

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.01.008

固化淤泥的干燥收缩试验

胡孝彭¹, 赵仲辉²

(1. 重庆水利电力职业技术学院, 重庆 402160; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 对不同初始含水率和水泥添加量的淤泥进行固化处理, 结合土水特征曲线和收缩曲线探讨固化淤泥在干燥过程中基质吸力与孔隙比之间的关系。试验结果表明: 原泥与低水泥添加量的固化淤泥随着基质吸力的增加会出现干缩现象, 且固化淤泥的收缩小于原泥, 高水泥添加量的固化淤泥不发生收缩; 当基质吸力增至某一值 ψ_s 后, 基质吸力增大不会引起试样的进一步收缩, 固化淤泥 ψ_s 的大小与淤泥的初始含水率、水泥添加量有关。

关键词: 疏浚淤泥; 水泥固化; 土水特征曲线; 收缩曲线; 基质吸力

中图分类号: TU411 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2015)01-0039-05

Experimental study of drying shrinkage of solidified dredged material

HU Xiaopeng¹, ZHAO Zhonghui²

(1. Chongqing Water Resources and Electric Engineering College, Chongqing 402160, China;
2. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Dredged material (DM) with different initial water contents and cement contents was solidified. The relationship between the matric suction and the void ratio during drying of the solidified dredged material (SDM) was established by utilizing the soil-water characteristic curves and the shrinkage curves, which were determined through experimental tests. The experimental results show that, during the drying process, the untreated soil and SDM with low cement contents continuously shrink with the increase of matric suction, and the latter exhibits lower shrinkage compared with the former, while SDM with high cement contents show no shrinkage. The increase of matric suction cannot cause further shrinkage when it reaches a specific value ψ_s . It is found that the value of ψ_s is influenced by the initial water content and cement content.

Key words: dredged material; cement solidification; soil-water characteristic curve; shrinkage curve; matric suction

疏浚产生的大量淤泥含水率高、强度低且含有污染物, 常规的淤泥处理方法无法满足可持续发展要求^[1-2]。固化处理技术^[3-4]可将废弃的疏浚淤泥转化为再生资源加以利用, 有效缓解了环境与经济之间的突出矛盾, 因此备受国内外专家学者的青睐。

疏浚淤泥固化处理后仍含有大量水分, 在工程使用中, 随着气候的变化, 基质吸力和固化土体的结构也随之变化, 常常会发生干燥收缩现象, 甚至出现裂缝, 影响工程的安全稳定和正常使用^[5-6], 因此固化淤泥的收缩特性已引起广泛关注。范公俊^[7]、张春雷等^[8]通过收缩试验, 认为水分蒸发是引起固化淤泥收缩的主要原因, 增加水泥添加量、延长养护龄期及降低淤泥的初始含水率有利于控制固化淤泥的收缩。固化处理后的淤泥常被用做筑路材料、填土材料和土壤基质材料, 在气候变化条件下多处于非饱和状态, 此时要采用基质吸力和净平均应力 2 个应力状态变量来描述固化淤泥的力学性状^[9]。关于基质吸力引起非饱和土体体积变化的研究较多^[10-12], 然而固化淤泥属于改性土范畴, 基质吸力对固化淤泥的屈服变形作用与天然土之间必然存在差别。鉴于此, 笔者对不同初始含水率和水泥添加量的淤泥进行固化处理, 通过收缩曲线和土水特

收稿日期: 2014-01-17
基金项目: 国家自然科学基金(51178161)
作者简介: 胡孝彭(1985—), 男, 河南漯河人, 硕士, 主要从事非饱和土特性研究。E-mail: huxiaopeng@nwsuaf.edu.cn

征曲线,研究固化淤泥干燥过程中基质吸力和孔隙比的关系,以期对固化淤泥的工程实践提供指导。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验淤泥取自南京市西南长江下游的江心洲,淤泥的液限为 51.5%,塑限为 24%,相对密度为 2.60,根据 GBJ 145—1990《土的分类标准》^[13]和淤泥的塑限、塑性指数,该淤泥属于高液限黏土(CH),淤泥颗粒级配曲线如图 1 所示。采用的固化材料为南京市江南水泥有限公司生产的钟山牌 32.5 号复合硅酸盐水泥。

