的合理再利用, 一方面可以减轻对环境的影响, 另一方面还能提供大量的人工吹填土地资源, 有利于国民经济的可持

续发展。

在疏浚土质脱水固化方面, 国外学者起步较早。Ghobadi 等<sup>[2]</sup>采用添加石灰来固化黏土, 发现掺入 7% 的石灰即可利用其水化碱性使黏土固化; Horpibulsuk 等<sup>[3]</sup>利用电石渣和粉煤灰对泰国东北地区的粉质黏土进行固化, 使该地区土壤固化指标达到工程建设要求; Lasheen 等<sup>[4]</sup>探究了火山灰材料对较高重金属含量淤泥土的固化影响, 通过一系列的浸出试验, 发现火山灰材料在固化淤泥、提升淤泥强度的同时, 又大幅阻碍重金属的析出, 综合固化效果较好; Cerbo 等<sup>[5]</sup>采用粉煤灰、水泥和部分添加剂(如硫酸钠、碳酸钠和乙二胺四乙酸等), 对高含水率、重金属污染的淤泥进行固化处理, 发现固化剂的引入使淤泥塑性指数明显降低且抗流动性增加; Sivapullaiah 等<sup>[6]</sup>在含石英和高岭石的印度红土内掺入 20% 的斑脱土, 并复掺 1% 的水泥或石灰, 发现水泥的早期固化性能较好; Sahu 等<sup>[7]</sup>研究了粉煤灰、石灰和石膏等多固化剂混合情况下的淤泥固化效果, 得到最佳配合比, 并使试验淤泥达到柔性路面基层材料的标准。

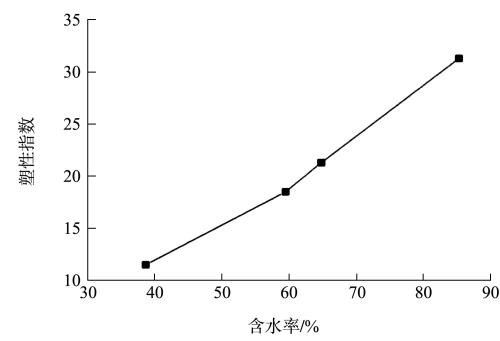
笔者对京杭运河施桥船闸至长江口门段的典型疏浚土质进行试验, 研究淤泥土料物理参数随含水率的变化, 分析轴向压应力对固化淤泥土物理力学参数的影响规律。

## 1 试验方法

### 1.1 试验土样

试验土样取自京杭运河施桥船闸至长江口门段航道整治工程的疏浚淤泥。在实验室内对 4 组淤泥土样进行典型的物理参数测试, 分析淤泥的密度、液限、塑限、孔隙比等指标与含水率之间的关系, 同时推导出塑性指数、液性指数随含水率的变化, 试验结果如图 1 所示。

图 1 给出的基础试验数据用于进一步分析淤泥土样在固化剂添加量、含水率、轴向压缩等情况下物理力学特性。4 组典型淤泥土料的部分物理指标如表 1 所示。



a) 塑性指数

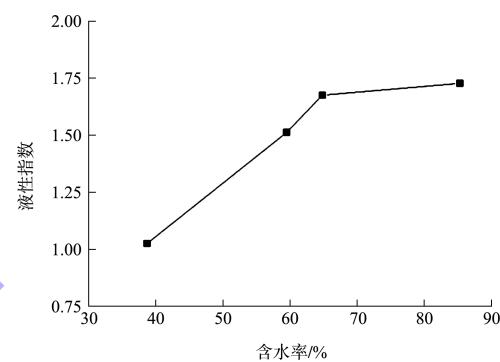


图 1 疏浚淤泥物理参数

表 1 试验土样物理指标

土样编号	天然含水率/%	天然密度/ $(t \cdot m^{-3})$	液限/%	塑限/%	孔隙比
①	38.7	1.80	38.4	26.9	1.096
②	59.5	1.75	46.3	27.8	1.432
③	64.8	1.62	50.4	29.1	1.590
④	85.3	1.53	62.5	31.2	1.976

