

海洋疏浚泥固化处理土基本力学性质研究

朱 伟^{1,2}, 张春雷^{1,2}, 高玉峰², 范昭平²

(1. 河海大学 环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘 要: 针对海洋疏浚泥传统抛填中产生的环境污染问题, 提出将疏浚泥进行固化处理后转化为土材料进行使用的方法, 并对疏浚泥固化后作为土材料的基本力学性质进行了试验. 通过对大亚湾海洋疏浚泥不同水泥掺加量和龄期的各种试验, 得到了固化土的无侧限抗压强度与水泥掺加量之间的线性关系, 明确了固化土破坏应变随水泥掺加量呈乘幂减小的规律, 并对固化系数和最小水泥掺加量等参数的物理意义进行了分析, 给出了简单的推求公式. 结果表明, 淤泥经固化处理后能够满足作为普通填方土材料的需要, 而且可以根据工程的需要设计出经济合理的固化方法, 为实际工程的应用奠定了基础.

关键词: 疏浚泥; 固化土; 力学性质; 固化系数; 最低添加量

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1008-973X(2005)10-1561-05

Fundamental mechanical properties of solidified dredged marine sediment

ZHU Wei^{1,2}, ZHANG Chun-lei^{1,2}, GAO Yu-feng², FAN Zhao-ping²

(1. College of Environmental Science and Technology, Hehai University, Nanjing 210098, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Hehai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to minimize the environmental pollution created by the traditional disposal methods of dredged marine sediments, a method was proposed to solidify the dredged sediments for beneficial use. The basic mechanical behavior of the solidified dredged sediments was studied. A testing program was conducted on a dredged marine sediment taken from Dayawan, which consisted of tests on specimens prepared at different cement contents and curing times. The test results show that the unconfined compressive strength increases linearly with the cement content and the failure strain reduces with the cement content by following a power function. The physical meanings of parameters, such as solidification coefficient and minimum cement content were also discussed. The results showed that the solidified dredged sediment can be used as a fill material. An economized solidification method developed from this theory can provide basis for future engineering application.

Key words: dredged sediment, ; solidified dredged sediment, ; mechanical property, ; solidification coefficient, ; minimum cement content

疏浚泥是一种港口维护、海岸工程中大量产生的高含水率废物, 通常对其作抛弃处理, 抛泥处理由于易对海洋环境造成很大的破坏作用, 已经越来越多的受到各方面的限制. 固化方法是一种有效的疏浚泥资源化处理方法^[1], 将疏浚淤泥通过固化处理转化为土工材料, 不仅可以解决淤泥废弃对环境的

危害问题, 还可以将淤泥固化处理产生的土(淤泥固化土)用于道路、堤防、填海工程的填土材料, 又可产生新的土工再生资源, 对于社会的可持续发展具有重要意义.

疏浚泥固化技术已在海外开展了一些研究和应用^[2,3], 目前在国内的研究正处于起步阶段. 由于经

收稿日期: 2004-08-20.

浙江大学学报(工学版)网址: www.journals.zju.edu.cn/eng

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50379011); 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2003AA601100).

作者简介: 朱伟(1962-), 男, 甘肃平凉人, 教授, 从事岩土工程及环境工程方面的教学和科研工作. E-mail: weizhu@jonline.com.

济发达的原因,国外的淤泥固化技术对水泥掺加量和目标强度值都设置的很高,因此工程造价较高.从我国国情出发,想要发展淤泥的再生资源利用技术,必须探讨低价格的淤泥固化技术,这就需要更加注重于在固化材料低掺加量条件下固化土的力学性质的研究,在满足工程应用的最低目标强度条件下,考虑到最低造价情况,明确在低水泥掺加量时固化土的强度发生规律以及变形规律,这对于淤泥固化再生资源利用技术在我国的推广有着重要的意义.为此,本研究从应用性出发,研究低水泥掺加量条件下淤泥固化土在单轴作用下的基本强度和变形规律,并对其影响因素进行了系统的研究和分析,为淤泥固化技术的推广应用提供一定的经验积累.

1 试验材料与方法

1.1 试验用料

试验用的固化材料水泥为南京江南水泥厂生产的钟山牌 32.5# 普通硅酸盐水泥,水泥安定性和胶砂强度合格.