土水特征曲线的量测一般历时较长,而固化淤泥的固化效果又与养护龄期密切相关,需要考虑龄期对试验的影响。根据张春雷^[14]的研究,可认为养护 56 d 后固化淤泥的性质基本稳定,试验历时造成的误差可以不考虑。考虑降低工程造价,通常对含水率约为 1.5 倍液限的疏浚淤泥进行固化处理。首先调配出初始含水率 w_0 分别为 51.5%、77%、103% 的淤泥,再按照体积质量 $\alpha = 50\text{ kg/m}^3$ 、 100 kg/m^3 、 200 kg/m^3 分别添加水泥,强制搅拌均匀后分 3 层装入水泥砂浆正方体试模(7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm)内,每层装入后应加以振动,保证排出空气后再装入下一层,装满后用塑料袋密封并置于温度约为 20℃、湿度大于 90% 的混凝土标准养护箱中养护。24 h 后退模,将试块用保鲜膜密封放入标准养护箱中养护 56 d 后切取环刀样(每个养护完成的试块可以切取 2 个直径 6.18 cm、高度 2.0 cm 的试样),放入饱和器中抽气饱和以备用。

1.2 试验方法

采用时间相对较短、操作简单的滤纸法量测固化淤泥的土水特征曲线,试验使用的器具主要有 Whatman No. 42 滤纸、高精度电子天平、密封容器、烘箱、游标卡尺、保鲜膜等。具体步骤为:(a)将 3 张干燥的滤纸裁剪至与试样相同的直径,夹入 2 块被测固化土样之间,如图 2 所示,中间的滤纸用于量测基质吸力,外面 2 张滤纸主要用于保护中间滤纸不受污染;(b)用保鲜膜将试样密封,放入密封容器中,静置 7 d 达到水气平衡状态后,小心快速地测量中间滤纸的湿质量和试样的质量,并用游标卡尺量测试样尺寸大小;(c)将中间滤纸放入铝盒中,然后在烘箱里烘干,测其干质量,根据滤纸的率定曲线得到对应的吸力;(d)风干试样至某一设计质量,重复上述步骤;(e)烘干固化土样,测定其干质量,计算出不同吸力阶段试样的含水率,整理获得不同孔隙比条件下的土水特征曲线。Whatman No. 42 型滤纸的率定曲线已得到广泛认同,基质吸力 ψ (kPa)与滤纸含水率 ω_f (%)间关系式为^[15]

$$\lg \psi = \begin{cases} 2.909 - 0.0229\omega_f & \omega_f \geq 47 \\ 4.945 - 0.0673\omega_f & \omega_f < 47 \end{cases}$$

(1)

收缩曲线是指含水率与孔隙比之间的关系曲线,由试样抽气饱和后的质量、试样烘干后的质量、水气平衡状态后的试样质量以及游标卡尺量测的试样尺寸可以得到固化淤泥的收缩曲线。

2 试验结果分析

在半对数坐标系上,采用 Fredlund 等^[16]的土水特征曲线模型对试验数据进行拟合:

$$\frac{\theta_w}{\theta_s} = C(\psi) \frac{1}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m}$$

(2)

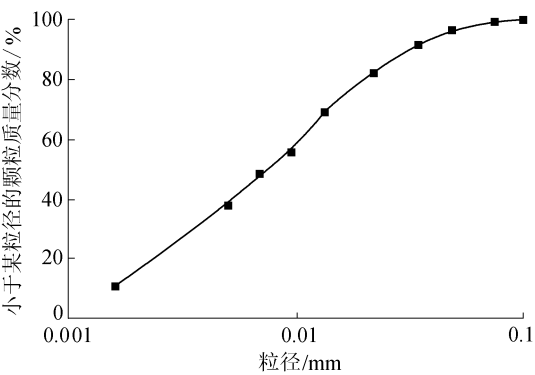


图 1 淤泥颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of DM

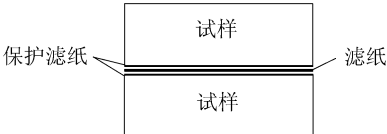


图 2 滤纸法示意图

Fig. 2 Sketch of filter paper method

其中

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)}$$

式中: θ_w ——含水率; θ_s ——饱和含水率; $C(\psi)$ ——修正函数,保证基质吸力为 10^6 kPa 时土样含水率为零;
 a 、 n 、 m ——拟合参数; ψ_r ——含水率为残余含水率时所对应的基质吸力。