### 1.2 试验方案及试样尺寸

为了方便试样加工与测试分析, 在高含水率的淤泥土中添加适量的固化剂, 用于降低淤泥土的流动性、提高淤泥土的无侧限抗压强度。本文采用生石灰作为固化添加剂, 疏浚土料的试验流程见图 2。

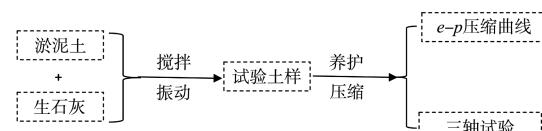


图 2 疏浚淤泥土料试验流程

疏浚土料在挖掘与输送过程中一般会发生非线性大变形, 所以试验均采用空心圆柱试样, 试样外径和内径分别为 200 mm 和 120 mm, 试样高

度为 100 mm。在试验过程中, 通过独立控制竖向荷载  $W$  和扭矩  $M$  完成对试样的压缩与剪切作用。试样受力状态如图 3 所示。

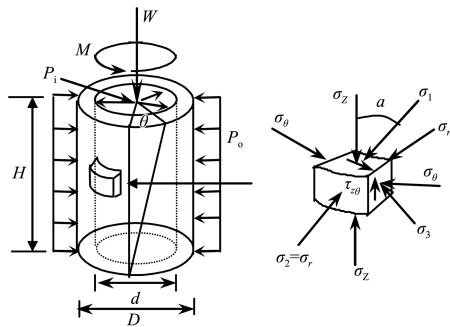


图 3 柱状圆环试样受力状态

为了探讨生石灰添加量与试样轴向压缩对疏浚土料的影响, 在恒温、恒湿养护箱 3 d 养护龄期前提下<sup>[8]</sup>, 针对不同的轴向压力分别开展多组石灰石配比试验, 试验工况如表 2 所示。

表 2 试验工况

固化剂添加量/%	轴向压力/kPa	淤泥含水率 W/%
4	2	38.7
	10	59.5
	50	64.8
	100	85.3
8	2	38.7
	10	59.5
	50	64.8
	100	85.3
12	2	38.7
	10	59.5
	50	64.8
	100	85.3
16	2	38.7
	10	59.5
	50	64.8
	100	85.3

### 1.3 试验方法

按照图 2 所示的流程开展试验: 1) 利用搅拌器, 将取得的淤泥土样搅拌均匀; 2) 按照表 2 设定的 16 种计算工况, 在重塑淤泥土中添加适量的生石灰, 采用电液伺服振动台边振动边搅拌; 3) 将均匀的淤泥土料装入土样盒, 放入恒温、恒湿保温箱中养护 3 d; 4) 养护完成后, 将土样盒装入大变形环剪仪中, 对试验土样施加轴向荷载

(轴向应力参照表 2), 研究淤泥土样物理力学参数随挤压荷载的变化规律; 5) 采用多自由度土工试验仪, 对生石灰固化后的淤泥土样进行力学测试。

## 2 试验结果

### 2.1 含水率对压缩模量的影响

利用多功能环剪仪测定不同轴向压力作用下试样的孔隙比, 按照公式(1)求解试样的压缩系数; 当试样含水率  $W=38.7\%$ 、生石灰添加量为 4%、轴向压应力为 10 kPa 时, 压缩曲线如图 4 所示。

$$\alpha=100 \times \frac{e_1-e_2}{p_2-p_1} \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  为试样压缩系数;  $e$  为试样孔隙比;  $p$  为试样轴向压力(kPa)。

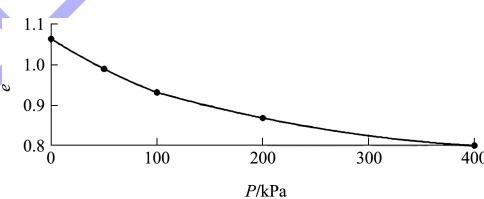
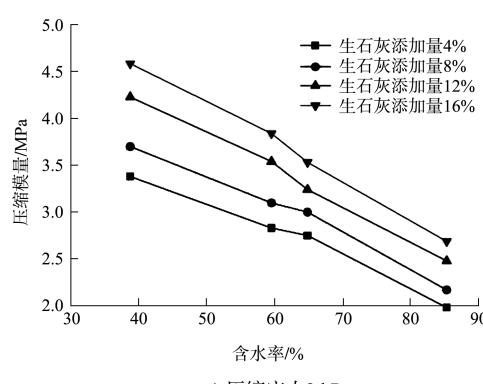


