

初始含水率对水泥固化淤泥效果的影响

张春雷¹, 汪顺才¹, 朱 伟¹, 刘青松², 大木宜章³

(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.日本大学生产工学部土木工学科, 日本 千叶县习志野市 275-0006)

摘 要: 通过室内调配不同初始含水率的淤泥, 研究了初始含水率对水泥固化效果的影响。研究发现, 固化淤泥的无侧限抗压强度随淤泥含水率的增加呈乘幂关系下降, 随着初始含水率的增加, 固化淤泥的塑性增加, 破坏应变增加, 而黏聚力降低。随着初始含水率的增加, 水分过多导致水化产物在单位体积中的数量较少, 难以形成整体强度。在实际工程中, 应在满足固化搅拌的施工要求下, 尽量降低淤泥的初始含水率以取得较好的经济效益。

关 键 词: 淤泥; 吹填; 固化; 含水率

中图分类号: TU 411.6

文献标识码: A

Influence of initial water content on cement solidification effect of dredged material

ZHANG Chun-lei¹, WANG Shun-cai¹, ZHU Wei¹, LIU Qing-song², T. OHKI³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Department of Civil Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University, Tiba Narashino 275-0006, Japan)

Abstract: Through preparing different water contents dredged material (DM), the influences of water content on the cement solidification effect of DM are studied. Test results show that the unconfined compressive strength of cement solidified DM decreases with increasing initial water content in power relation. With the increase of initial water content, the plasticity of cement solidified DM increases, failure strain increases and cohesion decreases. With the increase of initial water content, the quantity of cement hydration products per unit volume decreases, the whole strength is low. In practical engineering, it is better to reduce the initial water content for more economical benefit.

Key words: dredged material; hydraulic filling; solidification; water content

1 引 言

疏浚淤泥是一种高含水率的工程废弃土, 由于淤泥性质很差, 疏浚泥的合理处理和处置也是世界性的一个难题。而通过技术处理将废弃的淤泥转化为土资源进行使用是各国应用和研究的主流^[1,2]。在各种资源化方法中, 固化方法以其施工效率高、价格合理的优点, 是国内外常用的处理大量产生的工程淤泥的较好方法。淤泥通过资源化处理利用后, 不但可以减少堆场占地, 同时还产生了可供工程填方用的土资源。

由于疏浚淤泥的高含水率性质, 在吹填以后, 随着孔隙水应力消散和表层蒸发, 含水率会逐渐降

低, 那么当淤泥含水率降到什么程度可以进行固化处理才比较经济, 含水率对淤泥固化的影响规律如何? 只有明确这些问题, 在实际工程中才能掌握合适的处理时机, 提高处理的经济性并缩短整个堆场的还原周期。含水率对水泥加固影响的研究大多集中在在混凝土的研究中, 处理的对象大多是含水率低于液限的软土, 如李俊才等^[3]讨论了天然含水率为 40 %和 60 %两种上海软土中含水率对粉喷法加固效果的影响。贾坚^[4]配制了初始含水率为 20 %~70 %的 8 组软土, 对加入不同比例水泥固化的效果进行了研究。疏浚淤泥是一种含水率高于液限的完全扰动土, 为了保证固化搅拌均匀以及搅拌后具有一定的施工流动性, 通常在混合搅拌时淤泥的含水

收稿日期: 2008-07-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目资助(No. 2007AA11Z135); 水利部公益性行业科研专项经费项目资助(No. 200701045); 江苏省南水北调工程科技创新项目资助(No. KJCX-200613)。

作者简介: 张春雷, 男, 1978 年生, 讲师, 从事岩土工程和环境工程方面的研究。E-mail: chunLeizhang@hhu.edu.cn

率要高于液限。针对这种高含水率淤泥中含水率对固化效果的影响问题,本文在室内调配了不同初始含水率的淤泥,针对淤泥初始含水率对水泥固化效果的影响开展研究,以期明确含水率对固化淤泥力学性质的影响规律,更好的指导淤泥固化处理的工程实践。

2 试验材料和方法

2.1 试验材料

试验用的淤泥取自南水北调白马湖穿湖段淤泥吹填场,淤泥的物理性质指标如表 1 所示,由表 1 可见该淤泥的含水率较高,达到液限的 4 倍。淤泥的级配采用激光粒度分析仪进行了测定,所得的级配曲线如图 1 所示。从表 1 和图 1 中可以看出,淤泥中的黏粒(粒径 $<5\mu\text{m}$)含量为 47%,再根据淤泥液限和塑性指数,可以确定该淤泥的分类为高液限黏土(CH)。试验用的水泥为南京江南水泥厂生产的“钟山牌”32.5[#]普通硅酸盐水泥。

