

文章编号: 1000-7598-(2004)12-1999-04

疏浚淤泥的土工材料化处理技术的试验与探讨

姬凤玲, 朱 伟, 张春雷

(河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘 要: 疏浚淤泥的弃埋会产生环境问题, 如何进行处理是国内外十分关注的问题。采用固化及轻量化处理技术开发再生土工材料, 具有广阔的应用前景。根据室内试验, 研究了不同配比的淤泥固化土和轻量化土的无侧限抗压强度和密度, 并分析了固化和轻量化的强度形成机理。疏浚淤泥土工材料化处理在技术上是可行的, 且具有废物利用和保护环境的优点, 可带来良好的环境效益和社会效益。

关 键 词: 疏浚淤泥; 固化处理; 复合型固化材料; 轻量化处理; 土工合成材料

中图分类号: TU 411 文献标识码: A

Study of treatment technology of dredging sludge with geosynthetizing method

Ji Feng-ling, ZHU Wei, ZHANG Chun-lei

(Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Discarding and covering up dredging sludge may bring environmental problem. How to use and dispose it is an important problem to be paid close attention in China and foreign countries. New geosynthetic material can be developed by technology of solidification and light-weight technology. Based on laboratory tests, unconfined compression strength and density are researched; in addition, the strength mechanism of the soils is analyzed. The technology can avoid the environmental pollution due to sludges; and utilize refuses so as to get social benefits.

Key words: dredging sludge; solidification; compound solidification material; light-weight technology; geosynthetic material

1 引 言

我国在城市建设、水利工程、海洋工程中, 每年都会产生大量的疏浚淤泥, 一方面, 疏浚淤泥的就近弃埋会占用耕地, 产生堆放污染物扩散、污染河流和海洋环境等环境问题; 另一方面, 城市的持续发展使土石方资源的需求量增加, 开山采石、河床采砂、挖田采土的方法已对资源、环境、生态造成难以恢复的影响。因此, 将变成垃圾的疏浚淤泥处理成良好的土工材料, 对社会的可持续发展具有重大的意义。

国际上处理疏浚淤泥的方法有脱水、烧结、固化等 3 种。前两种仅适用于对小批量、高含水量淤泥的处理, 且造价较高, 烧结法对于含砂量过高的疏浚泥不适用。经济、且适用于处理大量疏浚淤泥的方法是固化处理法。这一方法已在日本、荷兰、新加坡被广泛使用。正在建设的名古屋机场的填海

工程就大量采用了固化处理法。日本东京也设有多处疏浚土处理中心, 将疏浚淤泥通过固化处理后代替砂料等土石方材料进行出售, 既保护了环境, 又节约了大量的土石方资源。

国内对疏浚淤泥的再生利用率很低, 利用技术落后。除投弃外, 只有很少部分在填方工程中加以利用。由于疏浚淤泥具有含水率高(80%以上)、强度低、腐殖质含量高等特点, 填方所形成的地基无法直接利用, 一般需要花费较大的费用进行地基处理。常用的是代表性的方法吹淤法, 该方法先将淤泥倾倒入填方地点, 然后打设袋装砂井、塑料排水板, 通过预压的方式促进淤泥固结、提高淤泥强度。这种方法施工周期长、造价高, 所以很难满足对大量淤泥的处理。朱伟^[1,2]根据国外疏浚淤泥的处理经验, 结合国家计委高新技术发展项目《疏浚泥(粉煤灰)综合利用技术》, 研究提出了疏浚淤泥再生土工材料处理技术。这一技术主要采用固化和轻量化处