按最小二乘法进行拟合得到的固化淤泥的土水特征曲线如图 3 所示。由图 3 可以看出,固化淤泥的持水能力明显大于原泥,对于同一初始含水率的淤泥,固化处理后其持水性能随着水泥添加量的增加而增强;在相同的水泥添加量下,固化淤泥的持水能力随淤泥初始含水率的增大而减弱。

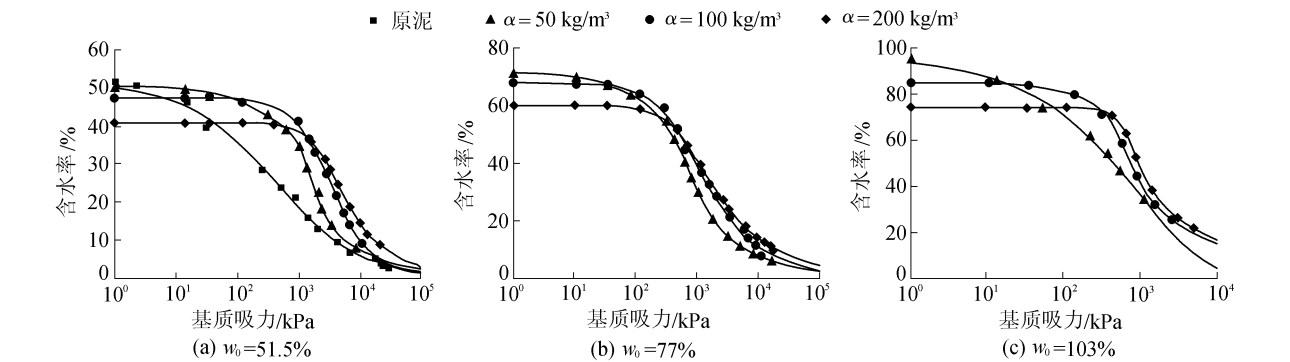


图 3 固化淤泥的土水特征曲线

Fig. 3 Soil-water characteristic curves of SDM

图 4 为固化淤泥的干燥收缩曲线。由图 4 可以看出,随着含水率的减少,原泥和固化淤泥试样的体积都在不断减小,收缩作用使得试样的孔隙比不断变小。当含水率减至缩限,原泥和固化淤泥试样都收缩到某一体积并保持稳定,所不同的是原泥的体积收缩比固化淤泥大,其缩限亦小于固化淤泥的缩限;对于同一初始含水率的淤泥,固化处理后其缩限随着水泥添加量的增加而减小;在相同的水泥添加量下,淤泥的初始含水率越大,固化处理后其收缩也越严重。

