

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.03.011

水泥固化高含水率淤泥的收缩性质

张春雷¹ 朱 伟¹ 范公俊²

(1.河海大学环境学院,江苏 南京 210098 ; 2.河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098)

摘要 :针对高含水率疏浚淤泥水泥固化后的失水收缩性质,通过收缩试验对水泥添加量、养护龄期和淤泥初始含水率对水泥固化后的收缩规律进行了研究.结果表明:对于不同水泥添加量、养护龄期和初始含水率的固化淤泥,收缩曲线的形式与天然黏土相似,固化淤泥的收缩主要是由于水分蒸发引起,水泥添加量越高、养护龄期越长、淤泥的初始含水率越低对固化淤泥的收缩性控制越有利.
关键词 :淤泥;水泥;固化;高含水率;收缩
中图分类号 :TU411.2 **文献标志码 :**A **文章编号 :**1000-1980(2010)03-0295-05

在水利和水环境治理工程中会产生大量的疏浚淤泥,这些淤泥通常含水率很高,经过疏浚施工的扰动几乎没有强度^[1].如何合理处置这样的淤泥已经成为关系工程建设顺利进行的瓶颈问题.在淤泥的各种处理方法中,固化资源化方法以其施工效率高、处理后的土可以用作填土资源的特点,适合于大量产生淤泥的处理工程^[2-3].由于疏浚淤泥含水率较高,加入水泥、石灰等固化材料固化以后,即使强度上满足了工程的要求,但由于多余的水分要蒸发散失,就必然会引起土体的收缩和开裂问题,从而对固化淤泥的工程使用产生不利影响^[4-5].目前对于水泥、石灰等材料改良软土收缩性的研究开展较多,如张登良等^[6]对石灰、水泥及二者混合形成的半刚性材料的温度收缩和干燥收缩规律进行了较系统的试验研究,提出了半刚性基层的收缩规律和通过改进配比来减少收缩和开裂的方法.李立群等^[7]对水泥稳定集料基层的收缩抗裂性能进行了研究,对水稳类基层的收缩机理进行了分析,提出了该材料的抗裂性的评价方法和抗裂措施.贺行洋等^[8-10]也对水泥稳定土的收缩性质进行了研究,认为水泥水化反应的体积减缩以及水泥水化作用消耗黏粒吸附水引起的收缩是水泥土收缩的主要原因.随着水泥添加量的增加水泥土的收缩性呈增加的趋势.已有研究成果大多是针对含水率较低软土的加固收缩性质,而对于高含水率的淤泥经过固化处理后的收缩规律研究还未见报道.本文通过收缩试验对不同水泥添加量、不同养护龄期和不同淤泥初始含水率条件下固化淤泥的收缩规律进行了试验研究,以期为控制固化淤泥的收缩和由于收缩导致的开裂问题做一些探索.

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验所用的淤泥取自江苏省无锡市五里湖疏浚淤泥堆放场,该淤泥的含水率为 139%,密度为 1.4 g/cm³,相对体积质量为 2.65,孔隙比为 3.41,液限为 75%,塑限为 32%,颗粒中大于粒径 75 μm 的占 20%,5 ~ 75 μm 的占 43%,小于 5 μm 的占 37%.据此可以判定该泥为高液限黏土.试验所用水泥为南京江南水泥厂生产的“钟山牌”32.5 级普通硅酸盐水泥.

1.2 试验方法

为了研究固化淤泥的收缩规律,对在不同水泥添加量、养护龄期和淤泥初始含水率下固化淤泥的收缩性质进行研究.试验方案如表 1 所示,其中水泥添加量以水泥质量占干土的百分比计.