收稿日期: 2003-09-15

修改稿收到日期: 2003-12-16

作者简介: 姬凤玲, 女, 1971 年生, 博士生, 主要从事环境岩土工程研究。E-mail: jifengling1115@sina.com

理方法,将疏浚淤泥转化为用于填土工程、水利工程、道路工程的良好土工材料,既取得了良好的技术经济效益,又达到了环境保护的目的。

2 固化处理方法的研究

2.1 固化处理方法及原理

所谓固化处理方法^[3],就是在疏浚淤泥中添加固化材料,进行搅拌混合,制成淤泥固化土。

淤泥固化土的强度,从微观结构方面而言,就是通过固化反应在含有大量孔隙的松散土体中形成固化土的骨架结构,从而使其强度提高。因此,固化材料不仅应具有胶结土粒的作用以形成骨架,还应具备填充骨架内部孔隙的功能。较广泛使用的固化材料是水泥,其固化机理为:水泥与淤泥中的水及淤泥颗粒之间发生复杂的物理、化学反应,主要形成纤维状的水化硅酸钙 CSH 的水化产物,附着于孔壁上,使土体孔壁具有整体性而形成骨架结构,从而提高固化后的淤泥强度。但 CSH 不能充分有效地填充土体孔隙,固化土仍留有很多孔隙而影响了淤泥固化土强度的进一步增长。此外,单纯添加水泥会使工程造价过高。通过试验研究发现工业废料如粉煤灰、石膏等对水泥的固化效果有促进作用。粉煤灰中较小颗粒具有填充作用;粉煤灰结构致密、比表面积小、对水的吸附能力小,可以改变固化土的流塑性,使固化土易于密实;粉煤灰中的 SiO_2 和 Al_2O_3 与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应,生成的水化硅酸钙和水化铝酸钙在粉煤灰表面形成交织状的结晶体,提高了骨架结构的强度;石膏与水泥中的铝酸钙反应生成含 32 个结晶水的钙矾石,使固相体积增长。此外,针柱状的钙矾石结晶与纤维状的水化硅酸钙晶体一起在孔隙中形成良好的骨架结构,进一步增加了固化土的强度。因此,研究出固化效率高、造价低的复合型固化材料是固化处理方法的关键。

2.2 固化处理方法试验研究

为了研究复合型固化材料,同时考察经固化处理后的疏浚淤泥作为填土材料的适用性,笔者通过室内试验的方法对淤泥固化土的物理、力学性质进行了研究。室内试验所用淤泥取自大亚湾石油化学工业区,其基本参数如表 1 所示。试验在制样时,先取一定体积的淤泥,按设计好的量加入固化材料,通过机械拌和后,利用其流塑性装入内径 5 cm,高 10 cm 的模具,置入标准养护箱中养护(温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$,湿度 $>90\%$),养护 24 h 脱模,再养护至设计龄期进行试验。

表 1 试验所用疏浚淤泥基本参数

Table 1 The basic parameters of dredging sludge

名称	成因	含水率 $w/\%$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_p/\%$	比重 G_s	重度 γ $/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	孔隙比 e
淤泥	滨海相	120	73.4 60	29.3	2.74	13.9	3.28

试验中所研究的复合型固化材料以水泥为主,工业废料粉煤灰和废石膏为辅。采用南京江南水泥有限公司生产的《钟山牌》325[#]普通硅酸盐水泥作为主要固化材料。粉煤灰为南京下关电厂的 LIFAC 灰,主要成分是飞灰,约占 2/3;其他各种钙基化合物,约占 1/3。所用的石膏为工业废料磷石膏。试验中 1 m^3 淤泥分别添加 30, 40, 50 kg 水泥,粉煤灰的添加量按主材水泥添加量的倍数增加,废石膏按水泥的质量百分比添加(表 2 中 C 代表水泥;F 代表粉煤灰;G 代表石膏。如 C30F1G10 表示 1 m^3 疏浚淤泥中水泥添加量为 30 kg,粉煤灰添加量为水泥质量的 1 倍,石膏添加量为水泥质量的 10%)。进行了 10 组不同材料配比试验,每组 6 个样,龄期 7 d, 28 d 各 3 个样,取均值作为试验结果。经复合型固化材料处理后的试验结果如表 2 所示。

表 2 复合型固化材料试验结果

Table 2 The test result of compound solidification material

材料配比	无侧限抗压强度 $/\text{kPa}$		湿密度 $/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	
	7 d	28 d	7 d	28 d
C30	18.2	24.8	1.43	1.43
C30F1G10	37.7	52.3	1.43	1.44
C30F2G20	52	77.6	1.45	1.46
C30F3G30	56.4	84.8	1.44	1.46
C40	58.9	85.5	1.42	1.41
C40F1G30	85.8	150.0	1.41	1.48
C40F2G10	100.7	241.5	1.45	1.46
C40F3G20	83.8	256.0	1.47	1.46
C50	101.4	166.8	1.45	1.45
C50F1G20	105.2	220.1	1.43	1.45