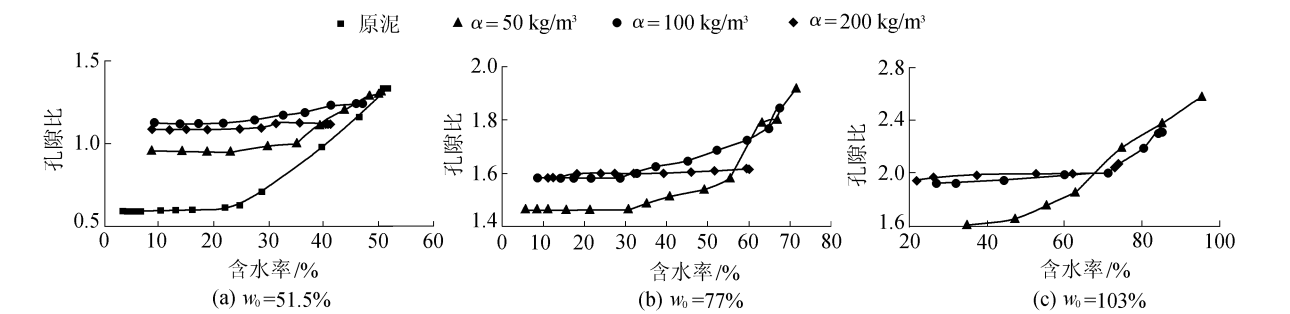


图 4 固化淤泥的干燥收缩曲线

Fig. 4 Shrinkage curves of SDM

结合试样的土水特征曲线和收缩曲线,可以得到固化淤泥干缩过程中基质吸力与孔隙比的关系,如图 5 所示。由图 5 可知,在净平均应力为零的条件下,随着基质吸力的增加,原泥与部分固化淤泥试样发生收缩,孔隙比不断减少。对于原泥,孔隙的结构性很弱,开始阶段基质吸力与孔隙比的变化呈线性发展,孔隙比的减小源于孔隙水的蒸发。随着干燥过程中孔隙水的蒸发,在表面张力的作用下土颗粒之间会形成弯液面,从而产生负的毛细水压力,它与表面张力一起作用使土颗粒彼此靠近,淤泥颗粒之间相互联接起来。随着基质吸力的增大,使土体开始具有一定的结构刚度,抗屈服变形能力增强,最后达到缩限,基质吸力的增大已无法改变土体的结构,孔隙比保持不变。对于固化淤泥的收缩,不仅受到上述毛细水的作用,同时由于向淤泥中添加水泥后生成的水化产物充填于孔隙之间,大量低势能的自由水转化为水化产物中的结合水与矿物水,固化淤泥具有了一定的骨架结构,抵抗变形的能力大于原泥,而且添加水泥后,固化土体的孔隙比和颗粒间距减小,限制了可用于屈服变形的空间,所以即使固化淤泥的基质吸力比原泥高很多,其收缩量仍然会比原泥

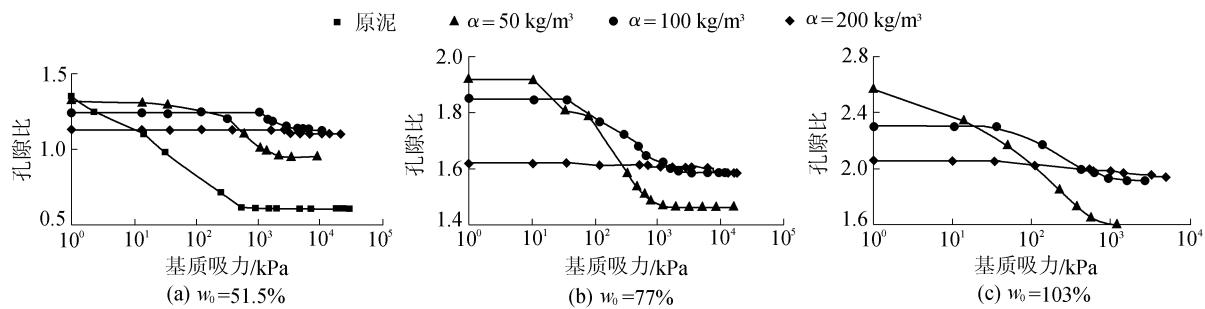


图5 固化淤泥基质吸力与孔隙比的关系

Fig. 5 Relationship between matrix suction and void ratio of SDM

小很多。

同一初始含水率的淤泥固化处理后,随着基质吸力的增大,试样孔隙比的变化规律有所不同。当水泥添加量较小(50 kg/m^3 、 100 kg/m^3)时,低掺量的水泥对其固化作用不明显,固化后其含水率仍较高,尚未形成具有足够强度的骨架结构,基质吸力的增加使试样发生明显的体积收缩而导致孔隙比减小。值得注意的是,当基质吸力增大到某一值(ψ_s)后,试样孔隙比开始保持不变,此时基质吸力的增大基本不会引起试样进一步收缩,该界限含水率被称为缩限,为方便表达,称此时对应的基质吸力 ψ_s 为界限吸力。当水泥掺量较大(200 kg/m^3)时,随着基质吸力增加,孔隙比变化很小或几乎不发生改变,这主要是因为高水泥掺量下固化淤泥颗粒之间形成的骨架结构具有足够的强度,基质吸力的大小不足以使其发生屈服,收缩性不明显或无收缩。

由图5亦可以看出,达到 ψ_s 之前曲线下降段近似地为一斜直线,该直线斜率越大,代表同样吸力范围内的孔隙比变化越大,收缩性越大。为了评价基质吸力对固化淤泥的干燥收缩作用,用斜直线的坡度——收缩指数 δ 来表示固化淤泥收缩性的高低:

$$\delta = \frac{\Delta e}{\Delta \lg \psi}$$

(3)