表 1 试验方案

Table 1 Test schemes			
编号	水泥添加量/%	龄期/d	淤泥含水率/%
1	0,10,20,40	7	139
2	20	0,14,28	139
3	20	7	70,100,170

收缩试验参照 ASTM D4943—2002 的方法^[11]进行.试样为面积 15.4 cm²、高 1.3 cm 的圆饼,体积为 20 cm³.首先按照设计配比将水泥和淤泥在容器中用调土刀混合搅拌 10 min 后,将固化淤泥填入到按上述尺寸定制的有机玻璃模具中,并将模具和试样一起放入养护箱(温度 20℃,湿度大于 90%)中进行养护,每个配比制作 15 个试样.收缩试验时将 15 个试样在预定龄期全部取出放置于室内通风处敞开,每天取 2 个试样测试不同失水状态时的含水率和体积,最后一组试样在体积不再收缩时进行测定(根据预试验,7 d 时试样体积已经稳定).体积的测定采用蜡封法,测完体积后,剥去蜡层测定试样的含水率.连接各不同含水率所对应的体积即为收缩曲线.

根据土力学概念^[12],天然黏土的收缩曲线如图 1 中 ABC 线所示,AB 段为线性收缩阶段,水分的蒸发引起土样同等体积的减小.BC 为非线性收缩阶段,水分蒸发的体积大于试样体积的减小量.通常从体积稳定的 C 点引水平线与 AB 段延长线的交点 D 点的含水率作为缩限 w_s .评价收缩性的指标可以用缩限 w_s ,AB 线性段的斜率 k 、体缩率 δ_v 来表示, δ_v 的定义为^[13]

$$\delta_v = \frac{V_0 - V_d}{V_0} \times 100\%$$

(1)

式中: V_0 ——试样初始体积,cm³; V_d ——试样烘干体积,cm³.

2 固化淤泥的收缩规律

2.1 水泥添加量对收缩性的影响

针对初始含水率为 139% 的淤泥进行了不同水泥添加量的固化收缩试验(方案 1),试验结果如图 2 所示.对图 2 中的数据按照图 1 中求缩限的方法可以求得不同水泥添加量时的缩限.从图 2 可以看出,随着含水率的降低,淤泥和水泥固化淤泥的体积都在减小,呈现出与天然黏土收缩相似的模式.对线性收缩段的数据进行拟合(图 2),可以得到该段的收缩公式为

$$V = \begin{cases} V_d + k(w - w_s) & w \geq w_s \\ V_d & w < w_s \end{cases}$$

(2)

式中: V ——试样体积,cm³; k ——线性收缩段斜率; w ——含水率,%; w_s ——缩限,%.

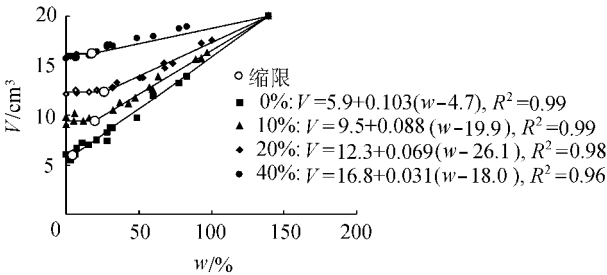


图 2 不同水泥添加量下固化淤泥的收缩曲线

Fig. 2 Shrinkage curves of solidified sludge with different cement contents

对图 2 中的缩限、体缩率、线性收缩段斜率进行提取和计算,结果如表 2 所示.从表 2 可以看出,对于不同的水泥掺加量,当水泥添加量低于 20% 时,固化淤泥的缩限随着水泥添加量的增加而增长,水泥添加量高于 20% 以后,缩限反而随着水泥添加量的增加而降低.随着水泥添加量的增加,固化淤泥的体缩率和线性收缩段的斜率在降低,表明水泥添加量的增加对抑制收缩有利.这与低含水率水泥土中水泥添加量越大,收缩性越大的结论有显著的差异.说明虽然固化淤泥与水泥土在固化机理上相似,但由于固化淤泥高含水率的特殊性质,其收缩主要由于水分散失引起,而水泥土的收缩主要是由于水泥水化所引起^[8-9],因此固化淤泥具

表 2 不同水泥添加量下收缩试验的相关参数

Table 2 Parameters for shrinkage tests with different cement contents

水泥添加量/%	缩限/%	体缩率/%	线性收缩段斜率
0	4.7	71	0.10
10	19.9	53	0.09
20	26.1	38	0.07
40	18.0	19	0.03

有了与水泥土不同的收缩性质,这在工程中有显著的指导意义.

