

水泥半固化处理土工程性质研究*

苏晓腾, 杨俊杰**, 董猛荣, 王晓倩, 焦德才

(中国海洋大学 环境科学与工程学院, 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘 要: 半固化处理是疏浚土等软土资源化利用的重要途径。目前国内外学者从物理性质、击实性质和强度性质方面对此类处理土进行了研究,但关于半固化处理土的掺入比的范围没有一个明确的界限或者确定方法。本文通过室内试验,基于处理土的含水量变化规律提出了确定半固化土水泥掺量界限范围的方法,并讨论了位于固化区和半固化区处理土的物理力学性质。结果表明:处理土的含水量随水泥掺入比的增加而降低,掺入比较大时,含水量降低幅度趋于稳定。位于固化区与半固化区处理土物理力学性质具有明显的差异。

关键词: 半固化处理;水泥;含水量;物理性质;力学性质

中图分类号: TQ172

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2020)06-134-07

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20180140

引用格式: 苏晓腾, 杨俊杰, 董猛荣, 等. 水泥半固化处理土工程性质研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(6): 134-140.

SU Xiao-Teng, YANG Jun-Jie, DONG Meng-Rong, et al. Research on engineering properties of cement semi-solidified soil [J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(6): 134-140.

中国幅员广阔,江河湖海众多,疏浚工程是开发、改善和维护航道、港口及湖泊水域的重要手段。疏浚泥是疏浚过程产生的一种高含水量的淤泥。随着港口建设、航道维护、生态环境改善需求的增加,疏浚泥日益增多。为了缓解疏浚泥处置对环境的压力及促进疏浚泥资源的循环利用,人们对疏浚泥开展了大量的资源化利用研究和实践。其中,将水泥等固化剂与疏浚泥混合后作为土工材料用于填筑工程是淤泥资源化利用的一个重要途径^[1]。

半固化处理土是将少量固化剂与疏浚泥等软土拌和,并结合碾压用于填筑工程的可储存可运输可重复利用的土工材料。改性土、材料化处理土^[2]、土壤化土等均可称为半固化处理土。顾名思义,半固化处理土减少了固化剂掺量,降低了工程成本;同时少量的固化剂只是降低了素土的含水量和塑性,使素土呈易于碾压的松散状态,使得碾压后的半固化处理土具有更加密实的结构,强度特性有时甚至优于固化土。

针对半固化土的物理性质,张铁军等^[3]研究了石灰改性疏浚淤泥含水量变化规律,并导入含水量降低率的概念及处理土含水量的预测公式。邓东升等^[4]通

过添加生石灰的方法对高含水量淤泥进行改性处理,结果表明,处理土的塑性指数随掺灰比的增加而降低;当掺灰比大于某一值(10%),塑性指数降低不明显,且处理土的塑性指数降低主要发生在龄期的前3天。桂跃等^[5]研究了闷料期含水量降低率和掺灰比的关系、塑性与闷料期的关系,指出闷料期越长对处理土的干化效果越有利。

针对半固化土的击实特性,Omar等^[6]研究了水泥处理泥灰质土的击实特性,发现处理土的最大干密度随着掺灰比增加而增大,最优含水量随水泥掺入比的增加而降低。王宝田等^[7]研究了不同闷料期对石灰处理土击实效果的影响,结果表明随着闷料期的延长,处理土的最大干密度降低,最优含水量基本不变。桂跃等^[8]采用不同击实方法(超轻型击实、标准击实、重型击实)研究了处理土的击实性质,并提出了利用处理土的含水比来选择击实方法和利用干密度随击实次数变化规律来判断土的击实程度的建议。

另有学者研究了半固化土的强度特性,佐藤厚子等^[9]研究了水泥和石灰处理土的强度特性,明确固化土与半固化土的无侧限抗压强度存在一定关系,且半

* 基金项目:国家自然科学基金项目(51779235);海南省高等学校科学研究项目(7-663);海南热带海洋学院学科带头人和博士研究生科研启动经费项目(HDXB201614)资助