2.3 试验结果分析及工程可行性

添加复合型固化材料后,淤泥固化土的湿密度在 $1.41 \sim 1.49 \text{ g/cm}^3$ 的微小范围内变化,这是由于水泥土的密度与淤泥的密度相差不大,而粉煤灰的密度较小,石膏的添加量也较少,因此,固化材料的添加量对淤泥固化土密度的影响微弱。

对试验中的 3 个水泥基准量,添加辅助固化材料后,淤泥固化土的无侧限抗压强度都高于添加单一水泥固化材料的无侧限抗压强度,且固化土的无侧限抗压强度随着辅助固化材料添加量的增加而递增。

上述试验结果表明：处理土的使用目的是调整固化材料，使处理后的疏浚淤泥达到工程所要求强度的固化处理方法是可行的。而正在研制改造的成套淤泥固化设备，其造价在 50 万元以下，处理能力预计为 50 m³/h，这有助于实现一次性处理大量疏浚淤泥。江苏省每年产生约 3×10⁷m³淤泥，如采用固化处理的方法对其进行处理，每方可从淤泥疏浚处理费、砂土开采费的综合价格中节约 5 元左右的费用，每年就可为国家节约工程建设费 1.5 亿，具有巨大的经济效益。

3 轻量化处理方法的研究

3.1 轻量化处理方法及原理

轻量化处理方法^[4]就是将疏浚淤泥作为原料土，聚苯乙烯泡沫塑料（EPS）颗粒（碎粒、片粒或疏浚塑料）作为轻质材料，水泥、粉煤灰等材料作为固化材料，进行搅拌混合，制出具有高附加值的新型土工材料——泡沫塑料混合轻质土。

轻量化处理方法通过固化材料的固化反应来提高疏浚淤泥的强度，通过轻质材料的置换作用来降低疏浚淤泥的密度。固化材料以水泥为主，可以选择单一固化材料或复合型固化材料，固化机理与上述固化处理方法相同。因为 EPS 颗粒的强度远远低于固化材料与土所形成的骨架强度，因此，试样的强度主要由固化材料-土骨架结构的结构强度提供。EPS 颗粒的存在只是减小了土骨架的范围，并未减小其结构强度。因此，固化材料含量对强度的影响要明显大于 EPS 颗粒含量对强度的影响。作为轻质材料，EPS 颗粒中主要含有聚苯乙烯、可溶性戊烷（膨胀成分）和防火剂。其中的戊烷受热汽化，在颗粒中膨胀形成许多封闭的空腔，从而使其密度很小。EPS 颗粒密度为一般土的 1/40~1/70，以其密度为 0.061 3 g/cm³ 为例，当 EPS 颗粒含量每提高 1%，试样中有 18.5% 的体积由质量仅占淤泥质量 4.4% 的 EPS 所代替。因此，EPS 颗粒含量对湿密度影响较大，由此可知，固化材料对密度影响很小，因此，为满足密度的要求，主要应调整 EPS 颗粒含量，从而制成密度在 0.6~1.1 g/cm³ 范围内的轻质土工材料。

3.2 轻量化处理方法的试验研究

为了研究轻量化处理后的疏浚淤泥的适用性，通过室内试验的方法对泡沫塑料混合轻质土的物理、力学性质进行了研究。室内试验依然使用大亚湾石油化学工业区海域内的淤泥作为原料土。本试验中采用的轻质材料为圆球状 EPS 颗粒，粒径为 1~3 mm，堆积体的密度为 0.036 8 g/cm³，颗粒的密

度为 0.061 3 g/cm³。采用《钟山牌》325#普通硅酸盐水泥作为固化材料。

试验时，通过调整轻质材料和原料土的质量比，使密度控制在 0.6~1.1 g/cm³ 范围内，制成不同密度的试样组。先按一定体积取淤泥，按设计好的量加入固化材料及 EPS 颗粒，通过机械拌和后，利用其流塑性装入内径 5 cm，高 10 cm 的模具，置入标准养护箱中养护（温度为 20±2℃，湿度>90%），养护 24 h 脱模，再养护至设计龄期进行试验。对不同材料进行配比试验，每组 6 个样，7 d，28 d 龄期各 3 个样，取均值作为试验结果。