2.2 养护龄期对收缩性的影响

利用含水率为 139% 的淤泥,对水泥添加量为 20% 时固化淤泥的收缩性质随龄期的变化规律进行试验(方案 2),得到固化淤泥的收缩曲线,如图 3 所示.对图 3 的数据点进行分析,可以得到不同水泥添加量时的缩限.从图 3 可以看出,随着含水率的降低,淤泥和水泥固化淤泥的体积都在减小,呈现出与天然黏土收缩相似的模式.对线性收缩段进行拟合,可以得到该段的收缩公式(图 3),收缩公式的形式与式(2)相同.

对图 3 中的缩限、体缩率、线性收缩段斜率等数据进行提取和计算,结果如表 3 所示.从表 3 可以看出,随着养护龄期的延长,固化淤泥的缩限、体缩率和线性收缩段的斜率都在降低.这表明养护可以减小固化淤泥的收缩程度和收缩量,在工程中可以通过养护的方式来控制收缩.收缩随龄期延长而减小是因为随着养护龄期的延长,固化淤泥中水泥的水化反应程度进一步加深,水泥水化产物的量越来越多,由于水化产物的结构强度较强,因此在水分蒸发时,水化产物支撑在土颗粒间减小了土颗粒靠近的程度,因而对控制收缩有利.

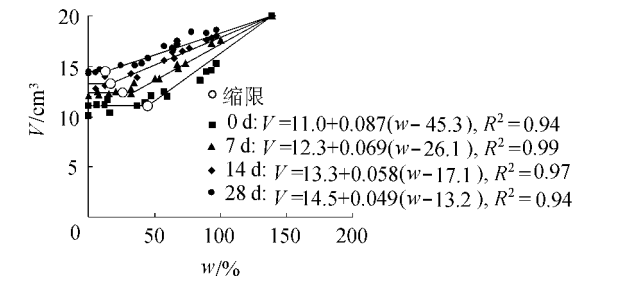


图 3 不同养护龄期下固化淤泥的收缩曲线
Fig. 3 Shrinkage curves of solidified sludge with different curing periods

表 3 不同龄期下收缩试验的相关参数
Table 3 Parameters for shrinkage tests with different curing periods

龄期/d	缩限/%	体缩率/%	线性收缩段斜率
0	45.3	45	0.09
7	26.1	38	0.07
14	17.1	34	0.06
28	13.2	28	0.05

2.3 淤泥初始含水率对收缩性的影响

为了研究淤泥初始含水率对固化后收缩性的影响,将淤泥调配成 4 种不同的初始含水率(表 1),水泥添加量固定为 20%,在养护到 7 d 时开始进行收缩试验(方案 3),试验结果如图 4 所示.图 4 中线性收缩段的公式也可以用式(2)表示.

对图 4 中的缩限、体缩率、线性收缩段斜率等数据进行提取,结果如表 4 所示.从表 4 可以看出,随着淤泥初始含水率的增加,固化淤泥的缩限和体缩率都在增加,而线性收缩段的斜率接近.这表明不同初始含水率下的固化淤泥,当加入相同水泥量时,其收缩性相近.淤泥初始含水率越高,固化后的收缩性也越大.因此,通过降低淤泥初始含水率的方法也可以减小固化后的收缩.

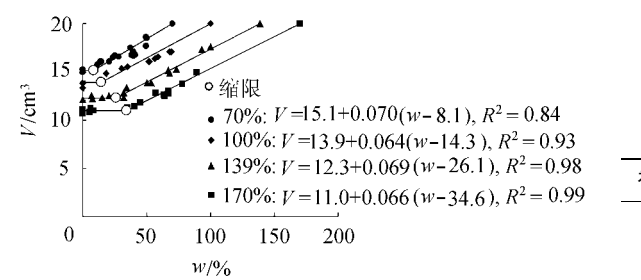


图 4 不同淤泥初始含水率下固化淤泥的收缩曲线
Fig. 4 Shrinkage curves of solidified sludge with different initial water contents

表 4 不同淤泥初始含水率下收缩试验的相关参数
Table 4 Parameters for shrinkage tests with different initial water contents

