

固化淤泥持水特性试验

赵含梅^{1,2}, 赵仲辉^{1,2}, 胡孝彭^{1,2}, 周文斌^{1,2}

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了研究固化淤泥的持水特性, 采用离心试验获得土水特征曲线, 分析水泥掺量和龄期对固化淤泥持水特性的影响。试验结果表明: 固化淤泥的进气值随着水泥掺量和龄期的增加而增大; 干燥率随着水泥掺量和龄期的增大而减小; 水化产物的胶结与填充作用改变了淤泥孔隙结构, 增强了固化淤泥的持水特性, 减小了渗透系数, 能够有效地阻止重金属的迁移, 从而避免对环境造成二次污染。

关键词: 土水特征曲线; 离心试验; 固化淤泥; 进气值; 干燥率; 水泥掺量; 龄期

中图分类号: TV16 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2014)01-0057-04

Experimental study on water retention characteristics of solidified dredged materials//ZHAO Hanmei^{1,2}, ZHAO Zhonghui^{1,2}, HU Xiaopeng^{1,2}, ZHOU Wenbin^{1,2} (1. *Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: In order to investigate the water retention characteristics of solidified dredged materials, the centrifuge test was used to obtain the soil-water characteristic curve and analyze the effects of the cement content and curing period on the water retention characteristics of solidified dredged materials. The results show that the air-entry value of dredged materials increases and the gradient of the drying curve of dredged materials decreases with the increase of the cement content and curing period. During the solidification process, the pore structure of solidified dredged materials is changed by the cementation and filling actions of hydration products so that the water retention capacity of solidified dredged materials is enhanced and the permeability coefficient is reduced, which can effectively prevent the migration of heavy metals and their secondary pollution of environment.

Key words: soil-water characteristic curve; centrifuge test; solidified dredged material; air-entry value; drying rate; cement content; curing period

许多航道疏浚、河底清淤工程会产生大量的疏浚泥, 由于其含水率高、强度低, 存放需占用很大空间, 且淤泥中存在一些重金属, 会对环境造成一定的影响, 很难直接用于土木工程。采用吹填方法和抛泥方法处理淤泥费用高, 对海洋环境影响大。通过物理、化学方法改良淤泥, 使其成为良好土工材料, 应用于堤防加固工程、填土工程、道路工程中, 既能还原淤泥占地, 又能变废为宝, 符合我国环保的基本思想^[1-2]。物理方法存在耗时长、脱水工厂固定、一次性投资高、需进行二次处理等缺点而影响其适用性。化学方法(固化处理法)通过孔隙水与固化材料发生水化反应以提高淤泥强度, 且可根据需要灵活调整固化剂配方^[3]。高含水率淤泥一般在固化处理前需进行预处理以降低含水率, 这样会导致施工成本高, 施工效率

低。针对我国的疏浚施工方式多为绞吸式疏浚, 丁建文等^[4]提出了流动固化处理方法: 向高含水率淤泥中添加一些固化材料并充分搅拌, 使拌合物有一定的流动性, 像混凝土一样被泵送到需要土体材料的地方, 以便达到高效处理高含水率淤泥的目的。该方法可充分利用固化淤泥流动性、自硬性的特点, 无需碾压成型, 在大规模施工时效率很高。

国内外有一些关于固化淤泥方面的研究, 张春雷等^[5]研究了初始含水率对淤泥固化效果的影响, 表明单位体积水化产物量是初始含水率对淤泥固化效果影响的主要原因; Chiu 等^[6]从强度与水分转化的角度分析了淤泥的固化机理; Chong^[7]对含有重金属的淤泥进行了研究, 表明水化产物的胶结与包裹作用能使重金属更为稳定地存在于固化体内部;

