

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.046



淮河干流香浮段疏浚泥固结度室内试验研究

牟聪, 丁建文, 王恒, 王星, 洪振舜

(东南大学交通学院, 南京 210096)

摘要:针对淮河干流香庙—浮山段高含水率疏浚泥进行了能够测试底部孔压的一维固结试验,研究了土样变形和底部孔压随固结时间的变化规律,探讨了基于太沙基固结理论建立的变形-时间曲线法(Casagrande法)和超静孔压消散法得到的两种固结度的差异性状。结果表明:Casagrande法判断主固结完成时,超静孔压消散没有完成,残余超静孔压约为荷载增量的10%~20%;随着竖向荷载的增加,利用两种方法确定的主固结沉降的差异程度随外加荷载呈半对数线性变化;以真空排水工法为例,分析了基于Casagrande法和超静孔压消散法得到的主固结沉降差异程度。

关键词:淮河;疏浚;固结度;孔压;变形

中图分类号:TU447;U616 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)03-0027-05

Lab experimentations on consolidation degrees of clays dredged from Xiangmiao-Fushan Section of Huaihe River

Mou Cong, Ding Jianwen, Wang Heng, Wan Xing, Hong Zhenshun

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China)

Abstract: A series of one-dimensional consolidation tests were performed on two types of clays dredged from Xiangmiao-Fushan section of Huaihe River with measured pore pressure at specimen base. Based on the experimental data, the difference between the degree of consolidation determined by settlement-time curve fitting method (the Casagrande method) and excess pore pressure dissipation method is investigated. The results show that excess pore pressure is not completely dissipated when the degree of consolidation determined by the Casagrande method reaches 100% and the remaining undissipated is about 10%~20% of the staged loading. Besides, the difference in settlement determined by the two different methods has a semi-logarithmic relationship with the vertical effective stress. In the end, the vacuum drainage preloading is taken as example to investigate the differential magnitude in settlement determined by the two different methods.

Keywords: Huaihe River; dredging; consolidation degree; pore pressure; deformation

收稿日期:2018-09-10

基金项目:国家自然科学基金(51378118);“十二五”国家科技支撑计划(2015BAB07B06)

作者简介:牟聪(1992-),男,主要从事软土地基处理研究,E-mail:cong mou@139.com.

洪振舜(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:zhong@seu.edu.cn.

Received:2018-09-10

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51378118); Twelfth-Five National Science & Technology Program (No. 2015BAB07B06)

Author brief: Mou Cong (1992-), main research interest: soft foundation treatment, E-mail: cong mou@139.com.
Hong Zhenshun (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zhong@seu.edu.cn.

在中国七大江河中,淮河的平原比重、人口密度、受洪水威胁的面积居于首位^[1],为了增强淮河干流的排水防洪能力,河道疏浚是一种常用且有效的措施^[2],河道疏浚泥经常采用堆场存储的方式进行处置^[3]。淮河干流香庙—浮山段(简称淮干香浮段)地处淮河中游,河道底泥以粉质土为主,同时含有粉(细)砂和黏土薄层^[4]。该河段疏浚工程排泥量大,堆场处置需要征用耕地约 330 hm²。堆场吹填过程中,由于水力作用,疏浚泥从进水口到退水口发生颗粒分选,堆场退水口附近的疏浚泥细颗粒含量高、渗透性能差、固结缓慢,即使经过几年的自然沉积晾晒,人员仍难以进场,不能满足还耕的承载力要求^[5-7]。实际工程中常采用排水固结方法以快速提高退水口区域疏浚泥承载力,满足还耕要求^[3,8],固结度是施工控制的重要指标之一^[9]。固结度可以通过超静孔压和变形两种方法确定,Robinson^[10]基于太沙基固结理论,给出了 U_{sc} - U_{ub} 的唯一关系理论线 (U_{sc} 为基于变形-时间曲线得到的土层平均固结度, U_{ub} 为基于底部超静孔压消散得到的对应于土层底部位置的固结度),理论线显示, U_{ub} 大于 35% 时, U_{sc}

与 U_{ub} 呈线性相关。但 Zeng 等^[11] 通过试验研究发现, U_{sc} 与 U_{ub} 之间理论上的唯一关系不成立,其本质原因在于两种方法得出的主固结完成时间不同。

笔者利用能测量试样底部超静孔压的改进型固结仪,对淮河干流香浮段吹填堆场的细颗粒区疏浚泥进行一维固结试验,测试试样底部超静孔压和土体变形随固结时间的变化,研究孔压固结度与变形固结度的差异程度,为淮河干流疏浚泥吹填堆场的排水固结处理技术提供参考。