初始含水率/%	缩限/%	体缩率/%	线性收缩段斜率
70	8.1	24	0.07
100	14.3	30	0.06
139	26.1	38	0.07
170	34.6	45	0.07

3 试验结果分析

对比分析表 2、表 3 和表 4 中体缩率分别与水泥添加量 a_c 、龄期 t 和淤泥初始含水率 w_0 的关系,可以得到以下关系式:

$$\delta_v = -1.3(a_c - 52.0) \quad R^2 = 0.98 \quad (3)$$

$$\delta_v = -0.6(t - 72.5) \quad R^2 = 0.96 \quad (4)$$

$$\delta_v = 0.2(w_0 + 49.1) \quad R^2 = 0.99 \quad (5)$$

从式(3)~(5)可以看出,在试验范围内,水泥添加量、养护龄期和淤泥初始含水率都与体缩率呈线性关系。增加水泥添加量、延长养护龄期和降低淤泥初始含水率对控制收缩有利。影响收缩的最大因素从大到小分别是水泥添加量、养护龄期和淤泥初始含水率。结合前面的分析,要减小淤泥固化土的收缩有两条途径可以实现:(a)减小淤泥的初始含水率,使淤泥收缩完成后再使用,这就要求对淤泥进行脱水,属于物理的方法;(b)利用一些填充物来抑制土颗粒的靠近,这些填充物可以是固化材料的水化产物,也可以人工加入一些能够填充土颗粒间孔隙的物质,比如砂土等。而对于化学固化方法,能够大量促进水泥产物产生的材料都有利于减小淤泥固化后的收缩,比如石膏就可以促进水泥更多地生成钙矾石晶体来支撑土颗粒并降低颗粒间的孔隙^[14]。

4 结 论

a. 对于不同水泥添加量、养护龄期和淤泥初始含水率,水泥固化后的收缩曲线形式上都与天然土相似,可以采用天然土求缩限的方法求取固化淤泥的缩限。

b. 固化淤泥的收缩性随着水泥添加量的增加而降低,这点与低含水率水泥土的收缩规律不同,说明对于高含水率的固化淤泥,其收缩主要是由于水分蒸发引起的。

c. 随着养护龄期的增加和淤泥初始含水率的降低,固化淤泥的收缩性都会降低。

d. 增加水泥用量、延长养护时间和降低淤泥初始含水率,都有利于减小固化后的收缩。

参考文献:

- [1] 彭涛,武威,黄少康,等.吹填淤泥的工程地质特性研究[J].工程勘察,1999(5):1-5.(PENG Tao, WU Wei, HUANG Shao-kang, et al. Research on engineering geologic properties of blown filled muck[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1999(5):1-5. (in Chinese))
- [2] 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. (in Chinese))
- [3] TANG Yi-xin, MIYAZAKI Y, TSUCHIDA T. Practices of reused dredgings by cement treatment[J]. Journal of the Japanese Geotechnical Society of Soils and Foundations, 2001, 41(5):129-143.
- [4] BISSONNETTE B, PIERRE P, PIGEON M. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(10):1655-1662.
- [5] DAVIES J. Fracture characteristics of cement-stabilized soil[J]. Journal of Materials Science, 1991, 26(15):4095-4103.
- [6] 张登良,郑南翔.半刚性基层材料收缩抗裂性能研究[J].中国公路学报,1991,4(1):16-22.(ZHANG Deng-liang, ZHENG Nan-xiang. On the anti-shrinkage cracking performance of semi-rigid base course material[J]. China Journal of Highway and Transport, 1991, 4(1):16-22. (in Chinese))
- [7] 李立群,华东.水泥稳定集料收缩抗裂性能研究综述[J].公路与汽运,2004(5):54-56.(LI Li-qun, HUA Dong. Overview of the research on shrinkage anti-cracking performance of aggregate stabilized cement[J]. Highways & Automotive Applications, 2004(5):54-56. (in Chinese))
- [8] 贺行洋,陈益民,张文生.土的组成、结构与固化技术[J].岩土工程技术,2003(3):129-133.(HE Xing-yang, CHEN Yi-min, ZHANG Wen-sheng. Composition, structure and stabilization of soil[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2003(3):129-133. (in Chinese))
- [9] 杨玉春,陈德志.水泥稳定基层裂缝产生的原因及预防措施[J].林业科技情报,2005,37(1):64-65.(YANG Yu-chun, CHEN De-zhi. Causation and prevention measurements of crack in cement stable foundation[J]. Forestry Science and Technology Information, 2005, 37(1):64-65. (in Chinese))
- [10] 王加龙,何兆益,黄维蓉.无机结合料和固化剂稳定粉土收缩性能研究[J].重庆交通学院学报,2005,24(2):83-89.(WANG Jia-long, HE Zhao-yi, HUANG Wei-rong. Research on the shrinkage characteristic of powdered soil stabilized by binder and solidification powder[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(2):83-89. (in Chinese))
- [11] ASTM D4943-08. Standard test method for shrinkage factors of soils by the wax method[S].
- [12] 钱家欢.土力学[M].南京:河海大学出版社,1988:17-19.