试验所用的疏浚泥为高液限黏土,取自深圳大亚湾石油化学工业区,通过抓斗式疏浚船在海上取泥,取泥后置入塑料袋内密封,放入塑料箱内用水封存.淤泥中含有贝壳碎屑等杂质,黏粒(粒径 < 0.005 mm)质量分数达到 40%,为典型的海相沉积淤泥.其物理性质指标见表 1.

表 1 试验淤泥物理性质指标

Tab. 1 Physical properties of dredged sediment sample

/ %	/ (kN · m ⁻²)	G _s	e	w _L / %	w _P / %	有机质 / %
120	13.82	2.74	3.28	73.4	29.3	1.39

注: 为含水率; 为容重; G_s 为比重; e 为空隙比; w_L 为液限; w_P 为塑型, 17 mm; 灼烧法 (800)

1.2 试验方法

固化土与水泥土都是改性土,二者的基本固化原理相同.由于改性土在力学性质上一般存在小变形条件下发生剪切破坏的特征,在工程应用中固化土体的破坏问题是制约因子.因此国内外在这类土材料的研究中大多采用无侧限抗压试验,以无侧限抗压强度指标来判断固化的效果.

试验前由于淤泥中含有贝壳碎屑等杂质,为保证试验精度,将淤泥通过 1 mm 滤网将杂质滤出.水泥与淤泥经机械强制拌和 5 min 后,装入模具振动密实,置入标准养护箱中养护(温度 (20 ± 2), 湿度 > 90%),养护 24 h 脱模,脱模后再养护至设计龄期进行无侧限抗压强度试验,试样为直径 5 cm、高 10 cm 的柱状样.

试验中通过调整水泥的掺加量,在不同的养护龄期下,研究无侧限抗压强度和破坏应变的变化规律.养护龄期取 7、14、21 和 28 d.对每个水泥掺加量和龄期,制作 3 个试样进行平行试验,取其平均值作为最后的强度和变形.

2 试验结果及分析

固化土的无侧限抗压强度 q_u 和破坏应变 ϵ_f 试验结果汇总在表 2,下面对表中的试验数据进行分析总结.

2.1 淤泥固化土的强度规律

2.1.1 水泥掺加量与强度的关系 对表 2 中水泥掺加量与强度的关系进行分析,可以得到二者的关系如图 1 所示,从图中可以看出,在工程应用中,可以用式 (1) 来表示水泥掺加量与固化土强度的关系,各个龄期时的相关度都在 0.97 以上.

$$q_u = k(ac - a_0). \quad (1)$$

式中: a_c 为水泥掺加量; k 为水泥固化系数,反映出

表 2 淤泥固化土强度试验结果

Tab. 2 Unconfined compression test results of solidified dredged sediment

ac / kg	q_u / kPa				ϵ_f / %			
	7d	14d	21d	28d	7d	14d	21d	28d
25	13.4	17.3	19.0	22.5	2.0	1.9	1.8	1.8
40	58.9	65.0	75.4	85.5	1.6	1.5	1.4	1.4
50	101.4	130.2	140.1	166.8	1.5	1.4	1.2	1.2
75	133.9	180.4	200.0	236.4	0.8	1.0	0.9	0.6
100	265.3	320.2	420.2	519.3	0.8	0.8	0.6	0.3
125	307.4	402.1	520.3	593.7	0.8	0.6	0.5	0.4
150	335.2	450.5	580.1	696.4	0.7	0.5	0.3	0.2
175	365.6	550.4	740.5	841.8	0.6	0.4	0.3	0.3
200	431.7	650.1	810.2	905.5	0.6	0.4	0.3	0.3

注: a_c 以每 m³ 淤泥中的掺加量计.

水泥固化的效果好坏; a_0 为最低水泥掺加量,当水泥掺加量低于 a_0 时,固化土几乎没有强度. 根据这个关系,对于一种淤泥和水泥只要进行几组配比试验,确定出 k 和 a_0 ,就可以按照式(1),根据工程的强度要求来设计水泥的掺加量,或者根据加入的水泥量来计算将会达到的强度. 下面对参数 k 和 a_0 进行深入的讨论.