Supported by the Natural Science Foundation of China (51779235); the Universities Scientific Research of Hainan Province(7-663); the Academic Leader and Doctoral Research Start-up Funding Project of Hainan Tropical Ocean College(HDXB201614)

收稿日期:2018-05-10;修订日期:2018-06-03

作者简介:苏晓腾(1992-),男,硕士生,主要从事软土地基处理研究。E-mail:1098373363@qq.com

** 通讯作者:E-mail:jyyang@ouc.edu.cn

固化土的抗剪强度参数可以用无侧限抗压强度表示。时田博之等^[10]通过在淤泥中掺入水泥、石灰和粉煤灰研究其强度特性,发现达到相同的强度,半固化土的经济性优于固化土。何毅等^[11]通过研究半固化土的强度性质与掺入比及闷料期的关系,定性的分析出了疏浚泥半固化处理的水泥掺量的范围。

综上所述,学者们分别从物理性质、击实性质、强度性质三方面对半固化土进行了研究,但是关于半固化处理土的固化剂掺量的范围,只是进行了定性的分析,没有一个量化的指标或方法来确定适合半固化处理的固化剂掺量界限。

本文通过处理土含水量试验、液塑限试验、击实试验和无侧限抗压强度试验,研究了处理土的物理性质及力学性质,提出了基于含水量变化规律的确定半固化处理土水泥掺量界限的方法,并讨论了位于固化区和半固区处理土的物理力学性质。

1 试验方案与试验概况

图 1 为半固化处理土的现场施工工艺及对应的室内模拟试验步骤的示意图。现场施工工艺分为搅拌、储存和运输、压实、养护及强度检测,对应的室内试验以拌和、闷料、击实、标准养护及强度试验进行模拟。半固化处理土的龄期分为两部分,龄期 t_1 为处理土从搅拌到压实所等待的时间,包括储存和运输时间,是半固化处理土的主要特点,室内试验被称之为闷料期。龄期 t_2 为从现场压实到强度检测的养护期,室内则为标准养护时间。影响处理土的物理性质的因素包括素土性质、固化剂掺量和龄期;影响处理土的击实性质和力学性质的因素除上述三种因素外,还包括处理土压实或击实的方式和能量。本文通过室内模拟试验实施了不同土、不同初始含水量、不同水泥掺量、不同闷料期 t_1 的处理土的含水量试验、液塑限试验、击实试验、无侧限抗压强度试验。

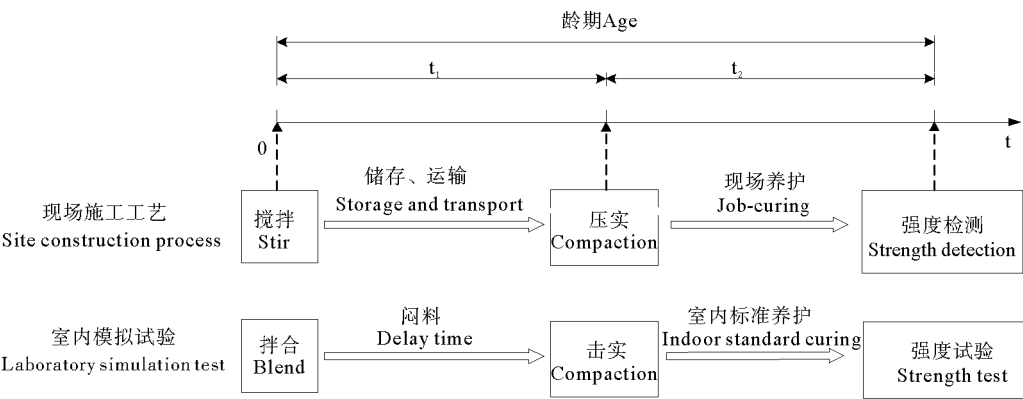


图 1 半固化处理土的现场施工工艺及对应室内模拟试验步骤示意图
Fig.1 Schematic diagram of site construction process and laboratory test