Chong 等^[8]研究表明水化反应会改变孔隙级配分布;张春雷等^[9]通过对疏浚底泥进行固化处理和筑堤试验,指出固化淤泥 28 d 强度、体变和渗透系数能够满足堤防筑堤的要求,可以作为土方材料使用;李磊等^[10]指出如果固化体的渗透系数减小到固化前的 1/3,污染物的锋面浓度仅相当于固化前的 1/10,从固化淤泥中迁移出来的重金属会对环境造成二次污染;Marco 等^[11]认为淤泥中重金属固化稳定情况与渗透系数密切相关,持水特性可以反映不同饱和度下固化淤泥的渗透系数;Soonkie 等^[12-13]指出持水特性曲线(土水特征曲线)是基质吸力与含水率的关系曲线,反映了土体的持水能力。获得土水特征曲线的方法有压力板法、滤纸法、气相法、瞬态剖面法、渗析法等,由于这些方法具有试验周期较长、测量数据误差较大等缺点,本文采用离心试验获取土水特征曲线,进而研究固化淤泥的持水特性,为预测固化淤泥非饱和渗透系数提供依据,并且可以较好地定性分析固化淤泥中重金属的迁移规律。

1 试验材料和试验方法

1.1 试验材料

试验淤泥取自南京江心洲洲头,根据 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》,由比重瓶法测得土粒相对密度为 2.60。由密度计法测得淤泥的颗粒级配曲线如图 1 所示,其中黏粒、粉粒、砂粒的质量分数分别为 37%、62%、1%。由液塑限联合测定仪测得淤泥塑限、液限、塑性指数分别为 24%、52%、28,根据 GBJ 145—90《土的分类标准》判定为高液限黏土(CH)。试验所用水泥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。

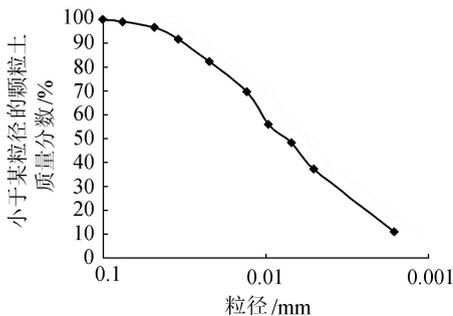


图 1 淤泥颗粒级配曲线

1.2 试验方案

由于淤泥的天然含水率比较高,为了研究采用流动固化处理方法固化淤泥的持水特性^[4],本试验配制的淤泥含水率为 104% (2.0 倍液限),掺入水泥,用搅拌机强制搅拌均匀,然后装入模具,振捣密实后放入 20℃ 左右、湿度大于 90% 的养护箱养护 24 h,脱模后继续养护直至目标龄期。

试验选用 50 kg/m³、100 kg/m³、200 kg/m³、300 kg/m³ 4 种水泥掺量和 7 d、28 d、56 d 3 个龄期进行组合,每种组合配制 1 个试样,共计 12 个试样。

1.3 试验方法

采用离心试验获取土水特征曲线,为获得更完整的土水特征曲线,在离心试验之前对固化淤泥进行了抽气饱和。用环刀法切取达到目标龄期的固化淤泥试样,环刀直径为 49.9 mm,高为 50.9 mm。离心试验的转速从小到大分为若干级,每级转速的试验时间为 3 h,试验温度为 20℃,对离心后的试样进行含水率试验。采用日本 HITACHI 公司生产的 Himac 高速冷冻离心机进行试验,最高转速为 11 000 r/min。随着离心转速的增大,固化淤泥试样的体变逐渐增大,说明基质吸力的增大使土体收缩。固化淤泥体变对基质吸力的计算影响较大^[14],必须考虑其影响,公式 (1) 为本试验修正后的基质吸力公式^[15],由于质量含水率不能在土水特征曲线上表达固化淤泥体变这一因素的影响,因此采用体积含水率来表达。

$$u_s = 5.478 \times 10^{-9} h \left(r - \frac{h}{4} \right) n^2 \quad (1)$$

式中: u_s 为基质吸力, kPa; h 为相应转速离心后试样高度, mm; r 为旋转中心至试样底面的距离(本试验为 98 mm); n 为转速, r/min。图 2 为离心试验试样示意图。