1) 水泥固化系数 k 是一个反应水泥固化效果的指标, k 越大表明水泥的固化效果越好. 从图 1 中可以看出 k 值随龄期的增加而增加,与水泥的硬化类似,固化土的前期强度增长较快,到后期增长趋缓,因而 k 与龄期 t 的关系可以用乘幂关系来表示(式 2),相关度达到 0.99(图 2). 根据式(2)可以很方便地确定出某个龄期的 k 值.

$$k = 0.77t^{0.58} \quad (2)$$

k 除了受龄期影响外,还可能会受到淤泥和水泥性质的影响,因此在实际应用中要针对不同的淤泥和水泥进行配比试验,才可确定出符合实际的参数.

2) 最低水泥掺加量 a_0 . 从图 1 中可以看出,当水泥掺加量小于 a_0 时,固化土几乎没有强度. 这里需要说明的是,对于本试验所用的淤泥容重为 13.82 kN/m^3 ,要制成高 h 为 10 cm 的圆柱状试样,使试样在自重作用下能够站立的强度值为 $q_u = h =$

1.382 kPa. 也就是说,当掺加的水泥量小于 a_0 时,对原泥的性质尽管有所改善,但固化土所形成的强度还不足以制成试样进行试验,因此 a_0 可以认为是一个体现了强度初始值的量. 对于本研究中所用的淤泥最低水泥掺加量为 20 kg.

从图 1 中的数值可以看出:对于不同的龄期, a_0 的值变化不大,据此可以认为,对于同种淤泥, a_0 基本不受龄期的影响. 与 k 同样,当淤泥和水泥种类改变时,能够制成试样所需要的最低水泥掺加量也会不同.

对于本研究,将 $a_0 = 20 \text{ kg}$ 和式(2)代入式(1),可得到强度计算公式(式(3)). 利用该公式可以很方便地推求在某个龄期和水泥量的固化土无侧限抗压强度.

$$q_u = 0.77t^{0.58} (a_c - 20) \quad (3)$$

2.1.2 龄期与强度的关系 对表 2 中的数据进行分析,可以作出强度随龄期的变化曲线如图 3 所示. 从图中可以看出,对于不同的 a_c ,强度随龄期的增长不是呈线性变化,而是增长速率在减缓;对于不同的水泥掺加量,强度随龄期的变化也不相同,当水泥掺加量低于 75 kg 时,固化土的强度随龄期的增长速率较小,而当水泥掺加量高于 100 kg 时,强度随龄期的增加呈现出较大的增长速率. 以强度比 q_{u28d}/q_{u7d} 来表示强度的增长速率,在 75 kg 以下, $q_{u28d}/q_{u7d} = (1.4 \sim 1.8)$; 在 100 kg 以上, $q_{u28d}/q_{u7d} = (1.9 \sim 2.3)$,表明固化土的 28 d 强度比 7 d 强度可以提高 1.4 ~ 2.3 倍.

本文只研究 28 d 龄期以内的强度变化规律. 从图 3 中可以看出,7 d 可以达到 28 d 强度的一半以上,固化土的强度在 28 d 以后还有一定的增长趋势. 从式(3)可以计算出固化土的 90 d 强度约为 28 d 强度的 2 倍. 根据《地基处理手册》^[4]的经验总结,水泥石的 90 d 无侧限抗压强度约为 28 d 强度的 2 倍左右,可见对于淤泥进行固化处理,与水泥石有相似的规律,固化土的强度在短期也可以达到一定值,

