

吹填淤泥沉积规律室内试验

曹玉鹏, 吉 锋

(东南大学交通学院岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘要:以福建可门港海相淤泥和江苏白马湖湖相疏浚淤泥为主要研究对象,通过室内自然沉积试验,研究疏浚淤泥在静水条件下的沉积规律,探讨模型尺寸、盐水和淡水 2 种沉积环境以及初始含水率对沉积速率和沉降量的影响,分析疏浚淤泥自然沉积稳定后的含水率变化范围。试验结果表明模型尺寸和初始含水率是影响淤泥泥浆沉积的主要因素,当初始含水率在 3 ~ 10 倍液限时,淤泥泥浆自然沉积完成后其稳定含水率在 2.2 ~ 3.4 倍液限之间。

关键词:吹填淤泥;自然沉积;初始含水率;沉积规律;稳定含水率

中图分类号:TV149.2

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2011)03-0036-04

Model tests on sedimentation behavior of dredged sludge//CAO Yu-peng, JI Feng(*Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

Abstract: Based on the marine sludge from Kemen Harbor in Fujian Province and the dredged sludge from Baima Lake in Jiangsu Province, model tests were performed to investigate the sedimentation rules of dredged sludge in slack water through laboratory natural sedimentation experiments. The influences of model size, sedimentary environments (saline water and fresh water) and the initial water content on the sedimentation rate and amount were discussed. The range of water content after sedimentation stability of dredged sludge was analyzed. The test results indicate that the initial water content and model scale are the main factors for the sedimentation of dredged sludge. The stable water content of dredged sludge is 2.2 to 3.4 times the liquid limit when the initial water content is 3 to 10 times the liquid limit after completion of its natural sedimentation.

Key words: dredged sludge; natural deposition; initial water content; sedimentary behavior; stable water content

在我国,随着港口航道的新建、拓宽和扩建,以及湖泊清淤等工程项目的开展,产生了大量的疏浚淤泥,如深圳铜鼓航道整治工程^[1]疏浚量为 4 650 万 m³;2003 年西湖疏浚^[2]水下底泥方量达 260 万 m³;扬州航道干线^[3]1986—1995 年疏浚淤泥方量达 260 万 m³;上海仅苏州河治理^[4]就需疏浚底泥数十万 m³。目前大多采用的处理方法是堆场贮存。我国一般采用抓斗式或绞吸式挖泥机具进行疏浚,由于施工的扰动,破坏了淤泥的原始结构,使疏浚淤泥具有含水率高、排水性质差、固结时间长的特点,吹填以后要经过很长时间自然沉积才能进行后续施工处理。但目前为止,疏浚淤泥的自然沉积规律尚不清楚,无法判断淤泥自然沉积过程中某一时刻的含水率和自然沉积稳定的时间,从而无法为吹填淤泥的后续施工提供时间参考,以提高堆场的利用率。因此作为基础研究,疏浚淤泥的自然沉积规律研究具有相当重要的现实意义。

对于吹填土的自重沉积过程,一些学者已经开展了试验研究。Imai^[5]将疏浚淤泥的自然沉积分为分散沉降、絮凝沉降、区域沉降和固结沉降 4 种类型。Been 等^[6]通过室内沉积柱试验研究了粉质黏土的自重固结特性,测得不同初始密度的泥水混合物在自重沉积过程中各时刻的密度剖面、超孔隙水压力剖面等分布特征。彭涛等^[7]通过静态落淤试验研究获得了深圳地区吹填淤泥自重沉积固结后的孔隙比范围。詹良通等^[8]对阳离子类型及其浓度对淤泥自重沉积固结过程的影响进行了深入研究。可以发现,这些学者在研究中给出了对密度、孔隙比、超孔压等参数的定量描述,对自然沉积的类型也给出了定性描述,取得了很有意义的成果。但模型尺寸、初始含水率对自然沉积规律的影响研究鲜见报道,也没有给出自然沉积稳定后最终含水率的定量描述。

笔者以福建可门港海相淤泥和江苏白马湖湖相

疏浚淤泥为主要研究对象,通过泥浆的室内自然沉积试验,研究疏浚淤泥在静水条件下的沉积规律以及沉积稳定后淤泥含水率的变化范围,探讨模型尺寸、盐水和淡水 2 种沉积环境以及初始含水率等参数对沉积速率和沉降量的影响,并对疏浚淤泥自然沉积稳定后的含水率变化范围进行统计分析。