图 4 疏浚土样  $e$ - $p$  压缩曲线

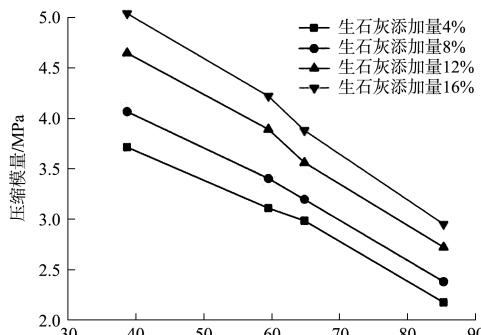
按照公式(2)可求解试样侧限条件下的压缩模量, 图 5 为不同含水率、不同轴向压力、不同生石灰添加量情况下的压缩模量变化关系。

$$E_s=\frac{1+e_0}{a} \quad (2)$$

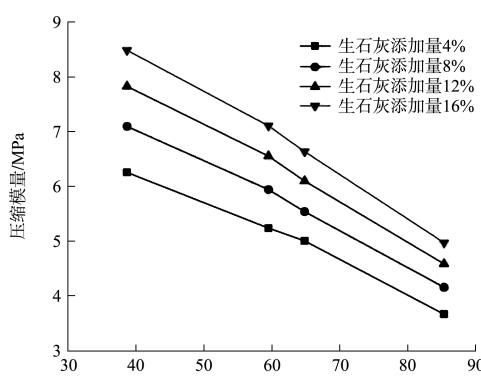
式中:  $a$  为试样压缩系数;  $e_0$  为试样孔隙比;  $E_s$  为疏浚土压缩模量(MPa)。



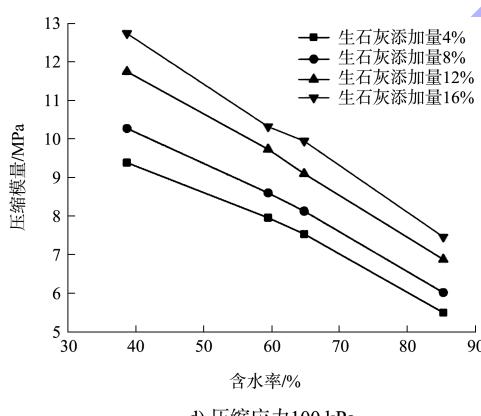
a) 压缩应力 2 kPa



b) 压缩应力 10 kPa



c) 压缩应力 50 kPa



d) 压缩应力 100 kPa

图 5 固化土压缩模量的变化规律

对图 5 给出的淤泥土压缩模量进行分析, 以含水率  $W=38.7\%$ 、生石灰添加量为 4% 为例, 发现压缩模量随着淤泥含水率的增加呈降低趋势; 压缩模量随着固化添加剂的增加而增大; 压缩模量随着轴向压缩应力的增大而提高。基于上述试验数据, 给出压缩模量随轴向压应力的变化关系以及变化规律表达式(以含水率 38.7%、生石灰添加量 4% 为例), 见图 6。