3.3 试验结果分析及工程可行性

3.3.1 疏浚淤泥泡沫塑料混合轻质土的密度

当淤泥体积、水泥含量一定时，改变 EPS 颗粒质量百分含量，得到 EPS 颗粒含量与湿密度的关系如图 1 所示。当淤泥体积、EPS 含量一定时，改变水泥含量，得到水泥含量与湿密度的关系如图 2 所示。由图 1，2 可以看出，当水泥含量一定时，试样湿密度随着 EPS 颗粒含量的增加而降低，在试验

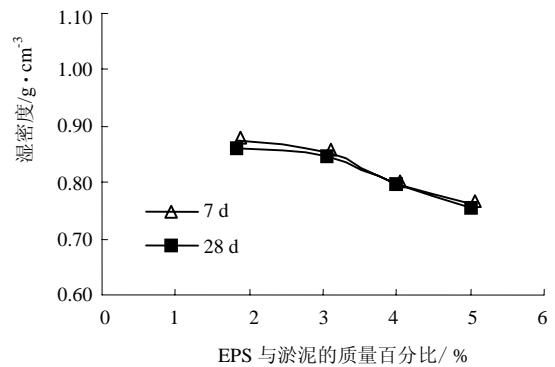


图 1 EPS 颗粒含量与湿密度关系
Fig.1 Relationship between content of EPS and wet density

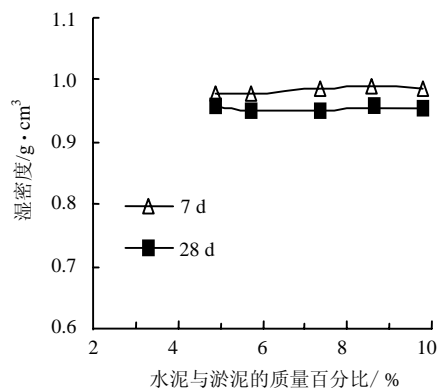


图 2 水泥含量与湿密度的关系
Fig.2 Relationship between content of cement and wet density

所采用的水泥添加量下, 7 d 龄期的湿密度在 $0.763 \sim 0.874 \text{ g/cm}^3$ 范围内变化, 28 d 湿密度在 $0.755 \sim 0.859 \text{ g/cm}^3$ 的范围内变化; EPS 颗粒含量一定时, 试样湿密度随着水泥添加量的增加, 变化较小, 7 d 湿密度在 $0.954 \sim 0.987 \text{ g/cm}^3$ 的微小范围内变化, 28 d 湿密度在 $0.938 \sim 0.956 \text{ g/cm}^3$ 的微小范围内变化。

3.3.2 疏浚淤泥泡沫塑料混合轻质土的强度

当淤泥体积、水泥含量一定时, 改变 EPS 颗粒含量, 得到 EPS 颗粒含量与无侧限抗压强度的关系如图 3 所示。当淤泥体积、EPS 颗粒含量一定时, 改变水泥添加量, 得到水泥含量与无侧限抗压强度的关系如图 4 所示。由图 3, 4 可以看出, 水泥含量一定时, 增加 EPS 颗粒含量, 试样无侧限抗压强度降低; 当 EPS 颗粒含量在 $1.8\% \sim 5\%$ 范围内变化时, 7 d 强度在 $195.95 \sim 260.21 \text{ kPa}$ 之间, 28 d 强度在 $321 \sim 378 \text{ kPa}$ 之间; EPS 颗粒含量一定时, 增加水泥添加量, 试样无侧限抗压强度增加, 当水泥含量在 $4.9\% \sim 9\%$ 范围内变化时, 7 d 强度在 $141.47 \sim 266.85 \text{ kPa}$ 之间, 28 d 强度在 $299.61 \sim 447.31 \text{ kPa}$ 之间。