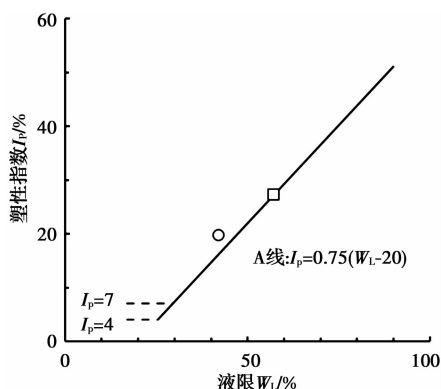
1 试样与试验方案

试验土样取自安徽省蚌埠市五河县的淮河干流蚌埠—浮山段行洪区调整工程香庙—浮山段疏浚施工现场,在距堆场退水口不同距离的两个地点进行取样,分别称为吹填土 A 和 B,土样的基本物理性质如表 1 所示,其中,液限用碟式液限仪测得,塑限用搓条法测得,颗粒级配用密度计法测得。图 1 为试验土样塑性图,吹填土 A 和 B 都位于 A 线之上,均为黏土。

表 1 试验土的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of clay

土样	比重	液限/%	塑限/%	砂粒(0.075~2 mm)/%	粉粒(0.005~0.075 mm)/%	黏粒(<0.005 mm)/%
吹填土 A	2.71	42	22	1	46	53
吹填土 B	2.71	57	30	0	28	72



注: ○ 吹填土 A □ 吹填土 B

图 1 塑性图

Fig. 1 Plasticity chart

河道疏浚泥自重沉积完成后的含水率通常高于液限,处于流动状态。为了模拟疏浚泥固结初始状态,两种吹填土试样的初始含水率配制为 1.4 倍液限左右,分别为 58.5% 和 79.8%。由于试样处于流动状态,需要控制固结试验中的第 1 级荷载,否则将

产生挤土,导致试验失真^[12]。采用 Hong 等^[13] 研发的低应力起始固结仪,第 1 级压力从 0.5 kPa 开始,其后各级压力依次是 1、2、4、8、12.5、25、50、100、200、400、800、1 600 kPa。试验中所用环刀直径为 61.8 mm,高度为 40 mm,采用顶部单面排水,试样底部通过三通阀与水头管和孔压传感器相连,测量试验过程中土样的底部超静孔压。

2 固结度与主固结完成时间变化规律

图 2 为典型的底部超静孔压随固结时间的变化曲线。由图 2 可见,在荷载施加的起始阶段,底部超静孔压随固结时间增加而增大,达到峰值后逐渐消散,峰值小于外加荷载。已有研究将这种现象归结于孔压测量系统刚度不足导致的“延迟效应”^[14-16]。当超静孔压达到峰值后,这种“延迟效应”的影响可以忽略不计^[14-15]。此外,随着竖向荷载的逐渐增大,超静孔压随固结时间变化曲线的形状变得越来越

“陡峭”,说明随着竖向应力的增大,尽管土样的孔隙比和渗透系数逐渐减小,但超静孔压的消散速度逐渐增大。

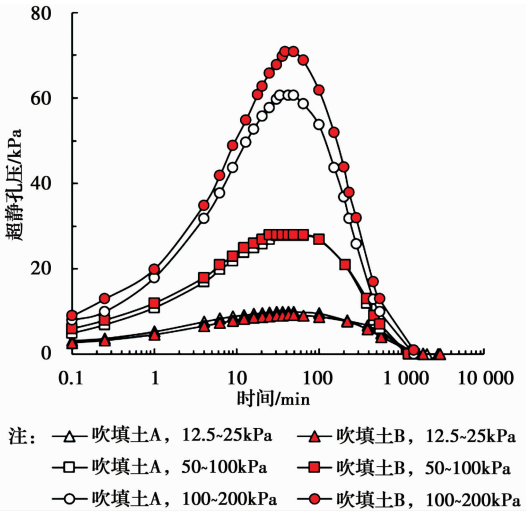


图 2 典型的底部超静孔压随固结时间变化曲线
Fig. 2 Typical variations curves of u_b against logarithm of elapsed time

Taylor 法(时间平方根法)和 Casagrande 法(时间对数法)是经典的变形-时间曲线固结度确定方法,已有研究表明,用两种方法确定的固结度随荷载的变化规律一致^[16]。笔者采用 Casagrande 法分析变形固结度,与用孔压消散法得到的固结度变化规律进行对比分析。