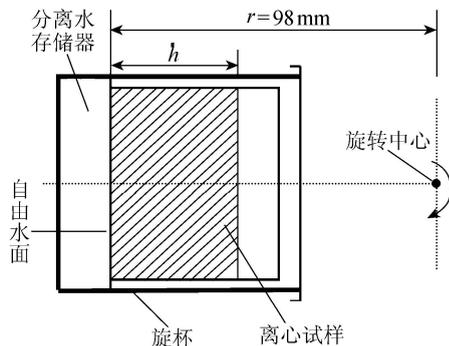


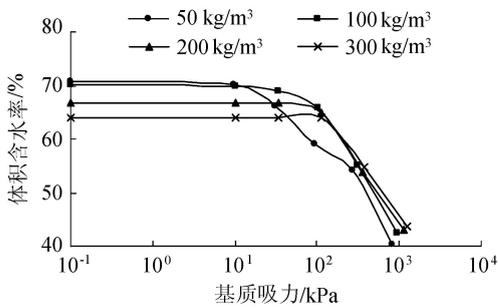
图 2 离心试验试样示意图

2 试验结果及分析

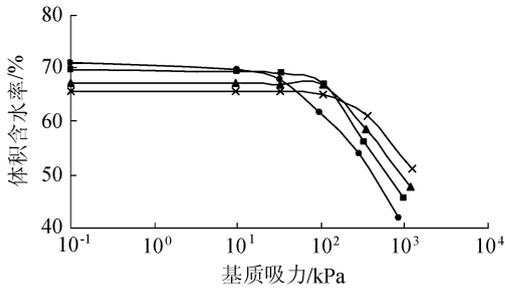
2.1 不同水泥掺量的土水特征曲线

图 3 为龄期 7 d 和 56 d 时不同水泥掺量的土水特征曲线。从图 3 可以看出体积含水率随着水泥掺量的增加而减小,但是受龄期变化的影响不大。

体积含水率随水泥掺量的增加而减小有以下两方面原因:第一,水泥掺量的增加提高了淤泥干密度。向一定含水率的淤泥中掺入水泥,若不考虑水泥的水化反应,就相当于在淤泥中掺入干土一样,淤泥的干密度得到提高。第二,通过水化反应将淤泥中的水分转化到水化产物中,当水泥掺入淤泥中,水



(a) 7 d 龄期



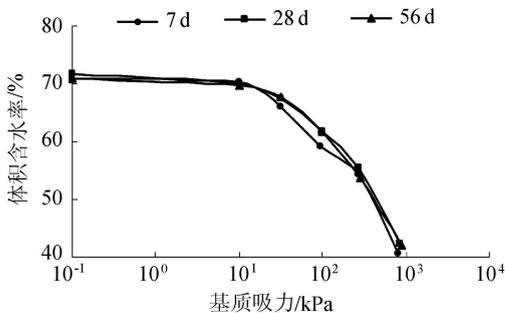
(b) 56 d 龄期

图3 不同水泥掺量的土水特征曲线

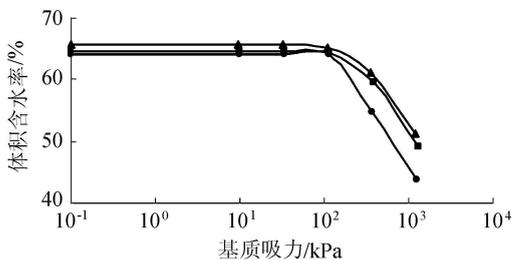
泥与淤泥中的孔隙水发生水化反应,从而降低固化淤泥的含水率。

2.2 不同龄期的土水特征曲线

图4为水泥掺量为 50 kg/m^3 和 300 kg/m^3 时不同龄期的土水特征曲线。由图4(a)可以看出不同龄期的3条曲线几乎重合,主要是由于水泥掺量较少,生成的水化产物量较少,因此对土水特征曲线的影响很小。汤怡新等^[16]的研究表明,对于一定含水率的淤泥存在一个最小水泥掺量,该结论可以较好地解释此现象。图4(b)表明掺量为 300 kg/m^3 时,体积含水率受龄期变化的影响很小,主要是淤泥中



