

# 疏浚泥固化处理进行填海工程的现场试验研究

朱伟<sup>1,2</sup>, 冯志超<sup>2</sup>, 张春雷<sup>1,2</sup>, 谢健<sup>3</sup>

(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;  
3. 国家海洋局南海海洋工程勘察与环境研究院, 广东 广州 510300)

**摘要:** 疏浚泥固化处理后用作填方用土是疏浚泥处理的有效方法, 但在我国还没有在实际工程中应用过。结合我国实际条件, 在现场进行了疏浚泥固化处理的施工、浇筑, 并对填筑地基进行了取样强度试验和原位静力触探试验研究。结果表明固化土的强度随水泥掺加量的增加呈线性增长, 浇筑地基取样的强度比室内制样强度降低10%~50%, 填筑地基的承载力可以满足填海工程地基设计的要求, 疏浚泥固化处理土可以用作填海工程的材料。

**关键词:** 疏浚泥; 再生资源; 固化处理; 填海工程; 现场试验

**中图分类号:** U 654.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-3688(2005)05-0027-04

## Field Experiment of Dredged Spoil Solidified with Cement for Marine Reclamation Works

ZHU Wei<sup>1,2</sup>, FENG Zhichao<sup>2</sup>, ZHANG Chun-lei<sup>1,2</sup>, XIE Jian<sup>3</sup>

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

2. Geotechnical Engineering Institute, Hehai University, Nanjing 210098, China;

3. Institute of Oceanographic Engineering Prospecting & Environmental Research for South China Sea, National Oceanographic Bureau, Guangzhou 510300, China)

**Abstract:** Dredged spoils being treated by solidification method provides an effectual way to convert dredged spoils into useful filling materials. The method has not been used in practical projects in China. The authors carried out an in-situ experiment of dredged spoils stabilized by cement at Yantian Port, Shenzhen, China. The unconfined compression tests and in-situ Static Cone Penetration tests were conducted on the foundation pits filled with stabilized dredged spoils. The unconfined compression strength has a linear relationship with the cement content, the strength of samples taken from the foundation decreased 10%-50% to that of samples made in the laboratory. The bearing capacity of the spoil-filled foundation can meet the demand of port engineering, and dredged spoil solidified with cement may be used as fill material for marine reclamation works.

**Key words:** dredged spoil; reclaimed resources; solidification; ocean filling project; field experiment

### 1 引言

在港口、航道的疏浚过程中, 通常会产生大量的疏浚淤泥。由于数量多, 疏浚泥的处理问题在港口、航道的建设与维护当中显得尤为突出。疏浚工程中产生的疏浚泥通常采用堆放或抛弃的方法, 堆放要占用大量的土地, 而海洋抛泥由于引起的海洋环境污染问题, 已越来越多地受到各方面的限制。另外, 在海洋港口等海岸工程的建设过程中, 通常需要大量的土石方来进行填海造陆。我国沿海港口城市多

位于冲积平原和三角洲地区, 要在当地获得大量的土石方比较困难, 远距离开采运输又不经济。通过对疏浚泥进行固化处理, 改良其高含水率、低强度的性质而成为具有良好工程性质的土加以运用, 是解决以上两个矛盾的较好方法。

将淤泥固化处理后作为填土材料使用的研究在国外较多。也有很多先对疏浚淤泥进行固化处理, 而后用作填筑材料的工程, 如日本伏木富山港疏浚填海工程、新加坡“长基”国际机场第二跑道工程等。在我国已经开展了较多的室内试验研究, 但还没有工程应用的实例。固化方法在国外已有大型的成套处理设备, 由于国情不同, 国外处理的目标强度设置较高, 因而固化材料的掺加量多, 在处理成本上难以为我国所接受。

收稿日期: 2005-05-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50379011)