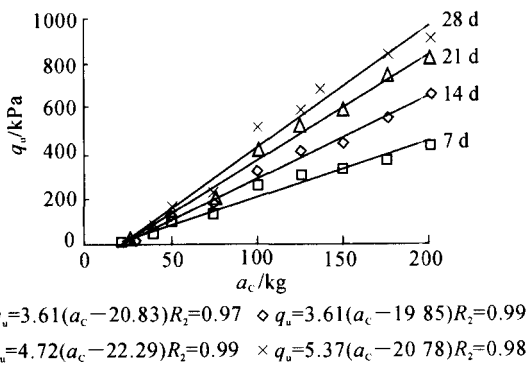


图 1 固化土抗压强度与水泥掺加量的关系

Fig. 1 Relationship between unconfined compression strength and cement content

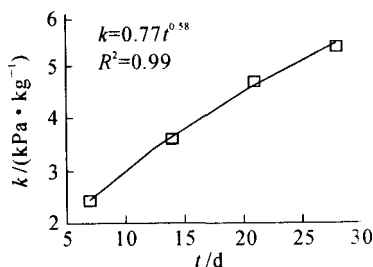


图 2 水泥固化系数与龄期的关系

Fig. 2 Relationship between cement solidification efficient and curing time

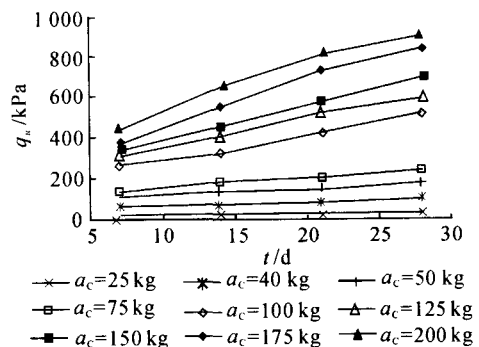


图 3 固化土抗压强度与龄期的关系

Fig. 3 Relationship between unconfined compression strength and curing time

这对于淤泥固化土处理后的填筑施工和填筑地基的快速投入使用非常有利。

2.2 淤泥固化土的变形规律

固化土的破坏形式和破坏应变 ϵ_r 的大小是固化土在应用中必须考虑的问题。固化土破坏时是塑性,破坏变形的大小直接影响到其固化土在填土工程中的使用。

2.2.1 固化土应力-应变曲线变化规律 根据无侧限抗压强度试验的结果,固化土应力-应变($\sigma-\epsilon$)曲线随水泥掺加量的变化如图4所示, $\sigma-\epsilon$ 曲线随龄期的变化如图5所示。对图4、5中 $\sigma-\epsilon$ 曲线的特征进行分析可以看出:1)当水泥掺加量为25 kg时,与最低水泥掺加量20 kg接近,固化土表现出理想弹塑性的特性。2)当水泥掺加量在75~100 kg时,固化土的变形形式发生了一个很明显的转折,由塑性破坏转为脆性破坏。这一变化可以从固化土的结构性进行解释,在水泥水化过程中,产生的生成物将土颗粒胶结起来形成骨架,当水泥掺加量较小时(< 75 kg),骨架强度比较小而且没有形成整体的结构性,在外力作用下骨架从受力点处开始破坏并传递下去,宏观上表现出强度低变形大的塑性特点;当水泥掺加量较大时(> 75 kg),土体中的骨架强度比较高而且形成了整体,在破坏时可以共同受力,在宏观上表现出强度高而变形小的脆性特性。因此,在水泥掺加量为75~100 kg存在着一个固化土整体结构性形成的转折点。这一点与图3中的强度变化相对应,在75~100 kg间强度也产生了一个跳跃。3)从图5可以看出,随着龄期的增加,固化土的 $\sigma-\epsilon$ 曲线也由强度低、变形大的塑性状态向强度高、变形小的脆性状态转化,从前面土的结构性转化也可以解释这一点,表明在某个龄期中,固化土也存在着一个整体结构形成的转折点。