1 试验用土及试验方案

试验用土的基本物理指标如表 1 所示,其中液、塑限采用 100 g 锥式液塑限联合测定仪测定,有机质质量分数采用重铬酸钾氧化法测定,黏粒质量分数采用马尔文公司的 MAF5000 激光粒度分析仪测定,相对密度采用比重瓶法测定。

表 1 试验用土的基本物理指标

土 源	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	有机质 质量分数/ $\%$	黏粒 质量 分数/ $\%$	相对 密度
福建可门港	61.1	30.3	1.98	42.0	2.65
江苏白马湖	89.0	38.0	2.80	44.8	2.65

由表 1 可知:2 个地区的疏浚淤泥黏粒质量分数均较高,均超过 40.0%;2 种土的液限和塑性指数也很高,依据《公路土工试验规程》^[9]对土的分类这 2 种土均属于高液限黏性土,工程性质较差;有机质质量分数均小于 3%,可不考虑其影响。福建可门港海水的离子质量分数由等离子体质谱仪测定,结果显示海水的阳离子成分主要为钠离子和镁离子,阴离子中氯离子质量分数最高,硫酸根离子次之。海水密度为 1.02 g/cm³,含盐量(质量分数)为 3%。

本试验研究对福建可门港淤泥用盐水和淡水分别配制 4 种初始含水率 w 分别为 $3w_L$ 、 $4w_L$ 、 $5w_L$ 和 $6w_L$ (对应的含水率分别为 180%、240%、300% 和 360%)的泥浆,然后倒入直径 D 分别为 20 cm、10 cm、7 cm、5 cm 的量筒进行自然沉积试验,泥浆高度控制在 25 cm。对江苏白马湖淤泥同样按照液限的整数倍进行配制,分别为 $3w_L$ 、 $4w_L$ 、 $6w_L$ 、 $8w_L$ 和 $10w_L$,然后倒入标准量筒($D=6.5$ cm)进行沉积试验,泥浆的初始高度控制为 30 cm。试验的每个量筒上贴有透明塑料刻度尺,精确到 1 mm,刻度增加的方向为泥水分界面下沉的方向,按不同时间观察和记录泥水分界面的刻度值。

试验中变化初始含水率是为了研究初始含水率对沉积的影响,区分盐水环境和淡水环境是为了研究沉积环境对沉积的影响,而不同直径是为了研究容器的模型尺寸对沉积的影响;采用 2 种淤泥进行试验是为了对自然沉积模式进行探讨,以及对自然沉积稳定后含水率的变化范围进行统计分析。

2 试验结果分析

2.1 沉积环境对沉积过程的影响分析

将试验记录的泥面在不同时刻的沉降量与相应的时间点绘在直角坐标系上,即可得到各种不同条件下的沉积过程曲线。图 1 给出了多种直径和初始含水率下盐水与淡水环境下的沉积时程曲线。从图 1 中可以看出,同一初始含水率、同一直径时泥浆在盐水环境下比在淡水环境下的沉积速度稍快,具体表现为沉降曲线的斜率较大,但是最终淡水环境下泥浆的沉降量大于盐水环境下的沉降量。这是由于盐水环境下水溶液含盐量较高,其电解质浓度较高,使细颗粒更容易絮凝成团,成为更大的粒团匀速下沉,根据 Stokes 定律,下沉的速度与粒团直径的平方成正比,淤泥在盐水环境下形成的絮团大于淡水环境下形成的絮团,所以盐水环境下淤泥沉降速度较快,但是大粒团堆积时存在大孔隙,并且由于在盐水环境下土颗粒间的静电作用较强,其形成的孔隙结构不易被破坏,致使相比淡水环境盐水环境下的淤泥在沉积稳定后有更大的孔隙,最终的沉降量也较小。