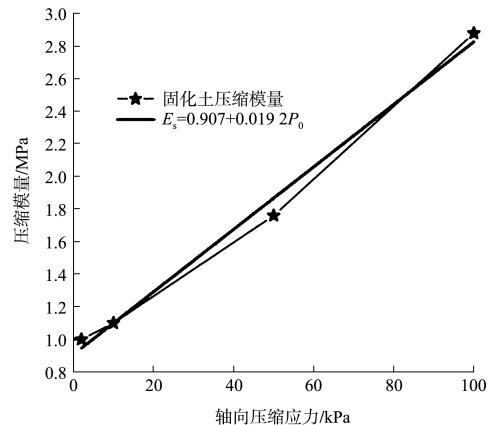


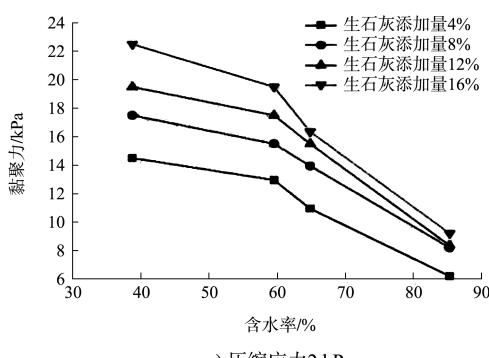
图 6 固化土压缩模量随压缩应力变化关系

$$E_s = 0.907 + 0.0192P_0 \quad (3)$$

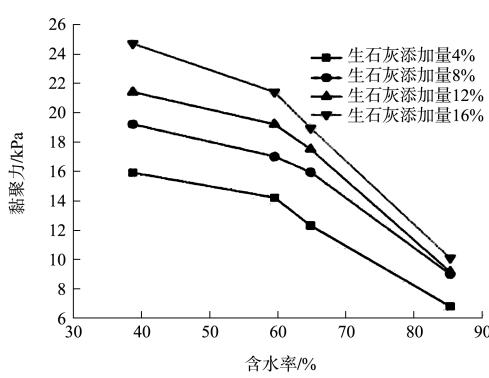
式中:  $P_0$  为试样轴向压缩应力 (kPa);  $E_s$  为固化土压缩模量 (MPa)。

## 2.2 含水率对不排水抗剪强度的影响

对图 7 给出的淤泥土黏聚力数据进行分析, 以含水率  $W=38.7\%$ 、生石灰添加量为 4% 为例, 发现土体黏聚力随着淤泥含水率的增加而呈降低趋势; 同时, 黏聚力随着生石灰固化添加剂的增加而增大; 轴向受压土体的黏聚力随着压缩应力的增大而提高。