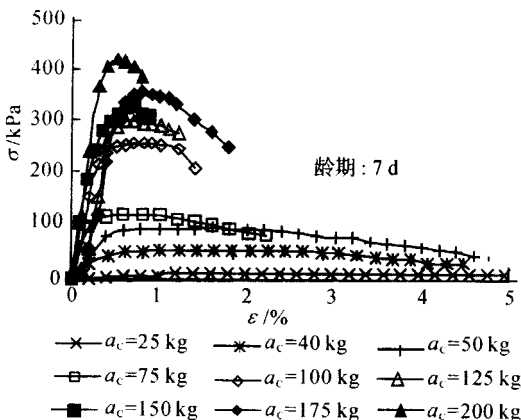


图4 $\sigma-\epsilon$ 关系曲线随水泥添加量的变化

Fig. 4 Stress-strain curves of different cement content

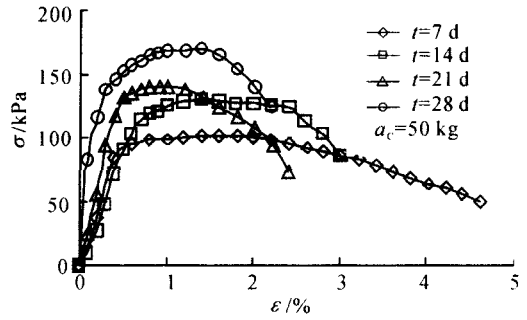


图5 $\sigma-\epsilon$ 关系曲线随龄期的变化

Fig. 5 Stress-strain curves of different curing time

2.2.2 固化土破坏应变的变化规律 固化土的变形介于原泥和纯水泥试块的变形之间,对于原泥呈流态,其变形可以认为很大,而水泥试块的变形很小,因此对表2中各个龄期的不同水泥掺加量与破坏应变进行分析,可以用乘幂形式(式4)来表示固化土与水泥掺加量的关系(图6),各个龄期时的相关度都在0.93以上。

$$\epsilon_r = A a_c^{-B} \tag{4}$$

式中: ϵ_r 为破坏应变, A 、 B 可以定义为变形系数。只要选定几组试验确定出两个参数,就可以很方便地求出在一定水泥掺加量下某个龄期产生的破坏应变。反之,可以根据工程的变形要求,来设计水泥的掺加量,该式也是一个很有实用价值的经验公式。

对图6中 A 、 B 值与龄期 t 的关系进行拟合,二者与龄期的关系以乘幂拟合为最佳,相关度均达到0.99,如图7所示。参数 A 、 B 与龄期的关系式为

$$A = 14.44 t^{0.92} \tag{5}$$

$$B = 0.62 t^{0.37} \tag{6}$$

将式(5)、(6)代入式(4)可得变形随龄期和水泥掺加量的计算式(7),根据该式可以方便地对固化土的变形进行估算:

$$\epsilon_r = A a_c^{-B} = 14.44 t^{0.92} a_c^{-0.62 t^{0.37}} \tag{7}$$

对 A 、 B 进一步分析,二者除了受到龄期的影响外,像 k 和 a_0 一样也会受到淤泥和水泥的影响,水

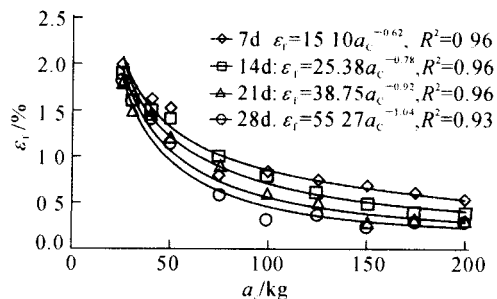


图6 固化土破坏应变与水泥掺加量的关系

Fig. 6 Relationship between failure strain and cement content

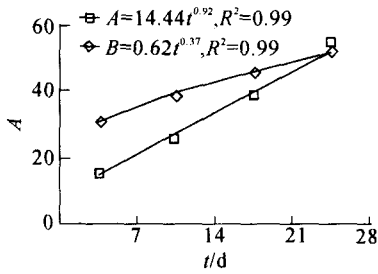


图 7 固化土变形参数与龄期的关系

Fig. 7 Relationship between deformation coefficients and curing time

泥质量越好,标号越高,对于相同的水泥掺加量固化土产生的变形也越小;淤泥的性质越差,含水率越高,则固化土的变形则越大。

2. 2. 3 固化土的压缩变形特性

1) 变形系数 E_{50} 的变化规律. 对于淤泥固化土无侧限抗压试验,变形系数 E_{50} 是常用的反映变形特性的重要指标, E_{50} 被定义为

$$E_{50} = 0.5 / (2 \epsilon) \quad (8)$$

式中: 0.5 是压缩应变为破坏应变 ϵ_f 的一半时对应的应力,因此也可以把 E_{50} 视为此时的割线模量。

根据对无侧限抗压试验中 E_{50} 的分析,变形系数 E_{50} 与抗压强度 q_u 呈正比关系(如图 8),这与文献[5]的 $E_{50} = (100 - 200) q_u$ 相似. 表明随着固化土强度的增加,其变形系数也线性增加。