表 1 试验用淤泥物理性质指标
Table 1 Physical properties of tested soil

含水率 /%	密度 / $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	比重	黏粒含量 ^① /%	液限 /%	塑限 /%	有机质含量 ^② /%
369	1.15	2.65	47	89	38	2.8

注:①粒径 $<5\mu\text{m}$;②重铬酸钾比色法。

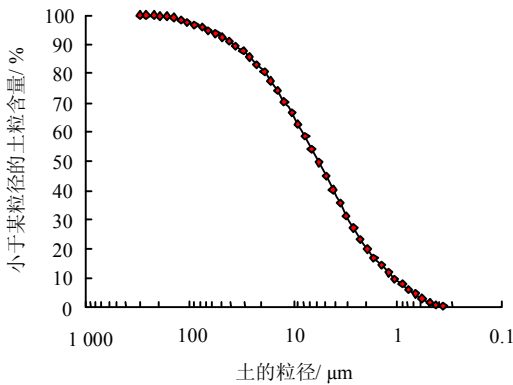


图 1 试验用淤泥的颗粒分布曲线
Fig.1 Particle size distribution curve of tested soil

2.2 试验方法

考虑到吹淤结束时淤泥含水率在 200%以上,以后逐渐降低的特点,为了研究不同淤泥初始含水率对固化淤泥力学性质的影响,在实验室内调配出 4 种初始含水率(ω_0)分别为 93.7%、128%、165% 和 204% 的淤泥,再分别添加 50 kg/m^3 、75 kg/m^3 、100 kg/m^3 的水泥(每方淤泥中的添加量),在龄期为 3 d 时,进行无侧限抗压强度试验和直接剪

切试验。

试样的制备方法是在淤泥中按设计比例加入水泥后用机械搅拌机强制搅拌均匀后,无侧限抗压强度试样分三层装入内径 3.91 cm、高 8.0 cm 的钢制模具内,每层经振动排出气泡后再装入下一层,直到装满。直接剪切试样用削土刀分层将搅拌好的泥样压入环刀中。泥样装入模具后用聚乙烯塑料袋密封并置于 $20\pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $>90\%$ 的养护箱中养护 24 h 后进行脱模,脱模后的试样用塑料袋密封后继续养护至 3 天进行试验。无侧限抗压强度试验和直接剪切试验每个配比测定 3 个试样,直剪试验在 SDJ-1 型应变控制式直剪仪上进行,试验方法为快剪法,剪切速率为 0.8 mm/min,法向应力分别取为 50 kPa、100 kPa、150 kPa 和 200 kPa,抗剪强度参数的获取按照土工规范中的直线法进行。

3 试验结果与分析

3.1 初始含水率对应力-应变关系的影响

3 种水泥量时不同初始含水率下的应力-应变曲线形态呈现相似的规律,选取水泥量为 75 kg/m^3 的曲线形态进行分析如图 2 所示。从图中可以看出,对于不同的初始含水率,固化淤泥都呈现出较大的塑性破坏模式,而且初始含水率越大,塑性也就越明显。出现这种现象的原因是由于淤泥本身强度非常小,固化淤泥的强度主要来自于水泥水化产物的作用。即使水泥水化产物的量相同,当初始含水率较低时,水泥水化产物在固化体中单位体积中的量就越多,因而强度较高,而塑性较低。当初始含水率较高时,水化产物在固化体中单位体积中的量就较少,因而呈现出强度低,变形大的塑性变形特点。

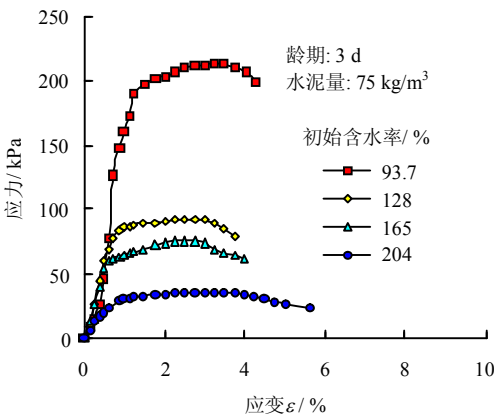


图 2 初始含水率对应力-应变曲线的影响
Fig.2 Effect of initial water content on the stress-strain curves