作者简介: 朱伟 (1962-), 男, 教授, 主要从事岩土工程及环境工程方面的教学和科研工作。

本文结合我国现有的施工机械条件和固化材料, 基于国家自然科学基金项目和国家计委高新技术发展项目《疏浚泥(粉煤灰)综合利用技术》前期室内研究的成果, 在深圳盐田港区进行疏浚泥固化处理的搅拌和地基填筑施工, 并对固化土填筑地基的强度、承载力等进行现场试验。通过现场试验明确现场与室内条件下固化淤泥强度的关系、现场填筑地基的承载力特性等, 并对疏浚泥固化处理的施工工艺和施工中存在的问题进行了分析, 希望能够为这一技术的推广应用提供现场的经验。

## 2 现场试验和监测方法

### 2.1 现场试验

试验场地位于深圳盐田港中港区三期工程 10 号纳泥塘的北部, 10 号纳泥塘是从四周向中间挤淤而来, 淤泥厚达 14 m。在塘的周围为工程性质良好的土石填土。试验区位于 10 号塘边上, 在填土地上挖出 3 个 200 m<sup>3</sup> 的基坑, 基坑为边长 10 m 的正方形, 深 2 m。试验场地平面布置如图 1, 剖面示意图图 2。纳泥塘表层经过 1 年多的风干, 形成约 50 cm 的硬壳表层, 人可以在上面行走, 表层下面为流动状态的淤泥, 试验中用挖掘机挖取流态的淤泥进行搅拌。由于试验条件限制, 搅拌设备采用反转出料式混凝土搅拌机, 将淤泥和固化材料水泥按设计配比投入搅拌机进行搅拌, 搅拌时间为 1 min, 搅拌完成后直接倒入基坑。在搅拌过程中由于淤泥粘性较大, 搅拌机无法出料, 需要在料斗内按一定量加入海水以保证顺利出料。

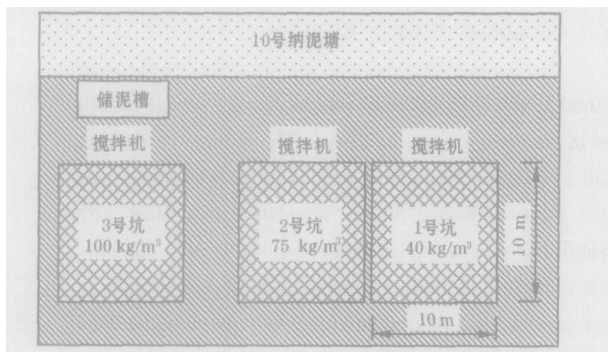


图 1 试验场地平面布置

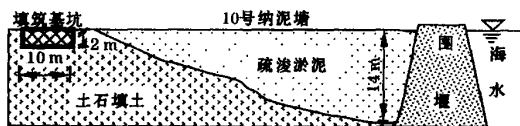


图 2 试验场地剖面示意图

固化材料使用广州市水电局水泥厂生产的“穗电牌” 32.5 号普通硅酸盐水泥。3 个基坑水泥掺入量分别为 40 kg/m<sup>3</sup>、75 kg/m<sup>3</sup>、100 kg/m<sup>3</sup> (如图 1)。淤泥基本物理性质指标如表 1 所示。

### 2.2 监测方法

对填筑地基的强度和承载力的测定采用无侧限抗压强度试验和静力触探试验方法, 测定龄期为 7 d 和 28 d。

#### (1) 无侧限抗压强度试验

表 1 淤泥基本物理性质指标

土样名称	含水率 (%)	液限 (%)	塑限 (%)	相对密度	重度 (kN/m <sup>3</sup> )	空隙比	粘粒含量 (%)
高液限粘土	89	60	31	2.67	14.5	2.38	40.6

试样的制取有两种方式: 一种是从搅拌机中取刚搅拌好的泥分层装入模具, 边装边振实, 制样后静置 24 h 脱模, 脱模后试样以塑料袋封装, 养护温度同室温 32 左右; 另一种是在预定龄期, 挖开填筑地基到不同深度挖取泥块, 用削土器削制成与用模具制样相同尺寸的试样, 称为取样。试样都是直径 3.91 cm、高 8.0 cm 的柱状样, 制样和取样在相同龄期拿到室内进行无侧限抗压强度试验。