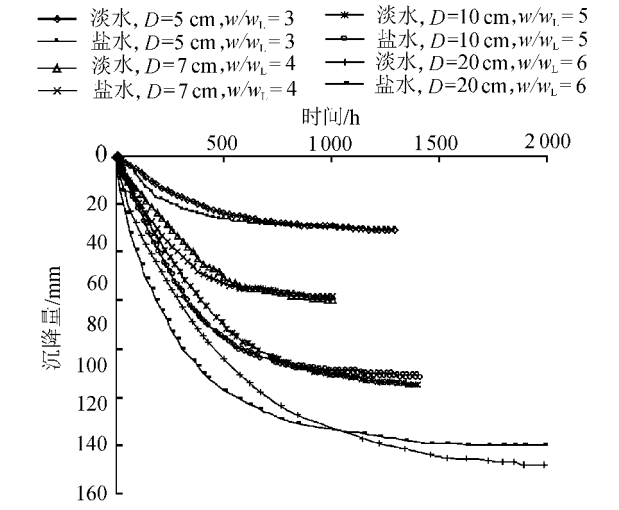


图 1 盐水与淡水环境下的沉积时程曲线

2.2 模型尺寸对沉积过程的影响分析

图 2 给出了同一含水率、同一环境下不同量筒直径时的淤泥沉积时程曲线。对比图 2 中各曲线可以看出,量筒的直径对疏浚淤泥的沉降量有较大的影响,同一沉积环境下淤泥的最终沉降量随着量筒直径的增大而增大,直径越大,在相同时间内的沉降量越大,这主要是由于泥浆在沉积过程中会受到边界摩擦力的影响。在边界条件一致的前提下,单位质量土体所受到的摩擦力与直径成反比,因此,直径越大,边界摩擦力影响越小,沉降量越大。需要指出的是,边界摩擦作用主要对边壁附近的泥浆沉积产

生影响,当容器直径足够大时,直径对沉积的影响必然可以忽略,但从图 2 可以看出,即使容器直径达到 20 cm,仍然不能忽略尺寸因素的影响,因此在进行室内沉积试验模拟实际大面积疏浚淤泥的沉积规律时,必须考虑容器尺寸对沉积的影响,在试验允许的条件下尽量采用大尺寸容器。

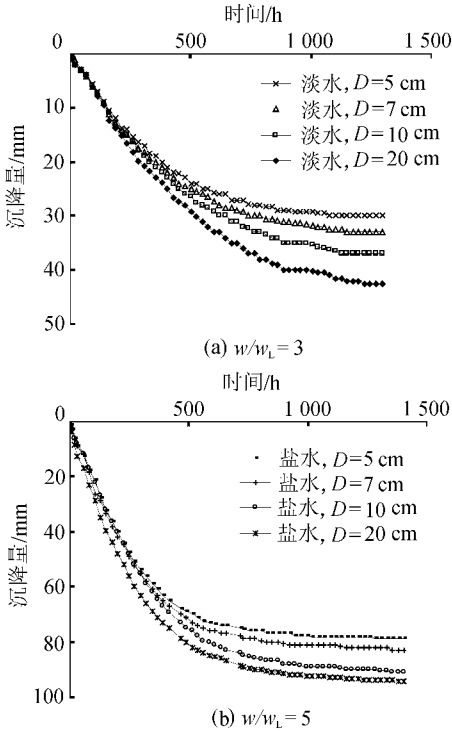
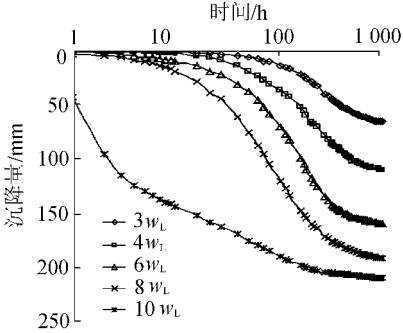
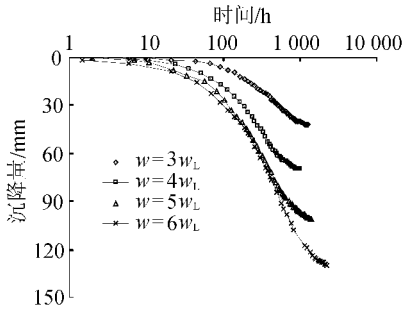


图 2 同一含水率、同一环境下不同量筒直径时的淤泥沉积时程曲线

2.3 初始含水率对沉积过程的影响分析

由于盐水与淡水环境下,不同直径、同一初始含水率的沉降时程曲线变化规律基本一致,类似于土的固结压缩曲线。为简化问题,选取淡水环境、量筒直径为 20 cm 时的福建可门港淤泥沉积时程曲线和江苏白马湖淤泥沉积时程曲线来分析不同初始含水率对沉积的影响,见图 3 和图 4。