基于 Casagrande 法得到的试样平均固结度 U_{sc} 和基于超静孔压得到的试样底部固结度 U_{ub} 定义为

$$U_{sc} = d_t / \Delta s_{tpc} \times 100\% \quad (1)$$

$$U_{ub} = (\Delta \sigma_v - u_{bt}) / \Delta \sigma_v \times 100\% \quad (2)$$

式中: d_t 和 u_{bt} 分别为对应时间 t 的沉降和底部超静孔压; Δs_{tpc} 为用 Casagrande 法得到的主固结沉降量; $\Delta \sigma_v$ 为荷载增量。

图 3 为吹填土样不同荷载下的典型 $U_{sc}-U_{ub}$ 变化曲线。由于“延迟效应”的存在,图中只列出超静孔压达到峰值以后的结果。如图 3 所示,按 Casagrande 法判断主固结完成时,基于超静孔压得到的试样底部位置固结度 U_{ub} 小于 100%,这表明,基于太沙基固结理论的变形固结度达到 100%时,超静孔压的消散没有完成。从图 3 还可以看出,不同荷载下的 U_{sc} 与 U_{ub} 的关系不唯一,显示了两个特征:一是变形随超静孔压的变化关系是非线性的,二是基于变形-时间曲线和超静孔压得到的主固结完成时间不同,该结果与 Zeng 等^[11] 的结论一致。

图 4 为吹填土样分别基于 Casagrande 法和超静孔压得到的主固结完成时间 t_{pc} 和 t_{pu} 随荷载的变

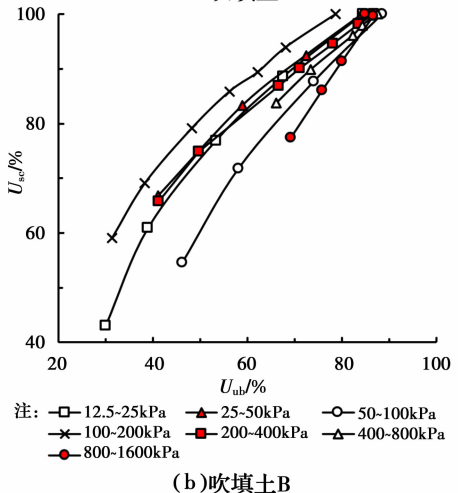
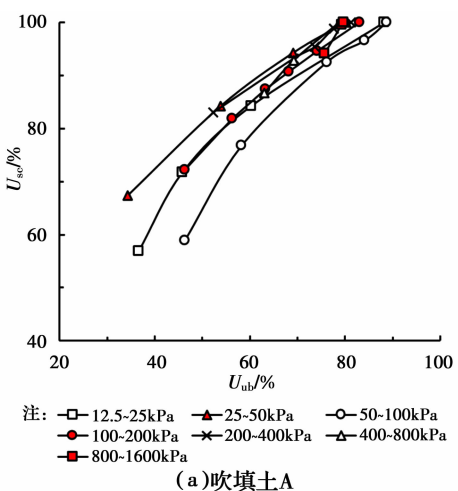


图 3 $U_{sc}-U_{ub}$ 试验曲线
Fig. 3 Experimental curves of U_{sc} against U_{ub}

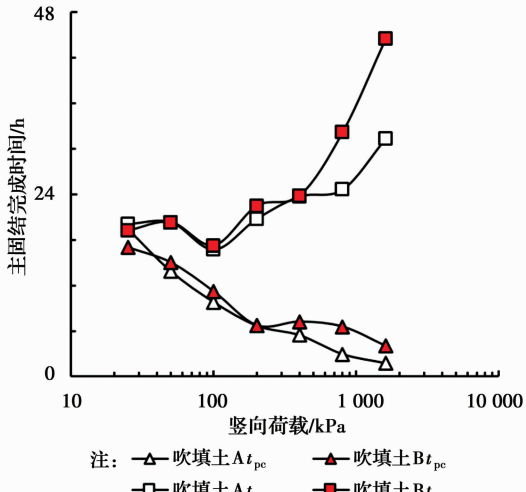


图 4 主固结完成时间 t_{pc} 和 t_{pu} 随荷载的变化规律
Fig. 4 Experimental variations curves of t_{pc} and t_{pu} against vertical effective stress

化规律。随着荷载的增大,同一种土的 t_{pc} 呈明显的减小趋势,而 t_{pu} 则呈明显的增大趋势,也就是基于变形-时间曲线确定的固结度变化规律与基于超静

孔压消散法确定的固结度变化规律相反,Zeng 等^[16]的研究结果也给出了这样的结论。

为了研究两种方法得出的准干香浮段疏浚泥固结度的差异程度,分别对 Casagrande 法判断主固结完成时的残余孔压固结度 D_{utpc} 和用两种方法确定的主固结沉降差异程度 M_{scu} 进行分析。