1.1 试验材料

试验所用土样为高岭土、潍坊港疏浚泥、黄河口粉土三种。对试验用土按照《土工试验方法标准》^[12]实施了液限、塑限、比重及颗粒分析试验,得到的物理性质如表 1。根据《建筑地基设计规范》(GB50007—

2011)^[13]的分类方法,高岭土属于黏土,潍坊港疏浚泥属于粉质黏土,黄河口粉土属于粉土。试验用水泥为山东水泥集团有限公司生产的 32.5[#] 普通硅酸盐水泥。高岭土用海水素制备的海水搅拌,潍坊港疏浚泥和黄河口粉土用蒸馏水搅拌。

表 1 试验用土的基本物理性质
Table 1 The basic physical properties of soil are tested

试验用土 The soil in the test	塑限/% Plastic limit	17mm 液限/% Liquid limit	塑性指数 Plasticity index	比重 Specific gravity	砂粒含量/% Gravel content	粉粒含量/% Silt content	黏粒含量/% Clay content
高岭土 ^①	40.9	65.9	25.0	2.75	0	40.4	59.6
潍坊港疏浚泥 ^②	19.7	33.7	14.0	2.72	0.5	71.0	28.5
黄河口粉土 ^③	21.8	27.3	5.5	2.71	3.6	90.3	6.1

Note: ①Kaolin; ②Dredge soil of Weifang; ③Silt in Yellow River Mouth

1.2 试验方案

试验方案如表 2 所示。其中,初始含水量 w_n 为试

验用水的质量与干土质量的比值,水泥掺入比 a_s 为水泥质量除以干土的质量。

表 2 试验方案一览表
Table 2 List of testing program

试验用土 The soil in the test	初始含水量 w_n /% Initial moisture	水泥掺入比 a_s /% Cement ratio	闷料期 t_1 /d Storage period	试验项目 Test project
高岭土 Kaolin	44	2、4、6、8、10、12	0、1、3、5、7	含水量试验、液塑限试验、击实试验、无侧限抗压强度试验 Test moisture, Atterberg limits test, Compaction test, Strength test
	48	2、4、6、8、10、12	0、1、3、5、7	
	65	3、6、9、12、15	0、1、3、5、7	
潍坊港疏浚泥 Dredge soil of Weifang	26	3、6、9、12、15	5、7	含水量试验 Test moisture
	33	3、6、9、12、15	0、1、3、5、7	
	40	3、6、9、12、15	5、7	
黄河口粉土 Silt in Yellow River Mouth	22	2、4、6、8、10、12	5、7	含水量试验 Test moisture
	30	2、4、6、8、10、12	0、1、3、5、7	
	35	2、4、6、8、10、12	5、7	

1.3 试验方法

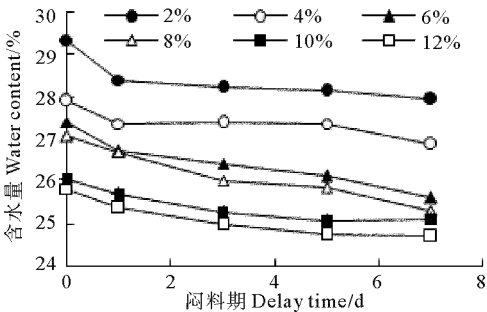
根据试验方案,先将试验用土和水泥放入搅拌桶中人工搅拌,形成干粉混合物,再加入水进行机器搅拌 5~10 min,搅拌完成后将混合物放入密封的塑料桶闷料形成处理土,对达到龄期的处理土进行基本物理性质试验和击实试验,试验按照《土工试验方法标准》^[12]进行。然后根据击实试验的结果,利用密度控制制备无侧限抗压强度试样,将试样击实在高 10 cm,直径 5 cm 的金属模具中后立即脱模并进行无侧限抗压强度试验。