2) 固化土破坏应变与抗压强度的关系. 根据表 2 中的试验数据,可以得作出 $q_u - \epsilon_f$ 的关系如图 9 所示. 从图中可以看出,固化土的强度与变形呈指数关系递减. 固化土的变形范围为 $0.2\% \sim 2.0\%$. 当强度超过 500 kPa 时,变形小于 0.5% ,这表明当强度较大时,产生的变形很小,此时在工程中主要考虑固化土的强度问题;当强度小于 200 kPa 时,产生的变形在 1% 以上,此时在施工中须考虑变形的影响. 对于固化土的变形一般都在 2% 以下,可以满足一般部位的填筑用土的变形要求,对于地基沉降要求比较高的工程,还需要对填筑土进行地基处理。

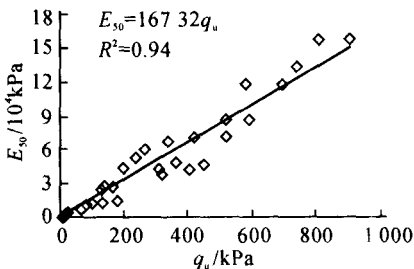


图 8 变形系数与抗压强度的关系

Fig. 8 Relationship between deformation coefficient and unconfined compression strength

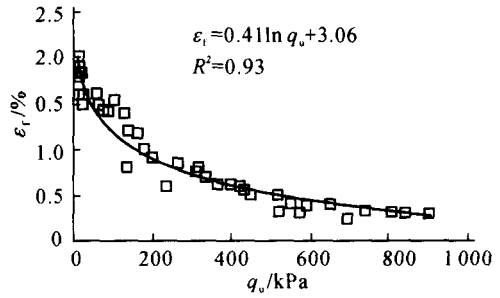


图 9 固化土破坏应变与抗压强度的关系

Fig. 9 Relationship between failure strain and unconfined compression strength

3 结 论

(1) 淤泥固化土当水泥低掺加量时其强度和变形都可以满足一般填筑用土的要求,可以用作道路底基层或海洋、堤防工程的下部填土。

(2) 在一定的水泥掺加量和龄期内,固化土的无侧限抗压强度与水泥掺加量呈线性增加关系,水泥固化系数 k 与龄期 t 呈乘幂关系,最低水泥掺加量 ac 不受龄期影响. 固化土的破坏应变与水泥掺加量呈乘幂关系,变形系数 A 、 B 与龄期 t 均呈乘幂关系。

(3) 固化土的应力应变关系随水泥掺加量的增加和龄期的增加由塑性向脆性转化,在水泥掺加量和龄期上存在着一个骨架整体结构形成的转折点。

(4) 在实际应用中,只需选定几个水泥掺加量和龄期进行试验,即可确定出水泥固化系数 k 、最低水泥掺加量 ac 以及变形参数 A 、 B ,用以指导固化土的设计和施工。

参考文献(References):

[1] 朱伟,张春雷,刘汉龙,等. 疏浚泥处理再生资源技术的现状[J]. 环境科学与技术, 2002, 25(4): 39 - 41.
 ZHU Wei, ZHANG Chun-lei, LIU Han-long, et al. The status of dredged spoils utilization [J]. **Environmental Science and Technology**, 2002, 25(4): 39 - 41.

[2] TANG Yr-xin, MIYAAKI Y, TSUCHID T. Practices of reused dredgings by cement treatment [J]. **Soils and Foundations**, 2001, 41(5): 129 - 143.

[3] TREMBLAY H, LEROUCEL S, LOCAT J. Stabilization of clayey soils from eastern Canada at high water contents [A]. **Proceedings of the 3rd International Congress on Environmental Geotechnics** [C]. Netherland: A A Balkema Publishers, 1998: 337 - 340.

[4] 《地基处理手册》编写委员会. 地基处理手册 [M]. 第 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.

[5] 汤怡新,刘汉龙,朱伟,水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 549 - 554.
 TANG Yr-xin, LIU Han-long, ZHU Wei. Study on engineering properties of cement-stabilized soil [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(5): 549 - 554.