式中: Δe ——孔隙比的变化量。

表1为不同初始含水率 and 水泥添加量的淤泥固化处理后干燥收缩过程中对应的 ψ_s 与收缩指数 δ 。由表1可以看出,同一 w_0 的淤泥固化处理后, ψ_s 随水泥添加量的增大而增大, δ 随水泥添加量的增大而减小,因为水泥添加量越大,孔隙中自由水越少,水化产物越多,颗粒间的联接作用越强,需要较大的吸力克服固化淤泥屈服变形的阻力。相同的水泥掺量下,固化淤泥的 ψ_s 随淤泥 w_0 的增大而减小, δ 随 w_0 的增大而增大,一方面是因为 w_0 的增加,固化淤泥颗粒外的结合水膜厚度和颗粒间距增大,为干燥收缩提供了有利条件,另一方面是因为固化淤泥颗粒间的联接强度和有效应力随 w_0 的增加而降低,屈服变形所需克服的阻力较小。综上所述可知,固化淤泥的界限吸力 ψ_s 及收缩指数 δ 的大小与淤泥的初始含水率、水泥添加量都有关系。从工程经济的角度考虑,在淤泥固化工程的长期运营中,要尽量降低淤泥的初始含水率,使其在基质吸力作用下完成一部分收缩,从而控制固化淤泥的收缩甚至开裂。

3 结 论

- a. 在净平均应力为零的条件下,随着基质吸力的增加,原泥与低水泥添加量的固化淤泥会出现干缩现象,但固化淤泥的收缩明显小于原泥,高水泥添加量的固化淤泥收缩性不明显或无收缩。
- b. 存在一个界限吸力 ψ_s ,当基质吸力增至该值后,发生干缩的土体的孔隙比开始保持不变,此时基质吸力的增大基本上不会引起土体进一步收缩。
- c. 固化淤泥的界限吸力 ψ_s 和收缩指数 δ 受淤泥初始含水率 and 水泥添加量2个因素的影响。

参考文献:

[1] 徐元. 港口建设与疏浚之间关系浅议;兼谈第 6 届世界疏浚大会有关情况[J]. 中国港湾建设,2001(6):65-68. (XU Yuan. A preliminary study on relationship between port construction and dredging;with an introduction to related subjects of 16th world dredging congress[J]. China Harbour Engineering, 2001(6):65-68. (in Chinese))

[2] 陈萍,张振营,李小山,等. 废弃淤泥作为再生资源的固化技术与工程应用研究[J]. 浙江水利科技,2006(6):1-3. (CHEN Ping, ZHANG Zhenying, LI Xiaoshan, et al. Solidification technology of dredged sediment for reuse as civil engineering materials[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2006(6):1-3. (in Chinese))

[3] TANG Y X, MIYAZAKI Y, TSUCHIDA T. Practices of reused dredgings by cement treatment[J]. Soils and Foundations, 2001, 41(5):129-143.

[4] 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 Chunlei, LIU Hanlong, et al. The status quo of dredged spoils utilization[J]. Environmental Science & Technology, 2002,25(4):39-41. (in Chinese))

[5] 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.

[6] 李晓华,郑东启,徐文瑞. 水泥稳定土的强度与干缩裂缝[J]. 中国西部科技,2004(5):40-41. (LI Xiaohua, ZHENG Dongqi, XU Wenrui. Strength and dry shrinkage in cement stabilized soil[J]. Science and Technology of West China, 2004(5):40-41. (in Chinese))

[7] 范公俊. 固化淤泥的收缩性质及其控制措施研究[D]. 南京:河海大学,2007.

[8] 张春雷,朱伟,范公俊. 水泥固化高含水率淤泥的收缩性质[J]. 河海大学学报:自然科学版,2010,38(3):295-299. (ZHANG Chunlei, ZHU Wei, FAN Gongjun. Shrinkage properties of cement solidified sludge with high water content[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(3):295-299. (in Chinese))

[9] FREDLUND D G, RAHARDJO H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐,张在明,陈愈炯,等,译. 北京:中国建筑工业出版社,1997.

[10] PEREIRA J H F, FREDLUND D G. Volume change behavior of collapsible compacted gneiss soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2000,126(10):907-916.

[11] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R. Constitutive relations for volume change in unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1976, 13(3):261-276.

[12] SIVAKUMAR V, DORAN I G. Yielding characteristics of unsaturated compacted soils[J]. Mechanics of Cohesive Frictional Materials, 2000(5):291-303.

[13] GBJ 145—1990 土的分类标准[S].

[14] 张春雷. 基于水分转化模型的淤泥固化机理研究[D]. 南京:河海大学,2007.

[15] LEONG E C, HE L, RAHARDJO H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements[J]. Geotechnical Testing Journal,2002,25(3):322-333.

[16] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31:521-532.