a) 压缩应力 2 kPa



b) 压缩应力 10 kPa

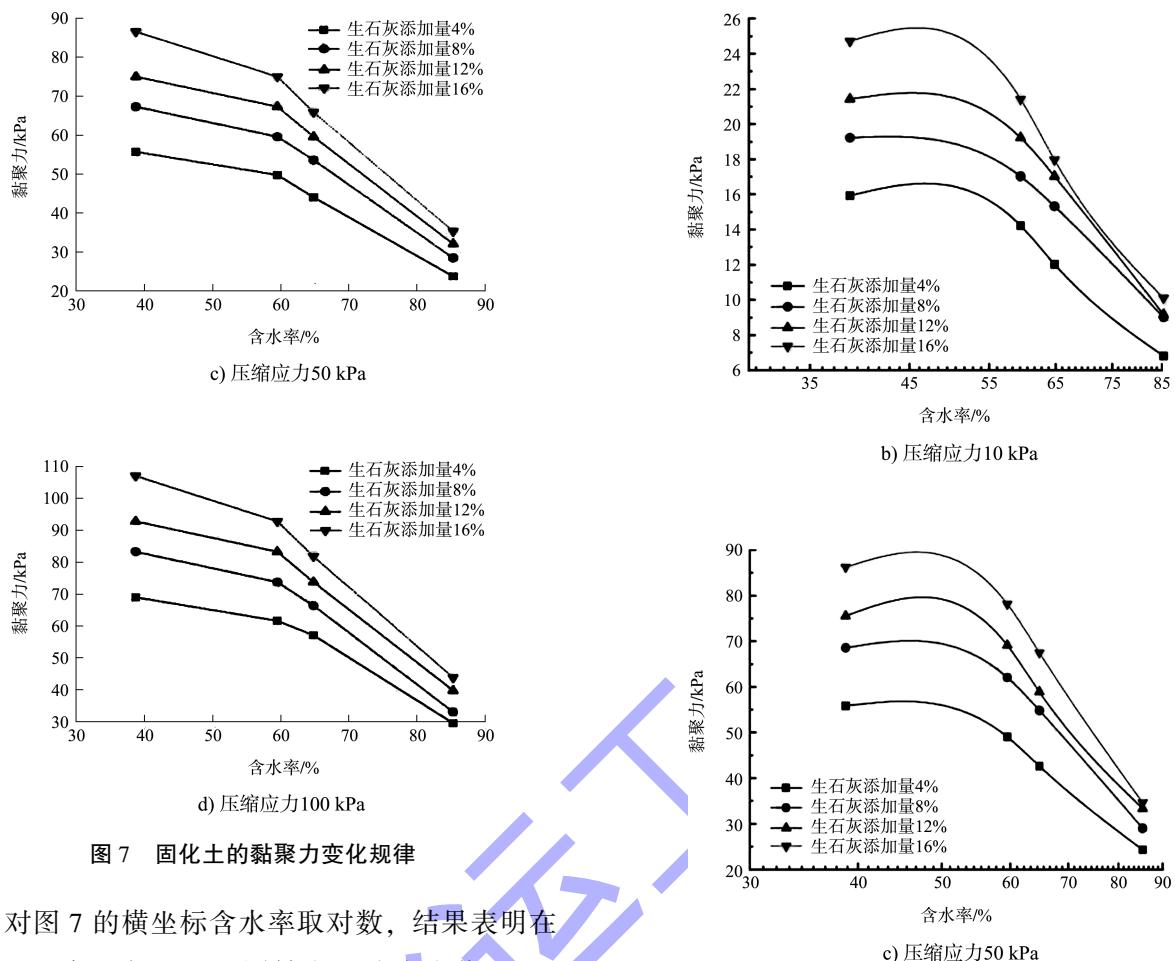


图 7 固化土的黏聚力变化规律

对图 7 的横坐标含水率取对数, 结果表明在不同生石灰添加量、不同轴向压缩应力作用下, 当淤泥含水率高于 60% 时黏聚力呈直线衰减; 当淤泥含水率低于 60% 时, 黏聚力的提高随着含水率的降低呈现曲线变化; 接近最优含水率 ( $\approx 50\%$ ) 时, 淤泥黏聚力强度提升最快(图 8)。

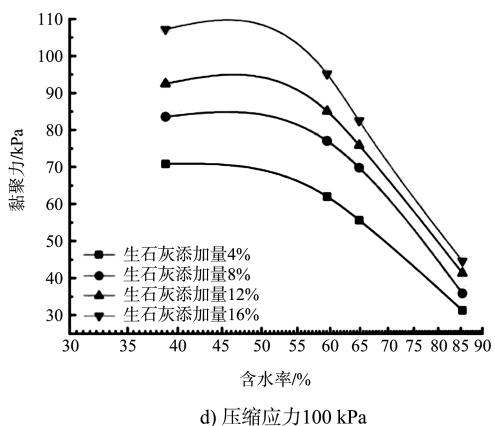
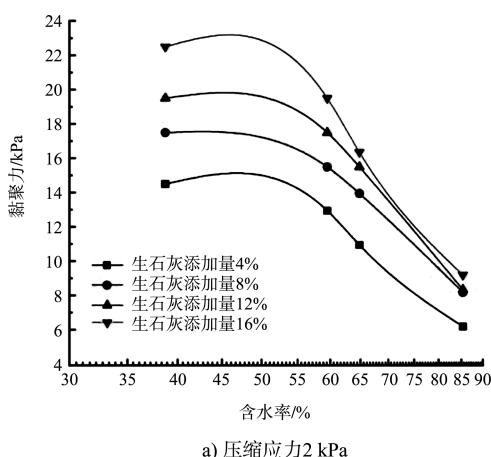


图 8 对数坐标情况下黏聚力变化规律

基于图 7 试验数据, 给出含水率  $W = 38.7\%$ 、生石灰添加量为 4% 的情况下, 疏浚土料的黏聚力  $c$  随轴向压应力的变化规律表达式:



$$c = 4.78 - \frac{3.78}{1 + \left(\frac{P_0}{36}\right)^3} \quad (4)$$

式中:  $P_0$  为试样轴向压缩应力 (kPa)。式(4)与试验结果对比关系见图 9。

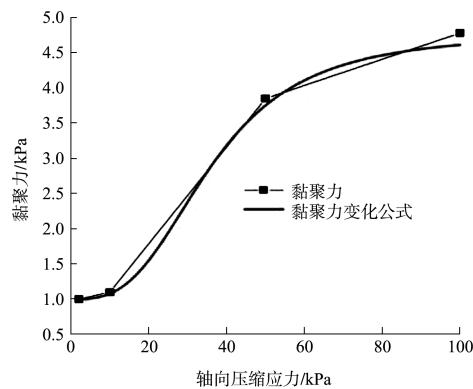
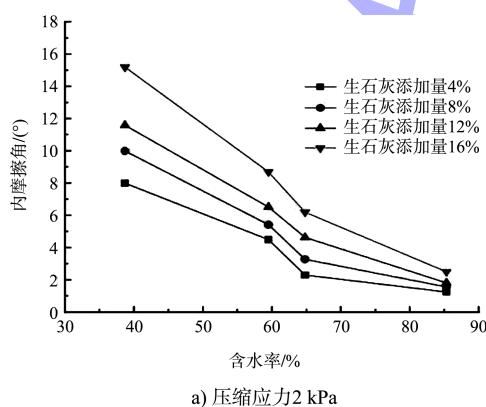
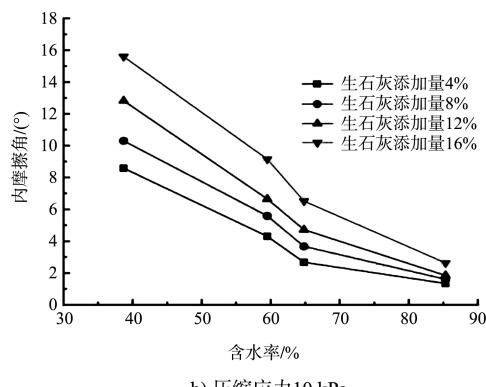


图 9 固化土黏聚力随压缩应力变化规律

以含水率  $W = 38.7\%$ 、生石灰添加量为 4% 为例, 对淤泥土内摩擦角数据进行分析, 发现土体内摩擦角随着淤泥含水率的增加而呈降低趋势; 同时, 内摩擦角随着生石灰固化添加剂的增加而增大; 轴向受压土体的内摩擦角随着压缩应力的增大而增大(图 10)。



a) 压缩应力 2 kPa



b) 压缩应力 10 kPa

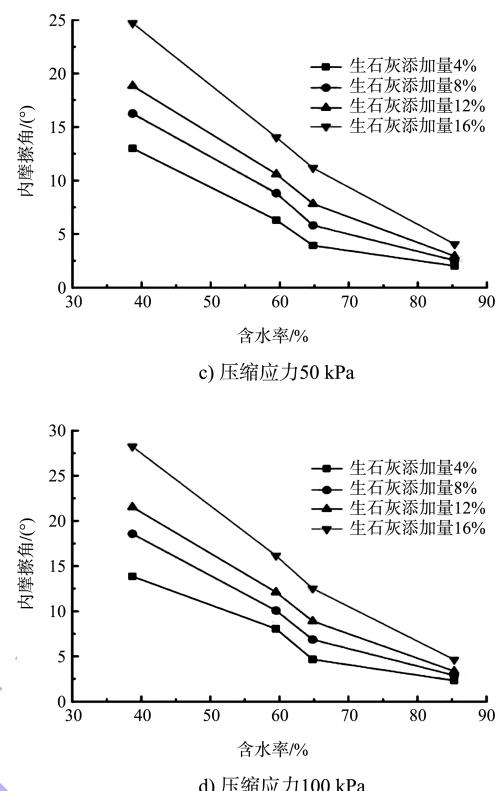


图 10 内摩擦角变化规律

基于图 10 所示试验数据, 给出含水率  $W = 38.7\%$ 、生石灰添加量为 4% 情况下, 疏浚土的内摩擦角  $\varphi$  随轴向压应力的变化规律表达式:

$$\varphi = 0.85 P_0^{0.167} \quad (5)$$

式中:  $P_0$  为试样轴向压缩应力 (kPa)。公式(5)与试验结果对比关系见图 11。

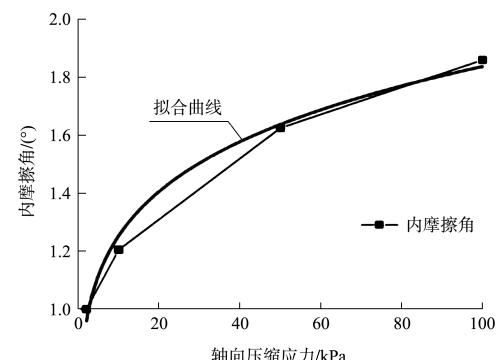


图 11 固化土摩擦角随轴向压缩应力变化规律

### 3 结论

1) 内河航道淤泥试样的密度、孔隙比、液限、塑限、液性指数、塑性指数等物理参数随着淤泥含水率的增加而降低; 添加生石灰固化剂能够明显改良淤泥土的物理参数。

2) 疏浚过程中的淤泥固化土在外部压缩应力作用下, 土体的压缩模量、黏聚力、内摩擦角得到一定程度的提高。实际工程中, 建议增大固化土的轴向压缩应力来提高土体强度。

3) 针对固化淤泥土的物理力学参数, 本文给出的经验公式能够较好地模拟京杭运河施桥船闸至长江口门段的淤泥试样试验数据, 反映轴向压缩应力对固化土样物理力学参数的影响。

## 参考文献:

- [1] 朱伟, 冯志超, 张春雷, 等. 疏浚泥固化处理进行填海工程的现场试验研究[J]. 中国港湾建设, 2005(5): 32-35.
- [2] GHOBADI M H, ABDILOR Y, BABA ZADEH R. Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters[J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2014, 73(2): 611-619.
- [3] HORPIBULSUK S, PHETCHUAY C, CHINKULKIJNIWAT A. Soil stabilization by calcium carbide residue and fly ash[J]. Journal of materials in civil engineering, 2012, 24(2): 184-193.

(上接第 10 页)

## 参考文献:

- [1] 吴松华, 严文晗. 不同形式电掺加固吹填淤泥现场试验研究[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(5): 108-112.
- [2] 梁冰, 高红梅, 兰永伟. 岩石渗透率与温度关系的理论分析和试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(12): 2009-2012.
- [3] 刘飞禹, 张乐, 王军, 等. 外荷载变电压作用下软黏土电渗固结试验研究[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2014, 20(2): 228-238.
- [4] PENG J, XIONG X, MAHFOUZ A H, et al. Vacuum preloading combined electro-osmotic strengthening of ultra-soft soil [J].

- [4] LASHEEN M R, ASHMAWY A M, IBRAHIM H S, et al. Pozzolanic-based materials for stabilization/solidification of contaminated sludge with hazardous heavy metal: case study[J]. Desalination & water treatment, 2013, 51(13-15): 2644-2655.
- [5] CERBO A A V, BALLESTEROS F, CHEN T C, et al. Solidification/stabilization of fly ash from city refuse incinerator facility and heavy metal sludge with cement additives[J]. Environmental science and pollution research, 2017, 24(2): 1748-1756.
- [6] SIVAPULLAIAH P V, KANTHA H L, KIRAN K M. Geotechnical properties of stabilised Indian red earth[J]. Geotechnical and geological engineering, 2003, 21(4): 399-413.
- [7] SAHU V, SRIVASTAVA A, MISRA A K, et al. Stabilization of fly ash and lime sludge composites: assessment of its performance as base course material[J]. Archives of civil and mechanical engineering, 2016, 17(3): 475-485.
- [8] 邓东升, 张铁军, 洪振舜. 河道疏浚废弃淤泥改良土的强度变化规律探讨[J]. 防灾减灾工程学报, 2008(2): 167-170.

(本文编辑 郭雪珍)

Journal of Central South University, 2013, 20(11): 3282-3295.

- [5] GOPALAKRISHNAN S, MUJUMADAR A S, WEBER M E, et al. Electrokinetically enhanced vacuum dewatering of mineral slurries [J]. Filtration and separation, 1996, 33(10): 929-932.
- [6] KANIRAJ R S, HUONG H L, YEE J H S. Electroosmotic consolidation studies on peat and clayey silt using electric vertical drain [J]. Geotechnical and geological engineering, 2011, 29(3): 277-295.

(本文编辑 王传瑜)