2 基于含水量变化规律确定半固化处理土水泥掺量界限

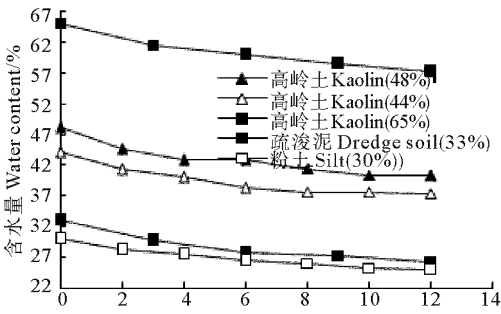
2.1 闷料期、水泥掺入比对处理土含水量的影响

图 2(a)为黄河口粉土处理土含水量随闷料期的变化关系。由图可知,处理土的含水量在短龄期内降低较快,闷料期 5 d 以后,含水量降低幅度变小并趋于稳定,以下研究含水量与水泥掺量的关系时,只分析闷料期 5 d 的含水量变化规律。

图 2(b)为闷料期 5 d 的处理土含水量随水泥掺入比的变化关系。处理土的含水量随水泥掺入比的增加而降低。在本试验条件下,水泥掺入比较小时,含水量降低幅度大,掺入比较大时,降低幅度较小,并趋于稳定。



(a) Variation of water content with delay time



(b) Variation of water content with cement ratio

图 2 闷料期、水泥掺入比对含水量的影响
Fig.2 The influence of cement ratio and delay time on water content

2.2 含水量降低率

为对比不同处理土在不同水泥掺入比下的含水量

的变化趋势,引入含水量降低率^[3]的概念,定义式如下:

$$D_w = \frac{w_n - w_r}{w_n} \times 100\% \quad (1)$$

式中: D_w 为含水量降低率; w_n 为土的初始含水量; w_r 为闷料至指定龄期的处理土的含水量。

图 3 为闷料期为 5 d 处理土的含水量降低率和水泥掺入比的关系。由图可见,掺入比较低时,处理土的含水量降低率随水泥掺入比增长较快,掺入比较大时,增长变缓。

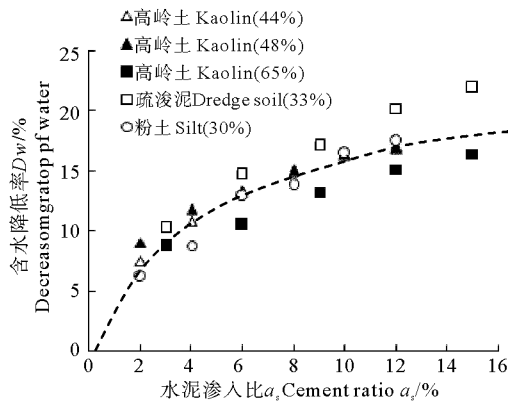


图 3 含水量降低率与水泥掺入比 a_s 的关系

Fig.3 Relationship between decreasing ratio of water and cement ratio

2.3 用双曲线近似方法确定半固化处理土的水泥临界掺入比

处理土的含水量降低率随掺入比的关系曲线与双曲线十分相似,利用双曲线对含水量降低率数据进行拟合,将双曲线的初始切线与渐近线的交点对应的横坐标的水泥掺入比作为处理土的界限掺入比^[14]。拟合公式为:

$$D_w = \frac{a_s}{A + B a_s} \quad (2)$$

式中: a_s 为水泥掺入比(m_c/m_s); D_w 为含水量降低率; A 、 B 为回归系数,可根据试验数据得到回归系数 A 、 B 的数值。

双曲线的回归图如图 4 所示,通过双曲线的初始切线与渐近线计算出: $a_{s0} = \frac{A}{B}$, $D_{w0} = \frac{1}{2B}$ 。