3.2 初始含水率对无侧限抗压强度的影响

图3为初始含水率对固化淤泥无侧限抗压强度的影响。从图中可以看出, 固化淤泥的无侧限抗压强度随着初始含水率的升高呈乘幂关系降低, 对于不同的水泥量可以用式(1)来表示二者的关系。

$$q_u = k\omega_0^b \quad (1)$$

式中: q_u 为无侧限抗压强度; ω_0 为淤泥初始含水率; k , b 分别为试验参数, 随不同水泥量和龄期而变化。

从图3中还可以看出, 当水泥量越高时, 强度随初始含水率增加的下降速率也越大。当水泥量相同时, 低含水率时, 水泥量的变化对强度的影响较显著, 如在含水率为93.7%时, 100 kg/m³水泥量的无侧限抗压强度为50 kg/m³的3.8倍, 而当含水率为204时, 二者之比为2.6。造成上述现象的原因是水泥加固淤泥反应主要靠水泥水化生成的水化产物的胶结和填充作用来提高固化淤泥的强度, 水泥的水化需要有水的参加, 但是需要有一个适宜的水分量, 当淤泥中的水分超过水泥水化所需要的水分量时, 多余的水分作为孔隙分布在固化淤泥中间, 使固化淤泥的强度降低。多余的水分越多, 固化淤泥的强度降低越多, 因此, 在实际的淤泥固化工程中, 在进行固化处理前, 尽可能的降低淤泥的初始含水率对提高固化淤泥的强度和降低处理成本具有重要意义。

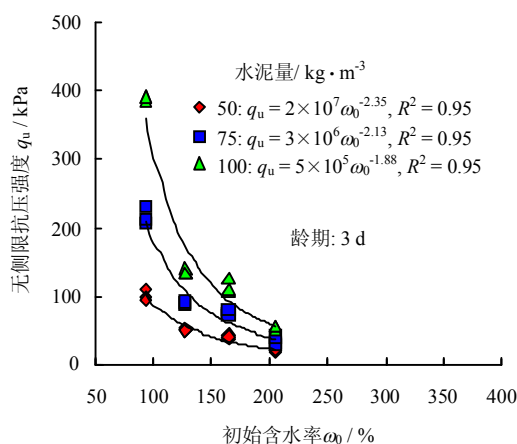


图3 初始含水率与无侧限抗压强度的关系

Fig.3 Effect of initial water content on the unconfined compressive strength

3.3 初始含水率对破坏应变的影响

图4为初始含水率对固化淤泥无侧限抗压强度试验破坏应变的影响。从图中可以看出, 固化淤泥的破坏变形随着初始含水率的增大而增大, 水泥量

越高, 破坏应变越小。图4的规律与图3相对应, 表明强度越高, 破坏应变就越小, 在微观上破坏应变的增加与强度的降低原理相同, 都是由于水分过多, 水化产物量难以支撑填充固化体孔隙, 导致在外力作用下会产生较大的塑性变形。

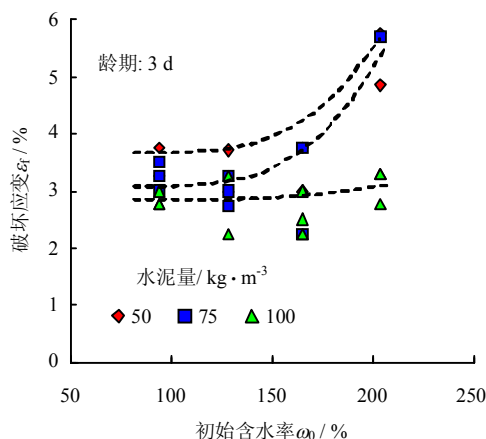


图4 初始含水率与破坏应变的关系

Fig.4 Effect of initial water content on the failure strain

3.4 初始含水率对黏聚力和内摩擦角的影响

图5和图6分别为初始含水率对固化淤泥的黏聚力和内摩擦角的影响。从图5中可以看出, 黏聚力随初始含水率的增加而降低, 与图3中无侧限抗压强度的变化规律相似。由于黏聚力反映了固化淤泥颗粒之间的胶结作用, 由于淤泥本身的黏聚力很小, 加入水泥后黏聚力主要来自于水泥水化产物的作用。随着淤泥初始含水率的增加, 水分超过了水泥水化所需要的水分量时, 水化产物间彼此连接的程度不够, 使得固化淤泥的黏聚力降低。图6中内摩擦角 φ 随初始含水率的变化不明显, φ 的变化范围为15°~32°。