#### (2) 静力触探试验

在浇筑后的 7 d 和 28 d 龄期对填筑地基做静力触探试验, 每个龄期每个坑分别测 3 个点。使用 SF-100 型静力触探仪, 探头为截面 15 cm<sup>2</sup>、锥角 60 的双桥探头。

### 3 现场固化淤泥的强度特征

疏浚泥固化土的厚度为 2 m, 且土质比较均匀, 所以不再进行土的分层。每一个静力触探孔都可以绘制一组阻力曲线图 (如图 3), 通过曲线可以计算每一分层静探参数的平均值, 在此, 土层只划分为一层, 所得参数也就只有一组。计算表中静探参数平均值时, 应扣除上部滞后深度和下部滞后深度范围的参数, 再取常数段值 (如图 3 虚线所割段), 并且剔除特殊大值。下面对表中的试验数据进行分析。

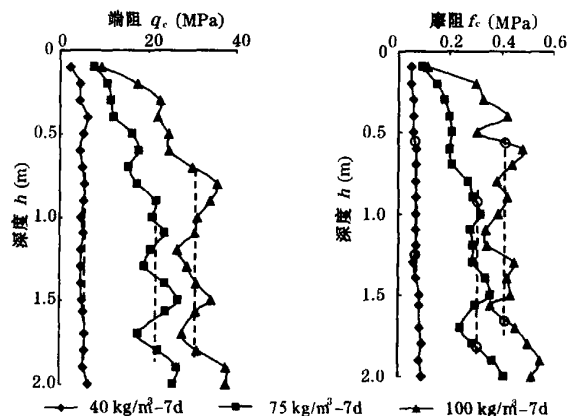


图 3 静力触探曲线

#### 3.1 水泥掺入量对无侧限抗压强度的影响

不同水泥掺入量下, 室内制样与现场取样所得试样的无侧限抗压强度随水泥添加量的变化关系如图 4 所示。

在前期室内研究中<sup>[1]</sup>, 发现固化土的无侧限抗压强度随水泥添加量的关系可以用式 (1) 表示:

$$q_u = k(a_c - a_0) \tag{1}$$

式中:  $k$  为水泥固化系数, kPa·m<sup>3</sup>/kg;  $a_c$  为水泥掺入量, kg/m<sup>3</sup>;  $a_0$  为最低水泥掺入量, kg/m<sup>3</sup>。它们受淤泥粘粒含量、矿物成分、含水率、有机质含量、水泥标号等因素影响。 $k$  随龄期的增加而增加,  $k$  值随龄期增加越大说明强度随龄期的增加越大。 $a_0$  值随龄期变化很小, 说明当水泥添加量小于最低掺入量时固化淤泥的强度不会随着龄期的增加而有明显的提高。随着龄期的增加固化土的强度都在增加, 28 d

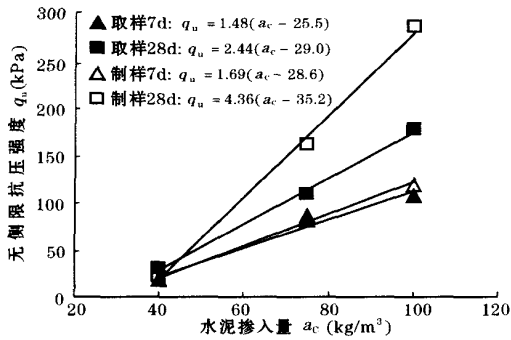


图 4 现场固化土强度与水泥掺入量的关系

强度比 7 d 天强度增加幅度在 1.23~ 2.41 倍之间。现场试验用普通混凝土搅拌机来进行搅拌混合, 难以保证材料与淤泥的混合均匀, 而在室内使用小型的搅拌装置, 固化材料与淤泥混合质量较好。现场试验和室内试验所得规律相同<sup>[1]</sup>, 但现场试验所得  $k$  明显小于室内试验所得, 说明搅拌方式对施工质量有一定影响。