图 5 为与含水量降低率 D_w 的关系图(式(2)变形后进行求导)。由图可知,超过界限掺入比 a_{s0} 对应的 D_{w0} ($0.5/B$) 后, D_w 每增加一点,水泥掺入比急剧增加。结合双曲线的性质,当水泥掺入比小于 a_{s0} 时,处理土的含水量降低随掺入比的变化明显,当水泥掺入比超过 a_{s0} 后,含水量的降低率增长变缓,因此,这个临界掺入比 a_{s0} 将作为半固化处理土与固化处理土的界限值。

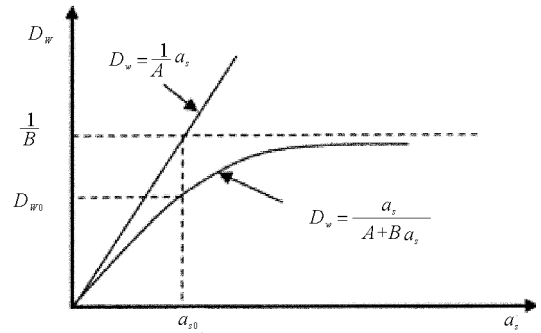


图 4 双曲线回归

Fig.4 Hyperbolic fitting

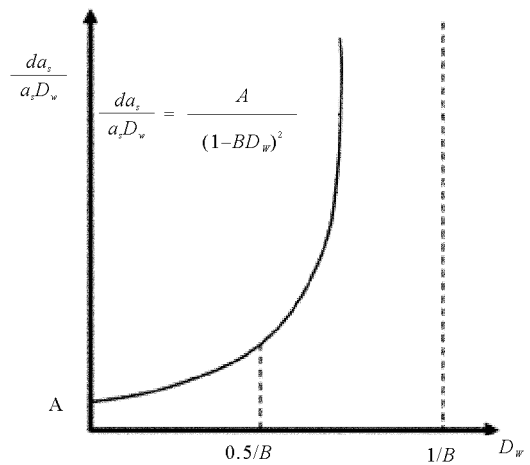


图 5 与含水量降低率 D_w 的关系图

Fig.5 Relationship between decreasing ratio of water and

根据上述双曲线回归方法,对不同处理土的含水量降低率进行了双曲线回归,并根据双曲线的性质计算出处理土的临界掺入比 a_{s0} (初始切线和渐近线交点的横坐标),由于本试验中的水泥掺入比是干土的掺入比 a_s ,即水泥质量与干土质量之比,需将掺入比 a_s 转化为掺入比 a_c ,转化公式为:

$$a_c = \frac{a_s}{1 + w_n} \quad (3)$$

式中: a_c 为水泥掺入比(m_c/m); a_s 为水泥掺入比(m_c/m_s); w_n 为土的初始含水量。

图 6 为计算得出不同处理土界限掺入比 a_{c0} 与含水比的关系图,由图可知,不同处理土的 a_{c0} 与原土的含水比存在线性关系。通过所有数据点线性回归出如下一个公式:

$$a_{c0} = 4.15 a_w \quad (4)$$

式中: a_w 为素土的含水比, $a_w = \frac{w_n}{w_L}$; w_n 为素土的初始含水量; w_L 为素土的 17 mm 液限。

由公式(4)可知,在实际工程应用中,对原土进行

含水量试验和液塑限试验,得出土的初始含水量及液限,就可以计算出该种土半固化处理的水泥掺入比的界限。当处理土的水泥掺入比大于公式计算的掺入比时,处理土为固化土,当掺入比小于计算得出的掺入比时,处理土为半固化土。利用公式(4)对文献[11]中的试验用土($w_n=62\%$, $w_L=53\%$)进行计算求得 $a_{c0}=4.85\%$,此计算值与文章中通过分析试验数据得到的适合半固化处理的掺入比 4.4% 相对应。