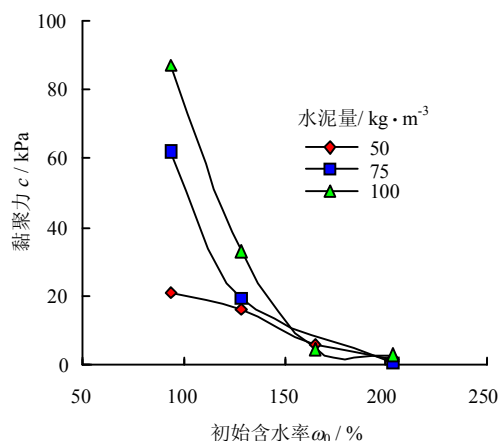


图5 初始含水率对黏聚力的影响

Fig.5 Effect of initial water content on the cohesion

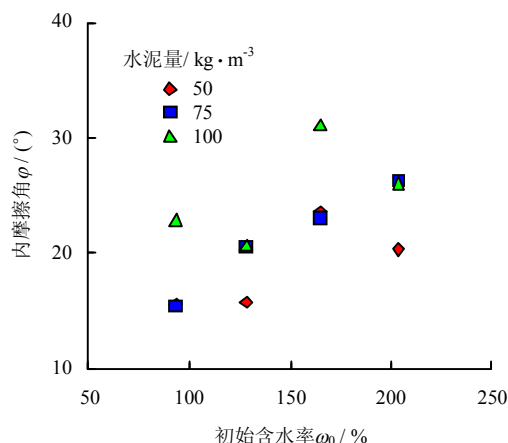


图6 初始含水率对内摩擦角的影响

Fig.6 Effect of initial water content on the friction angle

3.5 初始含水率对固化淤泥强度的影响机理分析

对于水泥加固淤泥,水泥的作用有3种:(1)物理吸水。假如水泥加入淤泥中不发生化学反应,通过在淤泥中加入水泥,可以提高干物质(干土和水泥干粉)的量,相当于物理作用降低了淤泥的含水率;(2)化学反应转化水^[5]。水泥加入淤泥中,将与淤泥中的水分发生反应,生成各种水化产物,将淤泥中部分水分转化到水化产物中,相当于通过反应降低了淤泥中的水分;(3)水化产物的作用。除了前两部分使淤泥含水率降低,固化淤泥的强度更重要的是来源于水泥水化产物的作用。

第(1)、(2)两种作用,对于高含水率淤泥的固化,由于水分量于水泥反应需水量相对充足,二者的量只受水泥量的影响,加入的水泥越多,对淤泥的含水率改变也就越大。淤泥的含水率通过(1)、(2)两种作用降低以后,仍然维持在较高的水平(如表2所示),仅靠含水率的变化,固化淤泥不可能出现图3中的强度。因此固化淤泥的强度主要来源于第(3)种作用。由于在第(2)种作用中有充分的水分供水泥反应,理论上水分越多,水化

反应也会越充分,因此水化产物的量也会越多。但是含水率越高,则固化体中的孔隙就越多,水化产物在单位体积中的数量就越少。因此水化产物由于数量的不足导致了不能有效的填充孔隙、胶结土颗粒和支撑土骨架^[6]。

4 结 论

(1) 淤泥初始含水率对固化淤泥的强度有显著影响,固化淤泥的强度随初始含水率的增加呈幂形式降低。在现场固化施工中,应在满足施工要求(搅拌和流动性)时选择含水率较低的淤泥进行固化处理,在效果和经济性上较优。

(2) 固化淤泥的应力-应变曲线受淤泥初始含水率的影响明显,淤泥初始含水率越高,固化后的塑性越强。

(3) 固化淤泥的黏聚力随着初始含水率的增加而降低,而内摩擦角在15°~32°之间。

(4) 淤泥初始含水率对水泥固化的影响主要不是影响水泥的反应,而是影响单位体积水泥水化产物的量,导致单位体积中水化产物的量过少不能形成较强的整体强度,因而强度随含水率的增加而降低。

参 考 文 献

- [1] TANG Yi-xin, MIYAZAKI Y, TSUCHIDA T. Practices of reused dredgings by cement treatment[J]. *Soils and Foundations*, 2001, 41(5): 129—143.
- [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.
- [3] 李俊才, 周显祥. 软土含水量对粉喷法加固效果的影响[J]. *成都理工学院学报*, 1998, 25(3): 417—421.
- [4] 贾坚. 影响水泥石强度的综合含水量研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2006, 2(1): 132—136, 140.
- [5] ZHU W, ZHANG C L, CHIU A C F. Soil-water transfer mechanism for solidified dredged materials[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2007, 133(5): 588—598.
- [6] 张春雷. 基于水分转化模型的淤泥固化机理研究[博士学位论文 D]. 南京: 河海大学, 2007.

表2 淤泥固化后的含水率值

Table 2 Water contents before and after cement consolidation

初始含水率 / %	水泥量/ kg·m ⁻³		
	50	75	100
93.7	79.6	77.3	74.7
128	127.5	123.3	117.4
165	134.8	132.2	126.4
204	144.8	143.8	134.5