3.2 室内制样与现场取样强度的关系

从图 4 可以看出, 同一龄期室内制样的强度均高于地基取样的强度, 取样强度比制样的强度降低约为 10% ~ 50%, 这表明由室内试验强度值来设计实际填土工程中的强度时应该考虑到一定的折减, 视淤泥的流动状态和填筑方式而定。室内制样与地基取样的强度差异是由于填筑方式的不同造成的, 在用模具室内制样过程中, 土样是分层装入, 而且还分层振实以排出空气, 因而填充密实。而在现场浇筑情况下, 固化淤泥由于流动性较差, 难以填充空隙, 因而会引起强度的降低。因此在现场施工的时候, 要保证固化后的淤泥仍具有一定的流动性, 这样可以提高密实性, 对填筑地基的强度有利。

3.3 填筑地基静力触探参数变化特征

静力触探参数  $q_c$  和  $f_s$  是反映地基承载力的参数, 未经处理淤泥的液性指数为 2.6, 呈流态, 随着水泥掺入量的增加,  $q_c$  和  $f_s$  都明显增加 (如图 5, 图 6 所示), 表明地基承载力有了明显提高。另外, 二者随龄期的变化不相同,  $q_c$  在 7 d 时的值与 28 d 接近,  $f_s$  在 28 d 时明显高于 7 d。

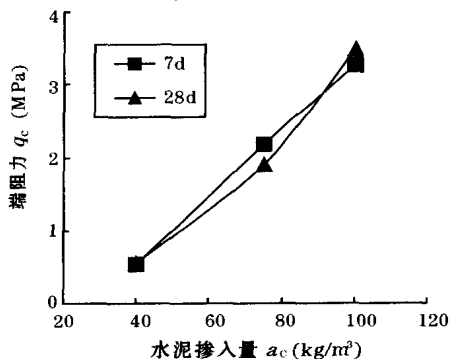


图 5 端阻力与水泥掺入量的关系

4 地基承载力的计算

根据静力触探试验资料确定地基的承载力, 主要依据

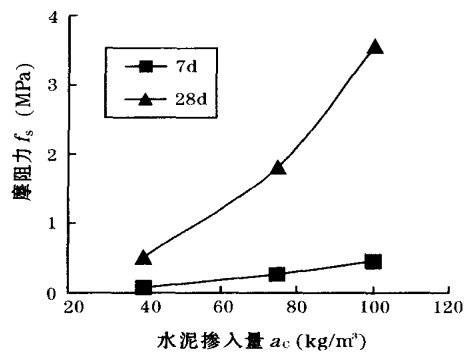


图 6 摩阻力与水泥掺入量的关系

的是经验关系。经验关系的取得是在大量试验资料的基础上, 通过将静力触探试验成果与载荷试验成果比较, 进行相关分析得到的特定地区或特定土性的经验公式。对于固化处理土目前还没有相关的经验关系, 而且固化土属于水泥改性土又难以进行土质的划分。根据前人的研究, 固化土在力学性质上和老粘土相似, 因而借鉴较硬粘土的经验公式, 首先将双桥探头测得的数据按式  $P_s = 0.11 + 1.13 q_c$  进行换算, 可得到单桥探头的比贯入阻力值  $P_s$ , 根据  $P_s$  按经验公式  $f_{0.1} = 0.1 P_s$  计算出的地基的承载力基本值如表 2 所示。

表 2 承载力基本值计算结果

龄期	水泥掺加量 (kg/m³)	端阻 $q_c$ (MPa)	摩阻 $f_s$ (MPa)	$P_s$ (MPa)	承载力基本值 $f_{0.1}$ (kPa)
7 d	40	5.37	0.07	6.17	617
	75	21.66	0.27	24.58	2 458
	100	32.60	0.45	36.95	3 695
28 d	40	5.45	0.51	6.26	626
	75	18.95	1.81	21.52	2 152
	100	34.83	3.57	39.46	3 946