图7为利用回归直线画出的处理土的半固化区和固化区的区分图,即在回归线以上部分时,处理土为固化土,回归线以下时,处理土为半固化土。

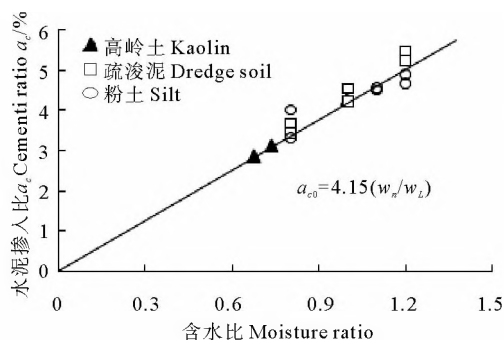


图6 界限掺入比 a_{c0} 与含水比的关系

Fig.6 Relationship between limit ratio of cement and water content

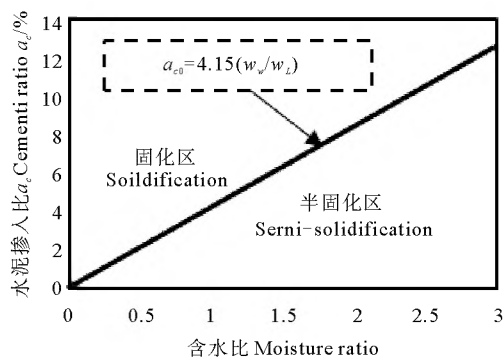


图7 固化与半固化区分图

Fig.7 Differentiation graph between solidification and semi-solidification

3 半固化处理土的物理力学性质

根据试验条件把室内试验的试样点标在上述得出的区分图中(见图8),对比处于固化区和半固化区处理土物理力学性质。

3.1 处理土的液限、塑限和塑性指数

图9为不同闷料期的高岭土处理土的液限、塑限、塑性指数随着水泥掺入比 a_c 的变化曲线。相比于素土的塑限、液限及塑性指数(对应图中由上到下的三条

虚线),处理土的塑限、液限及塑性指数随闷料期变化不明显;塑限随水泥掺入比基本不变;液限和塑性指数随掺入比增大而减小,水泥掺入比较小时(半固化范围),降低幅度较大,水泥掺入比较大时(固化范围),降低趋势趋于平稳。

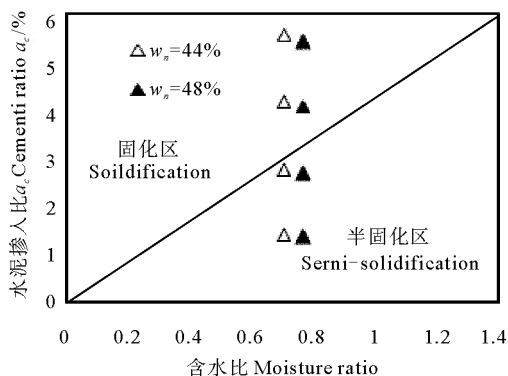


图8 固化半固化区分图

Fig.8 Differentiation graph between solidification and semi-solidification

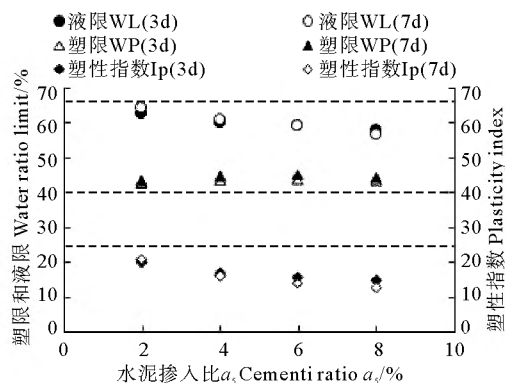


图9 界限含水量及塑性指数随水泥掺入比的变化

Fig.9 Variation of water ratio limit and plastic index with cement ratio

3.2 处理土的击实性质

图10为处理土的干密度随水泥掺入比 a_c (换算后)的变化曲线图,水泥掺入比在半固化区范围内时,干密度随着水泥掺入比 a_c 的增大而增大且增幅比较明显,当水泥掺入比在固化区范围内,处理土的干密度随着掺入比的变化趋势不明显,甚至会随着掺入比的增大而降低,此时的水泥掺量超过半固化处理所需掺量,击实可能对处理土的整体性造成破坏导致干密度不再增加甚至降低。