(a) 水泥掺量 50 kg/m^3



(b) 水泥掺量 300 kg/m^3

图4 不同龄期的土水特征曲线

自由水与水泥反应后被转化成矿物水的量远小于转化成结合水的量,以至于龄期对体积含水率的影响并不明显。尽管龄期对体积含水率的影响较小,但随着更多水化产物的生成,水化产物的填充与胶结作用对固化淤泥孔隙结构的影响很明显,因此7 d龄期的干燥率明显大于56 d的,而固化淤泥的持水特性也随着龄期发生改变,这与文献^[5]的结论是一致的。

2.3 进气值与水泥掺量的关系

进气值是引起土体内部最大孔隙产生减饱和和所必需的基质吸力值,进气值越大,土体的最大孔隙越小,渗透系数越小,图5为进气值与水泥掺量的关系。由图5可以看出,进气值随着水泥掺量的增加而增大,当水泥掺量大于 100 kg/m^3 时,进气值增大更明显;除个别试验点外,进气值随龄期的增加而增大,且当水泥掺量越大,这一现象越明显。

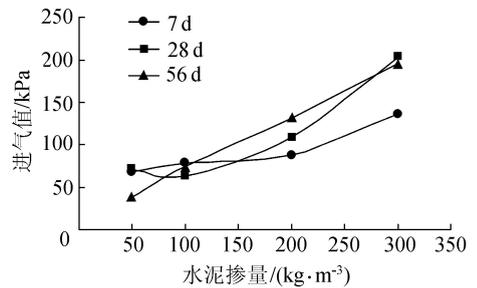


图5 进气值与水泥掺量的关系

进气值的增加反映固化淤泥的最大孔隙减小,这是由于水化产物对土体颗粒的胶结和填充作用引起的,侯浩波等^[17]通过对固化淤泥的强度和微观结构进行分析也得出了同样的结论。最大孔隙尺寸的减小会降低土体的渗透系数,对淤泥中的重金属起到更好的固化作用,从而避免因重金属的迁移而带来对环境的二次污染^[7]。

2.4 干燥率与水泥掺量的关系

干燥率表示土体在过渡段失水或吸水的能力,干燥率越小,土体越不容易失水或吸水,也表明渗透系数越小。图6为干燥率与水泥掺量的关系,可以看出干燥率随着水泥掺量的增加而减小,在7 d龄期时此现象更明显;同时可以看出干燥率也随着龄期的增加而减小,当水泥掺量小于 200 kg/m^3 时,该

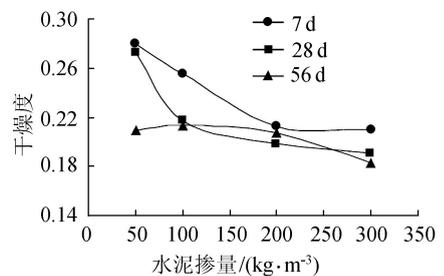


图6 干燥率与水泥掺量的关系

变化趋势较明显。水泥掺量和龄期的增加都会提高水化产物量,从而增强水化产物的胶结与填充作用,进一步改变淤泥的孔隙结构,文献[8]对该结论有更详细的解释,可以看出该规律与进气值随水泥掺量和龄期的变化规律在本质上是一致的。

3 结论

a. 进气值随着水泥掺量的增加而增大,当水泥掺量大于 100 kg/m^3 时,进气值增大更明显;进气值随着龄期的增加而增大,且当水泥掺量越大,这一现象越明显。

b. 干燥率随着水泥掺量的增加而减小,当水泥掺量大于 200 kg/m^3 时,干燥率趋于定值;干燥率随着龄期的增加而减小。

c. 水化产物的胶结与填充作用改变了固化淤泥的孔隙结构,固化淤泥的持水特性增强,渗透系数减小,能够有效地阻止重金属的迁移,从而避免对环境造成二次污染。

参考文献:

[1] 孟庆山,杨超,雷学文,等. 武汉东湖淤泥早强固化试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(3):707-712. (MENG Qingshan, YANG Chao, LEI Xuewen, et al. Experimental study of early solidification of sludge in Wuhan East Lake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3):707-712. (in Chinese))

[2] WANG Dongxing, NOR E A, RACHID Z, et al. Solidification/stabilization of dredged marine sediments for road construction[J]. Environmental Technology, 2012, 33(1):95-101.