本试验工程所在地盐田港三期集装箱码头工程场地, 按集装箱堆场重箱堆高五层设计, 工程采用强夯技术对地基进行加固<sup>[2]</sup>。按照设计要求, 地基承载力标准值要求达到 180 kPa。在本固化处理试验工程中, 水泥添加量为 40 kg/m³, 28 d 龄期时地基承载力基本值大于 600 kPa, 标准值也就高于 300 kPa, 远高于盐田港三期工程地基处理所要求达到的数值, 而且缩短了工期。另外, 水泥掺加量 75 kg/m³ 的 2 号坑, 在 6 d 的时候, 挖掘机等重型设备已经可以在上面安全行驶, 那么对于后续工程的施工非常有利。所以固化方法处理疏浚淤泥用作填方材料, 可以达到并超过强夯后地基的承载力要求, 完全可以用作填海工程的填料。

5 现场施工工艺及问题

疏浚泥固化处理用于填海工程, 国内还没有实际经验可以借鉴。从本次现场试验工程经验出发, 疏浚泥固化处理的施工流程如图 7 所示, 主要包括 4 个环节, 即疏浚、解泥、混合、填筑。其中有几点要加以注意: 首先是解泥环节, 在这一环节要调整好淤泥的状态, 使其具有一定的流动性, 既要保证淤泥进入搅拌设备后能与固化材料充分混合, 又不能因为含水率过高而使固化效果不佳; 其次是混合搅拌环节, 在这环节中要控制好淤泥与固化材料的拌和均匀程度,

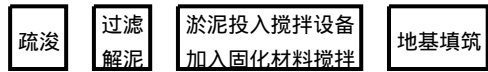


图 7 疏浚泥固化处理施工流程

在施工效率允许的范围内, 尽量增加搅拌时间, 固化材料与淤泥混合不均会造成填筑地基性质不均匀, 易产生差异沉降和裂缝; 在填筑环节中, 如果是水下浇筑则应该用导管浇筑, 以免固化土在水下浇筑时发生离析, 在陆上无水浇筑时应分层浇筑, 浇筑完成后需在表面铺盖材料且浇湿养护, 防止水分散失过多而开裂, 可使用的铺盖材料一般是不断浇湿的沥青材料、麦秆、干草等。

本试验工程利用混凝土搅拌机, 其处理效率为  $30\text{ m}^3/\text{d}$ , 远远不能满足工程的要求, 而且出料困难, 搅拌质量难以保证, 需要开发大型的淤泥固化处理设备, 目前在我国已成功研制出日处理  $300\text{ m}^3$  淤泥的成套固化处理设备, 可以用于大型填海工程的需要。

6 结论

(1) 通过现场试验证明了疏浚泥固化处理技术的现实可行性, 处理后的淤泥可以满足填海工程的承载力要求, 不

仅可以节省大量的土石资源, 而且减少了疏浚泥海洋抛弃造成环境污染, 具有巨大的经济效益和社会效益。

(2) 现场搅拌固化土强度随水泥掺加量的增加呈线性增长, 这与室内试验结果相同, 使用时可先通过室内试验确定淤泥的固化系数, 再根据现场的目标强度设计需要的掺加量。

(3) 通过室内制样对现场填筑地基土的强度进行设计时, 强度要考虑 10% ~ 50% 的折减。

(4) 为了保证现场施工的质量, 关键是固化材料与淤泥的混合均匀, 借鉴国外的施工经验, 一般需要高效率的混合搅拌专用固化处理设备, 才能满足大量的处理和治理质量。

参考文献

[1] 张春雷. 淤泥固化土力学性质及固化机理研究[D]. 河海大学, 2003.  
 [2] 孔丽艳. 大面积不均匀填土区地基加固设计方案的确定——盐田港三期集装箱码头堆场地基加固工程设计简介[J]. 中国港湾建设, 2001, (5): 42-44.