3.3 处理土的强度性质

图11为处理土的无侧限抗压强度随水泥掺入比 a_c 的变化曲线图,水泥掺入比在固化区范围,无侧限抗压强度随着掺入比的增大而增大,超过半固化范

围在固化范围时,处理土的无侧限抗压强度几乎不再增加甚至出现了强度下降,可知当水泥掺入比超过界限值时,处理土已经基本接近固化程度。

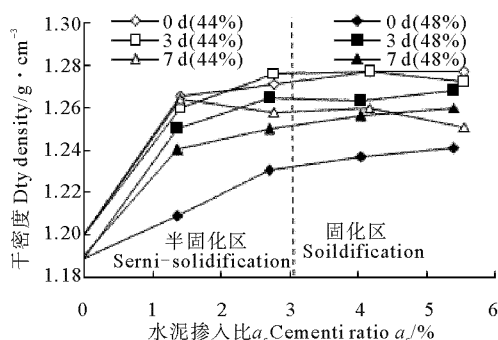


图 10 干密度随水泥掺入比的变化

Fig.10 Variation of dry density with cement ratio

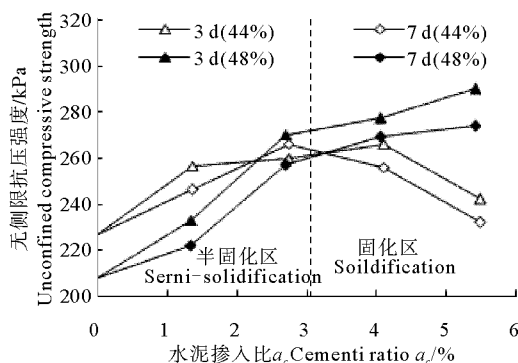


图 11 无侧限抗压强度随水泥掺入比的变化

Fig.11 Variation of unconfined compressive strength with cement ratio

4 结论

本文基于处理土的含水量变化规律,提出了确定半固化处理水泥掺量的界限的方法,并讨论了位于固化区和半固化区处理土的物理力学性质,结论如下:

- (1)处理土的含水量随水泥掺入比的增加而降低,水泥掺入比较小时,含水量降低幅度大,掺入比较大时,在本文试验条件下,含水量降低幅度较小,并趋于稳定。
- (2)提出了利用含水比区分固化和半固化的水泥掺入比界限经验公式及区分图。位于固化区和半固化区的处理土的物理力学性质具有比较明显的差异。固化土和半固化土的界限经验公式或区分图简单实用,可为疏浚泥等软土半固化处理的设计和施工提供理论依据。

参考文献:

- [1] 朱伟,张春雷,高玉峰,等.海洋疏浚泥固化处理土基本力学性质研究[J].浙江大学学报(工学版),2005(10):103-107.