[3] 顾欢达,陈甦. 河道淤泥的流动化处理及其工程性质的试验研究[J]. 岩土工程学报,2002,24(1):108-111. (GU Huanda, CHEN Su. Experimental study of river sludge processing and its engineering properties [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1):108-111. (in Chinese))

[4] 丁建文,洪振舜,刘松玉. 疏浚淤泥流动固化处理与流动性试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(增刊1):280-283. (DING Jianwen, HONG Zhenshun, LIU Songyu. Study of flow-solidification method and fluidity test of dredged clays[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 30(Sup1):280-283. (in Chinese))

[5] 张春雷,汪顺才,朱伟,等. 初始含水率对水泥固化淤泥效果的影响[J]. 岩土力学,2008,29(增刊1):567-570. (ZHANG Chunlei, WANG Shuncai, ZHU Wei, et al. Influence of initial water content on cement solidification effect of dredged material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(Sup1):567-570. (in Chinese))

[6] CHIU C F, ZHU W, ZHANG C L. Yielding and shear behaviour of cement-treated dredged materials [J].

Engineering Geology, 2009, 103(1/2):1-12.

[7] CHONG K P. Hydration and solidification of hazardous wastes containing heavy metals using modified cementitious materials [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(3):429-435.

[8] CHONG Y R, SEONG K K, CHANG E K. Investigation of the stability of hardened slag paste for the stabilization/solidification of wastes containing heavy metal ions [J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, 73(3):255-267.

[9] 张春雷,朱伟,李磊,等. 湖泊疏浚泥固化筑堤现场试验研究[J]. 中国港湾建设,2007(1):27-29. (ZHANG Chunlei, ZHU Wei, LI Lei, et al. Field test of dike construction with solidified lake dredged material [J]. China Harbour Engineering, 2007(1):27-29. (in Chinese))

[10] 李磊,朱伟,赵建,等. 西五里湖疏浚底泥资源化处理的二次污染问题研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2005,33(2):127-130. (LI Lei, ZHU Wei, ZHAO Jian, et al. Research of secondary pollution induced by reutilization of dredged sediment from west Wulihu Lake [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2005, 33(2):127-130. (in Chinese))

[11] MARCO B, MARKUS F. Errors in water retention curves determined with pressure plates [J]. Soil Science Society of America, 2009, 73(5):1453-1460.

[12] SOONKIE N, MARTE G, PANAYIOTIS D, et al. Comparison of testing techniques and models for establishing the SWCC of riverbank soils [J]. Engineering Geology, 2009, 110(1/2):1-10.

[13] YVONNE L, TOM S, FREDLUND D G. Modified pressure plate apparatus and column testing device for measuring SWCC of sand [J]. Geotechnical Testing Journal, 2009, 32(5):1-15.

[14] 吕殿青. 变容重土壤的水分动力学研究[D]. 西安:西北农林科技大学,2003.

[15] 尚熈廷,冯杰,刘佩贵,等. SWCC测定时吸力计算公式与最佳离心时间的探讨[J]. 河海大学学报:自然科学版,2009,37(1):12-15. (SHANG Manting, FENG Jie, LIU Peigui, et al. Suction formula of SWCC and the best time of centrifugation [J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 2009, 37(1):12-15. (in Chinese))

[16] 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 Yixin, LIU Hanlong, ZHU Wei. Laboratory study on engineering properties of cement-stabilized soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5):549-554. (in Chinese))

[17] 侯浩波,张大捷,田晓峰,等. 湖泊底泥改性固化的强度特性和微观结构[J]. 岩土力学,2008,29(4):1010-1014. (HOU Haobo, ZHANG Dajie, TIAN Xiaofeng, et al. Strength characteristics and microstructure of solidified lake sludge [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4):1010-1014. (in Chinese))

(收稿日期:2013-01-28 编辑:周红梅)