由图 3 和图 4 可以看出,泥浆的初始含水率越大,泥面的下沉速度越快,最终的沉降量越大;反之,泥浆的初始含水率越小,泥面的沉积速度越慢,最终沉降量越小,这与刘莹等^[10]的结论一致。同时可以发现,在时间的对数坐标上,2 种淤泥 3 倍、4 倍、5 倍、6 倍和 8 倍液限试样的沉积曲线都成反“S”形,曲线特征符合细颗粒泥浆的沉降模式^[11]。而图 4 中江苏白马湖淤泥 10 倍液限试样的沉降时程曲线呈现“凹”形,这是由于 10 倍液限时试样的浓度小于形成絮网需要的临界浓度,沉降中的细颗粒仅仅形成了絮团,絮团的沉降速度远大于絮网沉降速度,因此该曲线形状不同于其他曲线的形状。宋根培^[12]曾指出,絮网形成的临界含水率要小于 900%,本文



10 倍液限的泥浆试样含水率为 890%,正好在这个临界含水率附近。

2.4 最终含水率统计分析

将沉降稳定后含水率与液限的比值和初始含水率与液限的比值绘图,见图 5。图 5 中 w 为初始含水率, w_c 为稳定含水率, w_L 为液限。从图 5 中可以看出,以 3~6 倍液限为初始含水率的海相淤泥泥浆自然沉积完成时,淤泥的稳定含水率在 2.4~3.4 倍液限之间;以 3~10 倍液限为初始含水率的湖相淤泥泥浆自然沉积完成时,淤泥的稳定含水率在 2.2~2.7 倍液限之间。由此可知,若想降低自然沉积稳定后的施工难度,建议尽量降低疏浚淤泥的初始含水率,以提高疏浚淤泥的浓度。

总体来看,海相疏浚淤泥沉积稳定时含水率的变化范围要大于湖相疏浚淤泥,这与海相淤泥沉积时形成的絮凝结构有关。经过统计可以发现,以 3~10 倍液限为初始含水率的淤泥泥浆(海相和湖相)自然沉积完成时含水率变化范围在 2.2~3.4 倍液限之间。由此可见,沉积稳定后的含水率仍然很高,由于在自重状态下固结速度缓慢,含水率仍会居高不下,需要其他工程措施来加速排水,比如打设排水板或砂井、进行真空预压或堆载预压。

3 结 语

对福建可门港和江苏白马湖疏浚淤泥进行室内静水沉积试验,探讨模型尺寸和沉积环境对淤泥沉积的影响,分析初始含水率对淤泥自然沉积特性的

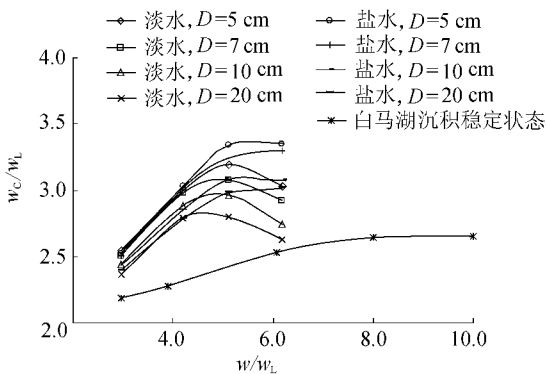


图5 沉积稳定后含水率与液限的关系

影响,统计了自然沉积稳定后含水率的变化范围。研究表明:①盐水环境下淤泥的沉积速度稍大于淡水环境下的沉积速度,但最终淡水环境下的沉降量大于盐水环境下的沉降量。②量筒的直径对疏浚淤泥的沉降量有较大的影响,直径越大,相同时间内的沉降量越大。③初始含水率是影响淤泥泥浆沉积的重要因素,初始含水率越高,泥面沉积速度越快,最终的沉降量也越大;当初始含水率达到临界含水率 890% 时,沉积时程曲线不符合典型细颗粒泥浆沉降模式。④初始含水率在 3~10 倍液限时,淤泥泥浆自然沉积完成时淤泥的稳定含水率在 2.2~3.4 倍液限之间。

本试验研究可明确吹填工程中含水率的稳定时间及变化范围,为淤泥的工程措施处理提供理论支撑及施工时间参考。试验还揭示了自重固结后淤泥

含水率仍较高,建议采取工程措施加快淤泥排水,以缩短工期。

参考文献:

- [1] 赖永辉,谈广鸣,王军.深圳港西部港区进出港航道工程疏浚泥水抛泥沙输移扩散规律研究[J].武汉大学学报:工学版,2006,39(3):41-45.
- [2] 俞亚南,张仪萍.杭州西湖疏浚底泥工程性质试验研究[J].岩土力学,2004,25(4):579-582.
- [3] 张力平.疏浚淤泥的综合利用[J].水运工程,1996(3):22-27.
- [4] 张旭东,祁继英.疏浚底泥的资源化利用[J].北方环境,2005(2):48-50.
- [5] IMAI G. Setting behavior of clay suspension[J]. Soil and Foundation,1980,20(2):61-77.
- [6] BEEN K, SILLS G C. Self-weight consolidation of soft soils: an experimental and theoretical study[J]. Geotechnique, 1981, 31(4):519-535.
- [7] 彭涛,武威,黄少康,等.吹填淤泥的工程地质特性研究[J].工程勘察,1999(5):1-5.
- [8] 詹良通,董军,徐洁.吹填土自重沉积固结特性试验研究[J].水利学报,2008,39(2):201-205.
- [9] JTGE40—2007 公路土工试验规程[S].
- [10] 刘莹,王清.江苏连云港地区吹填土室内沉积试验研究[J].地质通报,2006,25(6):762-765.
- [11] 王尚毅.细颗粒泥沙在静水中的沉降运动[J].水利学报,1964(5):20-29.
- [12] 宋根培.混合沙沉降特性的试验研究[J].泥沙研究,1985(2):40-49.

(收稿日期 2010-11-03 编辑 骆超)

(上接第 23 页)

- [18] MONAGHAN J J, KOCHARYAN A. SPH simulation of multi-phase flow[J]. Computer Physics Commun, 1995, 87(1/2): 225-235.
- [19] MONAGHAN J J. Implicit SPH drag and dusty gas dynamics[J]. Journal of Computational Physics, 1997, 138(2):801-820.
- [20] CLEARY P W. Modelling confined multimaterial heat and mass flows using SPH[J]. Applied Mathematical Modelling, 1998, 22: 981-993.
- [21] RICHIE B W, THOMAS P A. Multiphase smoothed particle hydrodynamics[J]. Mon Not R Astron Soc, 2001, 323(3):743-756.
- [22] COLAGROSSI A, LANDRINI M. Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics[J]. Journal of Computational Physics, 2003, 191(2):448-475.
- [23] 韩旭,杨刚,龙述尧.SPH 方法在两相流动问题中的典型应用[J].湖南大学学报:自然科学版,2007,34(1):28-32.
- [24] GÓMEZ-GESTEIRA M. Green water overtopping analyzed with a SPH model[J]. Ocean Engineering, 2005, 32: 223-238.
- [25] LANDRINI M, COLAGROSSI A, TULIN M P. Breaking bow and stern waves: numerical simulations[EB/OL].[2001-04-22]. <http://www.iwwfb.org/Abstracts/iwwfb16/iwwfb16.23.pdf>.

- [26] BENEDICT D R, DALRYMPLE R A, GESTEIRA M, et al. SPH for naval hydro-dynamics[EB/OL].[2003-04-06]. <http://www.iwwfb.org/Abstracts/iwwfb18/iwwfb18.43.pdf>.
- [27] SOUTO A, DELORME L, PÉREZ-ROJAS L, et al. Liquid moment amplitude assessment in sloshing type problems with smooth particle hydrodynamics[J]. Ocean Engineering, 2006, 33:1462-1484.
- [28] MÚLLER M, SCHIRM S, TESCHNER M. Interactive blood simulation for virtual surgery based on smoothed particle hydrodynamics[J]. Technology and Health Care, 2004(12): 25-31.
- [29] VALIZADEH A, SHAFIEEFAR M, MONAGHAN J. Modeling two-phase flows using SPH method[J]. Journal of Applied Sciences, 2008, 8(21):3817-3826.
- [30] ROUBISOVA V, KAHAVITA R. The SPH technique applied to free surface flow[J]. Computers & Fluids, 2006, 35(10): 1359-1371.
- [31] SWEDE J W, HICKS D L, ATTAWAY S W. Smoothed particle hydrodynamics stability analysis[J]. Journal of Computational Physics, 1995, 116(1):123-134.
- [32] 郑兴,段文洋.光滑质点流体动力学(SPH)及其算法特性[J].船舶力学,2008(8):550-559.

(收稿日期 2010-10-12 编辑 骆超)