[13] GB/T50123—1999 土工试验方法标准 S].
[14] 黄新 胡同安. 水泥-废石膏加固软土的试验研究[J]. 岩土工程学报 ,1998 ,20(5):72-76.(HUANG Xin ,HU Tong-an. On stabilization of soft soil with waste gypsum and cement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,1998 ,20(5):72-76.(in Chinese))

Shrinkage properties of cement solidified sludge with high water content

ZHANG Chun-lei¹ , ZHU Wei¹ , FAN Gong-jun²

(1. College of Environment , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
2. Geotechnical Research Institute , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : With regard to the shrinkage properties of dredged sludge with high water content treated by cement , the influences of the added cement content , curing period , and initial water content of the sludge on the drying shrinkage properties were studied based on shrinkage tests. The test results show that the shrinkage characteristic curves of the solidified sludge with different cement contents , curing periods , and initial water contents have similar shapes to those of natural clay. The shrinkage of solidified sludge mainly results from water evaporation. With additional cement content , the longer curing period and the lower initial water content of the sludge favor the shrinkage control of solidified sludge.

Key words : sludge ; cement ; solidification ; high water content ; shrinkage

· 简讯 ·

水工模型试验和原型观测技术国际研讨会将在南京召开

水工模型试验和原型观测技术国际研讨会将于 2010 年 9 月 13—15 日在南京召开. 会议将通过特邀报告、分议题报告和技术展览等形式对国内外模型试验与原型观测方面的新方法、新技术和新成果进行广泛交流. 会议由南京水利科学研究院主办 , 国际水利工程与研究协会、中国水利学会、中国水力发电工程学会、水利部水科学与水工程重点实验室、水文水资源与水利工程科学国家重点实验室、河海大学、中国水利水电科学研究院、长江科学院、黄河水利科学研究院、上海河口海岸科学研究中心和 中国水力发电工程学会通航建筑物专业委员会 协办.

会议主题为物理模型试验与原型观测技术在水科学研究中的重要角色. 会议议题如下 :

- a. 物理模型试验新技术. 包括水工、河工、港工模型试验 , 地表水与地下水模拟 , 泥沙输运及河床演变 , 河口海岸演变和波浪运动 , 污染物、盐、热等的传输与传导 , 溃坝模拟技术 , 相似理论和缩尺效应等 7 个方面的内容.
- b. 原型观测新技术. 包括内陆水域、河口和海洋原型观测 , 水环境、生态系统和修复工程原型观测 , 洪水、飓风、冰雪和灾害等极端条件下的原型观测 , 水利工程长期监测和控制技术 , 模型试验和原型观测的对比等 5 个方面的内容.
- c. 测量仪器与设备. 包括室内试验和野外测量设备 , 水力学测量传感器技术和设备 , 水环境和生态测量新技术 , 数据采集和传输技术等 5 个方面的内容.
- d. 复合模型(物模 + 数模) 技术. 包括物理模型与数学模型耦合技术 , 多进程、数据驱动的模拟技术 , 与模型试验相关的其他方法等 3 个方面的内容.

会议详细情况可登录 <http://www.ishpf2010.cn> 查询.

(本刊编辑部供稿)