图 3 中试样无侧限抗压强度下降较明显, 这是因为水泥含量不变, 而 EPS 颗粒含量为 5% 时, 此时试样中 53% 的体积为 EPS 颗粒所占据, 试样的流动性变差, 制样时产生搅拌不均匀, 使试样有局部断面, 而未形成水泥-土骨架而造成的。

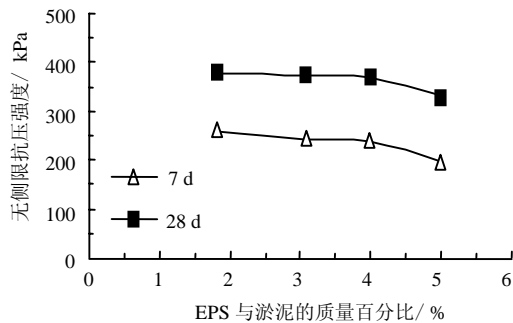


图 3 EPS 颗粒含量与强度的关系

Fig.3 Relationship between content of EPS and strength

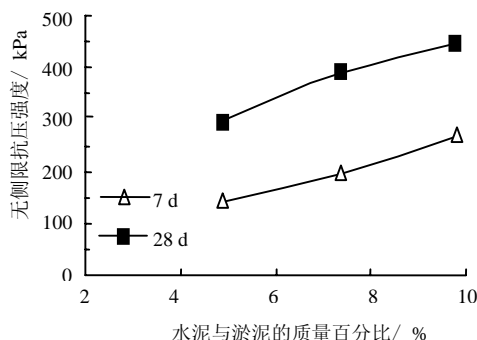


图 4 水泥含量与强度的关系

Fig. 4 Relationship between content of cement and strength

上述试验结果表明: 根据处理土的使用目的, 调整固化材料、轻质材料的配方, 一次大量处理疏浚淤泥使其达到工程所要求的密度、强度等的轻量化处理方法是可行的。泡沫塑料混合轻质填土的直接施工费用, 与一般地基回填中粗砂的费用相当, 但它可节约地基处理费用, 可大幅度地缩短施工工期、节省用地等, 特别是可大幅地降低由于软基的工后沉降而引起的维护管理费。以广珠东线为例, 建筑施工时对软基路段进行排水固结处理的同时, 大部分路段还进行过两次超载预压, 许多桥涵背在回填砂前还进行过一些特殊处理(如: 粉喷桩), 但在建成通车仅两年的时间内, 已对区内的近 50 个桥涵背进行过 3 次大的修补, 付出的直接维修费用就达到了 1 500 万元, 并且还需进行不断的修补。上述工程如采用经轻量化处理后的轻质填土, 应能创造十分显著的社会经济效益。

5 结 论

(1) 疏浚淤泥土工材料化处理在技术上是可行的, 且具有废物利用和保护环境的优点。

(2) 固化处理和轻量化处理的效果在很大程度上受到疏浚淤泥的性质、固化材料和轻质材料的特性及添加量的影响, 应根据不同疏浚淤泥的特点进行试验研究。

(3) 固化处理及轻量化处理后的疏浚淤泥具有强度可调、施工时无需碾压等优点, 是良好的工程填土材料, 具有广泛的工程应用前景。

参 考 文 献

- [1] 朱伟, 张春雷, 高玉峰等. 疏浚泥处理再生资源技术的现状[J]. 环境科学与技术, 2002, 4(3):39-41.
ZHU Wei, ZHANG Chun-lei, GAO Yu-feng, et al. The status of dredged spoils utilization[J]. **Environmental Science and Technology**, 2002,4(3):39-41.
- [2] 朱伟, 刘汉龙, 高玉峰. 工程废弃土的再生资源利用技术[J]. 再生资源研究, 2001(6): 32-35.
ZHU Wei, GAO Yu-feng, LIU Han-long. Technology of renewable resources of discarded soil[J]. **Research of Renewable Resources**, 2001(6):23-35.
- [3] 汤怡新, 刘汉龙, 朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 549-554.
TANG Yi-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.
- [4] 马时冬. 聚苯乙烯泡沫塑料轻质填土(SLS)的特性[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 245-248.
MA shi-dong. The properties of stabilized light soil(SLS) with expanded polystyrene[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001,22(3):245-248.