Casagrande 法判断主固结完成时,残余孔压固结度 D_{utpc} 为

$$D_{\text{utpc}} = u_{\text{btpc}} / \Delta\sigma_v \times 100\% \quad (3)$$

式中: u_{btpc} 为用 Casagrande 法判断主固结完成时对应的底部残余超静孔压。

图 5 为吹填土样 D_{utpc} 随荷载的变化规律。由图 5 可见,随着荷载的变化,两种吹填土的 D_{utpc} 并未呈现出明显的递增或递减趋势,基本在 10%~20% 范围内变化。

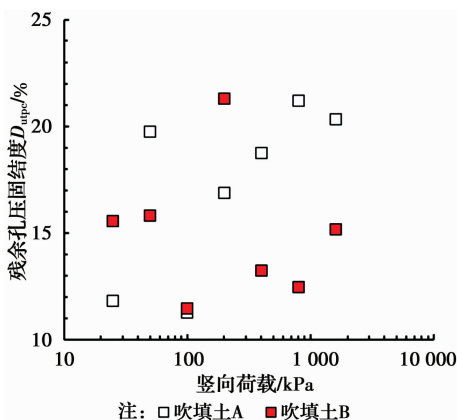


图 5 Casagrande 法判断主固结完成时的残余孔压固结度
Fig. 5 Degrees of remaining pore pressure at the end of primary consolidation determined by the Casagrande method

两种方法确定的主固结沉降差异程度 M_{scu} 定义为

$$M_{\text{scu}} = (\Delta s_{\text{tpu}} - \Delta s_{\text{tpc}}) / \Delta s_{\text{tpc}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: Δs_{tpc} 、 Δs_{tpu} 分别为基于 Casagrande 法和超静孔压消散法得到的主固结沉降量。

图 6 为吹填土样 M_{scu} 随荷载的变化规律。随着荷载的增大, M_{scu} 呈增大趋势,说明采用 Casagrande 法得到的主固结沉降量与基于超静孔压消散法得到的主固结沉降量的差异程度随荷载的增加而增大。

由图 5、图 6 可知,按 Casagrande 法判断主固结完成后的次固结沉降中,相当部分是由残余超静孔压消散引起的主固结沉降,与次固结有本质上的区别。实际工程中,经常采用变形-时间曲线基于太沙基固结理论(如 Casagrande 法和 Taylor 法)确定固结度,按照这样确定的固结度进行施工控制偏于危

险,高估了固结度,低估了变形和强度。

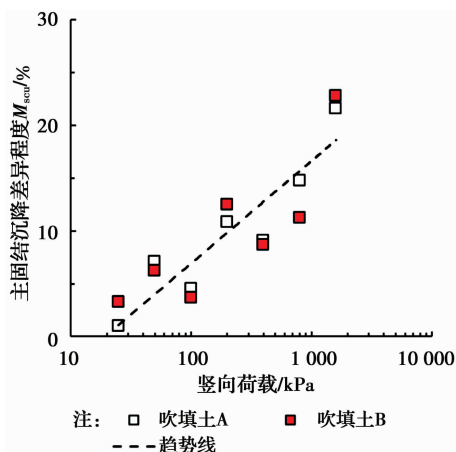


图 6 主固结沉降差异程度
Fig. 6 Discrepancy of primary consolidation settlements determined by the Casagrande method and excess pore pressure

3 工程应用探讨

实际排水固结工程中,经常通过变形(沉降)-时间曲线确定土体的固结度。由试验结果分析可知,基于变形-时间曲线判断主固结完成时,土体中超静孔压消散没有完成,从而高估了固结度,低估了沉降变形,按照这样确定的固结度进行施工控制偏于危险。

图 6 的试验结果显示,两种疏浚泥的主固结沉降差异程度 M_{scu} 与外加荷载的关系线基本一致, M_{scu} 随竖向荷载 σ_v 的变化可以用经验关系式(5)表示。

$$M_{\text{scu}} = 4.2 \ln \sigma_v - 12.5 \quad (5)$$

式中: M_{scu} 的单位为%; σ_v 单位为 kPa。

若采用打设竖向排水板施加真空荷载处理加固退水口疏浚泥,真空预压荷载大小通常为 90 kPa 左右,假定静止土压力系数为 0.5,且不考虑固结过程剪应力的影响,竖向荷载等效为 135 kPa,由式(5)可知,采用 Casagrande 法和超静孔压消散法确定的主固结沉降差异程度约为 8.1%,随着荷载的增大(如真空联合堆载),差异程度必将进一步扩大。