- Zhu wei, Zhang chunlei, Gao yufeng, et al. Fundamental mechanical properties of solidified dredged matine sediment[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2005(10): 103-107.
- [2] 邓东升,张铁军,洪振舜.河道疏浚废弃淤泥改良土的强度变化规律探讨[J].防灾减灾工程学报,2008,28(2):167-170.
- Deng dongsheng, Zhang tiejun, Hong zhenshun. Undrained strength behavior of treated dredged clay with quick lime[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(2): 167-170.
- [3] 张铁军,丁建文,邓东升,等.生石灰处理高含水量疏浚淤泥的含水量变化规律研究[J].岩土力学,2009,30(9):2775-2778+2791.
- Zhang tiejun, Ding jianwen, Deng dongsheng, et al. Change law of water content of dredged clays treated by quick lime[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005(4): 645-649.
- [4] 邓东升,张铁军,张帅,等.南水北调东线工程高含水量疏浚淤泥材料化处理方法[J].河海大学学报(自然科学版),2008(4):559-562.
- Deng dongsheng, Zhang tiejun, Zhang shuai, et al. Technique for utilization of high-water-content dredged clayey soil as fill material for the Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2008(4): 559-562.
- [5] 桂跃,高玉峰,李振山,等.高含水率疏浚淤泥材料化土击实时机选择研究[J].地下空间与工程学报,2010(5):1072-1076.
- Gui yue, Gao yufeng, Li zhenshan, et al. Study on the compaction timing of the quicklime-stabilized dredged sediment of high-water-content[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010(5): 1072-1076.
- [6] Al-Amoudi O S B, Khan K, Al-Kahtani N S. Stabilization of a Saudi calcareous marl soil[J]. Construction & Building Materials, 2010, 24(10): 1848-1854.
- [7] 王宝田,张福海.膨胀土得改良技术与工程应用[M].北京:科学出版社,2008.
- Wang baotian, Zhang fuhai. Improvement Technology and Engineering Application of Expansive Soil[M]. Beijing: Cornell University Press, 2008.
- [8] 桂跃,杜国庆,张勤羽,等.高含水率淤泥生石灰材料化土击实方法初探[J].岩土力学,2010,31(1):127-135.
- Guiyue, Du guoqing, Zhang qinyu, et al. Study of compaction method of lime-stabilized high water content sludge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 127-135.
- [9] 佐藤厚子,西本聪,铃木辉之.固化破碎土的强度特性[R].北海道:第2回中日地盘シンポジウム,2005.
- [10] 时田博之,樱井裕万,长谷国男.高含水不良土を材料とする固化破碎土による盛土施工[R].北海道:北海道技术发表会,2005.
- [11] 何毅,杨俊杰,张富有,等.疏浚淤泥的半固化效果及无侧限抗压强度分析[J].水电能源科学,2012,7:127-129.
- He yi, Yang junjie, Zhang fuyou, et al. Analysis of semi-solidification effect and unconfined compressive strength of dredging spoil[J]. Water Resources and Power, 2012, 7: 127-129.
- [12] 中华人民共和国建设部. GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,1999.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB/

- T50123 1999 Standard for Soil Test Method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [13] 中华人民共和国建设部. GB/50007-2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB/50007 2011 Code for Design of Building Foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [14] Yang J, Ochiai H, Suzuki A, et al. Evaluation of the bearing capacity of geogrid reinforced foundation ground using the velocity field method[J]. Technical Reports of the Kumamoto University, 1994, 43(1-20): 129-148.

Research on Engineering Properties of Cement Semi-Solidified Soil

SU Xiao-Teng, YANG Jun-Jie, DONG Meng-Rong, WANG Xiao-Qian, JIAO De-Cai

(Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The semi-solidification is an important approach for resource utilization of dredged and soft soil. Researches in this kind of treated soil are based on basic physical properties, compaction properties and strength properties by scholars currently. However, there is no clear limit or method for determining the range of blending ratio for semi-solidified soil. In this paper, the basic physical properties, compaction properties and strength properties of semi-solidified soils are studied through laboratory tests. The limit of cement blending ratio of semi-curing treated soil was obtained by the analysis of the change rule of water content and the relevant test data were used to discuss it. The results show that the water content of treated soil decreases with the cement ratio, when the cement ratio is large, the water content decreases slightly. There are obvious differences on physical and mechanical properties between solidified soil and semi-solidified soil by analysis.

Key words: semi-solidification; cement; water content; physical properties; mechanical properties

责任编辑 高 蓓