(上接第 12 页)

表 5 反分析得到的土性参数

层数	土层名称	深度 (m)	容重 (kN/m <sup>3</sup> )	不排水强度 (kPa)	单位侧摩阻力 (kPa)	单位端阻力 (kPa)
I	粉砂	0	8.96	$\varphi=20^\circ$	0.00	0.00
		16.4		$\delta=15^\circ$	31.57	1 178.16
II	粘土	16.4	7.86	38.28	27.50	344.52
		30.0		55.02	31.76	495.18
III	粘土	30.0	7.86	55.02	31.76	495.18
		39.0		121.53	60.77	1 093.77
IVa	粘土	39.0	8.33	121.53	60.77	1 093.77
		44.0		126.89	63.44	1 142.01
IVb	粘土	44.0	8.33	105.74	52.87	951.66
		64.0		121.53	60.76	1 093.77
V	砂	64.0	8.33	$\varphi=25^\circ$	67.00	2 900.00
		90.0		$\delta=20^\circ$	67.00	2 900.00
VIa	粘土	70.0	8.96	141.15	141.15	1 270.35
		73.0		143.54	143.54	1 291.86
VIb	粘土	73.0	8.96	114.83	114.83	1 033.47
		84.0		146.41	73.21	1 317.69
VII	粘土	84.0	8.96	112.44	56.22	1 011.96
		98.0		149.76	149.76	1 347.84
VIII	粘土	98.0	8.96	175.12	175.21	1 576.08
		104.0		186.60	186.60	1 679.40

当贯入深度 95 m 时, 每贯入 30 cm 的最大锤击数为 28 击。图 4 的计算结果表明, 与资料 2 和资料 3 提供的土性参数相比, 按照反分析得到的土性参数进行打桩分析与实测打桩记录吻合较好, 说明由反分析方法确定的土性参数最接近该区域地基土体的实际情况, 因此可应用反分析数据进行 RDPP1 平台桩基础的打桩分析。

5 结论

本文以收集到的以往崖城气田建设中的地质勘察资料和 RDPP1 平台区域的打桩记录为基础, 应用以波动方程为

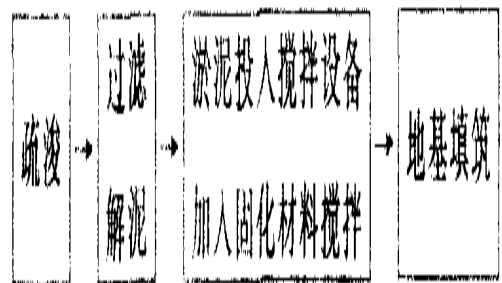


图 4 贯入度与锤击数关系曲线

基础的打桩分析软件 TNO WAVE, 采用反分析的方法推断 RDPP1 平台打桩施工区域的土层分布情况和土体的摩阻力大小, 与实测打桩记录的对比表明, 反分析得到的土性参数能够反映该区域地基土体的真实情况, 可以用于 RDPP1 平台桩基工程的打桩分析中。

参考文献

[1] Smith E A L. Pile driving analysis by the wave equation [J]. Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division, 1960, 86 (SM 4), 35-61.  
 [2] Lee S L, Chow Y K, Karunaratne G P, Wong K Y. Rational wave equation model for pile driving analysis [J]. Geotechnical Engineering, ASCE, 1988, 114 (3): 306-325.  
 [3] Paikowsky S G. A static evaluation of soil plug behavior with application to the pile plugging problem [D]. M. I. T. 1989.  
 [4] Randolph M F, Leong E C, Houlsby G T. One dimensional analysis of soil plugs in pipe piles [J]. Geotechnique, 1991, 41 (4): 587-598.  
 [5] Paikowsky S G. The mechanism of pile plugging in sand [A]. 22nd Offshore Technology Conference (OTC 6490) [C]. Houston, Texas, 1990. 593~ 604.