4 结论

基于对已有的变形-时间曲线(Casagrande 法)和超静孔压消散法得出的两种固结度之间关系的认识,针对准干香浮段吹填现场细颗粒区两种疏浚泥进行了能够测试试样底部超静孔压的一维固结压缩试验,得出如下主要结论:

1) 采用变形-时间曲线(Casagrande 法)和超静

孔压消散法得到的两种固结度不存在传统理论的唯一关系,两者差异明显,与 Zeng 等^[11]的研究结果一致。

2)按 Casagrande 法判断主固结完成时,淮干香浮段疏浚泥的残余孔压固结度分布在 10%~20% 范围内。

3)明确了两种方法确定的淮干香浮段疏浚泥主固结沉降差异程度随荷载增加的半对数线性变化规律,分析了采用真空预压方法处理淮干香浮段疏浚泥时两种方法确定的主固结沉降差异程度约为 8.1%。

参考文献:

- [1] 毛世民,许浒. 淮河治理与河湖江海的关系[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(4): 63-66.
MAO S M, XU H. Relationship between Huaihe River, Yellow River, Hongzhu Lake, Yangtze River, and Sea [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(4): 63-66. (in Chinese)
- [2] 郭庆超,韩其为,关见朝. 淮河蚌埠以下河道疏浚对降低洪水位的可行性及长效性研究[J]. 泥沙研究, 2016 (6): 1-7.
GUO Q C, HAN Q W, GUAN J Z. Study on feasibility and long-term effect of bed dredging on lowering flood level in the reach below Bangbu of Huaihe River [J]. Journal of Sediment Research, 2016 (6): 1-7. (in Chinese)
- [3] 吉锋. 高含水率疏浚泥堆场存储能力试验研究与计算模型[D]. 南京:东南大学, 2012.
JI F. Experimental study and modelling on capacity of dredged slurry ponds [D]. Nanjing: Southeast University, 2012. (in Chinese)
- [4] 曹厚增,王浩,徐田春,等. 淮中游晚第四纪沉积工程地质特性研究[J]. 治淮, 2002(4): 10-12.
- [5] 徐桂中,杨瑞敏,丁建文,等. 高含水率疏浚泥堆场颗粒分选规律现场试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(3): 634-638.
XU G Z, YANG R M, DING J W, et al. Field experiment on grain sorting behaviors in reclaimed land of dredged slurries with high water content [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(3): 634-638. (in Chinese)
- [6] 徐桂中. 疏浚泥堆场颗粒分选及其对工程特性影响规

律试验研究[D]. 南京:河海大学, 2013.

XU G Z. Grain sorting behavior of dredged slurries in reclaimed land and its effects on engineering properties [D]. Nanjing: Hohai University, 2013. (in Chinese)

- [7] 杨瑞敏,徐桂中,丁建文,等. 堆场疏浚泥颗粒分选规律及机理[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43 (3): 639-643.
YANG R M, XU G Z, DING J W, et al. Grain sorting laws and mechanisms in reclaimed land of dredged slurries [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(3): 639-643. (in Chinese)
- [8] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社, 2000.
- [9] CHU J, YAN S W, YANG H. Soil improvement by the vacuum preloading method for an oil storage station [J]. Géotechnique, 2000, 50(6): 625-632.
- [10] ROBINSON R G. A study on the beginning of secondary compression of soils [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2003, 31(5): 388-397.
- [11] ZENG L L, HONG Z S, HAN J. Experimental investigations on discrepancy in consolidation degrees with deformation and pore pressure variations of natural clays [J]. Applied Clay Science, 2018, 152: 38-43.
- [12] HEAD K H. Manual of soil laboratory testing. Volume 1: Soil classification and compaction tests [M]. 2nd edition, 1992: 505-508.
- [13] HONG Z S, YIN J, CUI Y J. Compression behaviour of reconstituted soils at high initial water contents [J]. Géotechnique, 2010, 60(9): 691-700.
- [14] PERLOF W, NAIR K, SMITH J. Effect of measuring system on pore water pressures in the consolidation test [C]// Proceedings of the 6th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, 1965: 338-341.
- [15] ROBINSON R G. Consolidation analysis with pore water pressure measurements [J]. Géotechnique, 1999, 49(1): 127-132.
- [16] ZENG L L, HONG Z S. Experimental study of primary consolidation time for structured and destructured clays [J]. Applied Clay Science, 2015, 116/117: 141-149.