DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.02.009

谢瑞, 姬昌辉, 王永平. 湖泊底泥絮凝沉降试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2015(2): 55-60. (XIE Rui, JI Chang-hui, WANG Yong-ping. Experimental studies of flocculaton settling of sediment from three lakes[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015 (2): 55-60.)

湖泊底泥絮凝沉降试验研究

谢 瑞, 姬昌辉, 王永平

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要:湖泊底泥的运动过程产生了内源污染,加剧了湖泊生态环境的恶化。研究湖泊底泥在风浪作用下悬浮 后再沉降的运移规律,可为了解湖泊水质变化成因以及开展生态环境治理提供技术支持。本课题采用有机玻 璃制作的沉降桶,在静水条件下对太湖、龙感湖、巢湖的底泥进行了沉降试验,研究3个湖泊的水体在不同初始 含沙浓度和不同水深条件下含沙浓度的变化,分析了3个湖泊淤泥的沉降规律,近似代表天然湖泊的底泥运动 状态。试验研究表明3个湖泊水体中悬浮泥沙的沉降均为絮凝沉降,其沉降过程和沉速与单颗粒泥沙相比均发 生了量和质的变化,悬浮泥沙絮凝平均沉速随沉距、含沙浓度的增大而增大。最后得出3个湖泊底泥的沉降速 度,其研究结果可为采用絮凝沉降法改善水质环境提供参考依据。

关键 词:湖泊底泥;含沙浓度;沉速;絮凝;沉降试验

中图分类号: TV142 文献标志码: A 文章编号:1009-640X(2015)02-0055-06

太湖位于江苏省南部,浙江省北部,是中国第二大淡水湖;龙感湖位于湖北省和安徽省交界处,是一个淡 水湖泊;巢湖位于江淮之间,地处合肥、巢湖两市和肥东、肥西、庐江三县境内,是中国著名的五大淡水湖之 一。淡水湖泊是鱼、虾、贝类等养殖业的重要基地,但是随着经济的发展,工业污染的加重,湖泊富营养化日 趋严重。现在太湖、巢湖几乎每年夏季都有蓝藻水华爆发[1],破坏水体景观,影响湖泊的生态环境和周边地 区供水,制约周边地区的经济发展。湖泊底泥的运动过程产生了内源污染,加剧了湖泊生态环境的恶化,本 课题研究上述3个湖泊淤泥在风浪作用下起动、掀起悬浮后的沉降规律^[2]。对于悬浮后的泥沙运动特性,重 点研究悬浮水体中泥沙的絮凝沉降速度的变化以及随着初始悬沙浓度不同而产生的变化特征。泥沙在水中 的沉速是标志泥沙运动特征的一个重要物理量。通常所谓的泥沙沉速,是以单颗粒泥沙在静止的蒸馏水或 离子水中下沉的情况^[3]。但对于粒径 D₅₀<0.03 mm 的细颗粒泥沙,在一般的河水中,特别是在海水、湖水 中,这样的细颗粒泥沙下沉并非是单颗粒下沉,而是产生所谓絮凝沉降,即以单颗粒泥沙包成一团下沉,其实 际沉降速度远大于单颗粒泥沙沉降速度[4]。细颗粒泥沙絮凝沉降在机理和形态上分为不同性质的3个区 段。根据湖泊水体含沙浓度的实际情况,在不同的风浪条件下,其水体平均含沙浓度一般小于 2.0 kg/m³。 因此,沉降试验着重研究淤泥的絮凝沉降段的规律和特征。从三湖的地理位置来看,虽相距较远,但底泥的 泥沙特性相似,均属于细颗粒泥沙范畴。通过静水沉降试验,研究底泥的沉降速度,进而认识到湖泊底泥在 风浪掀沙后再沉降规律,其沉降速度包含有生物絮凝因素,为开展湖泊水质变化成因分析以及风浪作用下水 环境变化预测分析提供参考依据,也为采用絮凝沉降法改善水质条件提供参考[5]。

基金项目:水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201301068)

收稿日期: 2014-08-22

作者简介:谢 瑞(1964-),男,安徽六安人,高级工程师,主要从事河流动力学研究。E-mail:rxie@nhri.cn

1 底泥特性

试验用底泥采样共4个样品,其中太湖和龙感湖各1个、巢湖2个。太湖底泥采自于太湖梅梁弯,龙感 湖底泥采自于龙感湖湖心部位,巢湖的底泥采自于靠近湖岸边和湖心区附近。4个取样深度均位于湖底表 层,从淤泥外观颜色来看,太湖泥呈暗灰色,龙感湖和巢湖泥呈土黄色;从中值粒径大小来看,均属于黏性细 颗粒泥沙范畴(淤泥粒度分析见表1)。淤泥中含有微生物,在水槽试验过程中,从自然沉降泥面上可以看到 有微生物活动的痕迹。因此,湖泊淤泥的沉降应包含生物絮凝的因素。

Tab. 1 Particle diameter of sediments							
泥 样	D_{60}	D_{50}	D_{10}	泥 样	D_{60}	D_{50}	D_{10}
太湖	—	0.009	_	巢湖(1)	0.009	0.007	0.001
龙感湖	—	0.007	_	巢湖 (2)	0.012	0.010	0.001

表1 淤泥粒径

2 絮凝沉降特征

早在 20 世纪 30 年代,针对自来水净化问题,即开展了水质化学成分和含沙浓度对细颗粒泥沙絮凝沉降 影响的研究。进入 60—70 年代,对于细颗粒黏性泥沙絮凝沉降,有许多学者进行过深入细致的研究。例如, 严镜海和黄建维^[6-8]对连云港、长江口泥沙的絮凝沉降,从泥沙颗粒间的碰撞几率与吸引势能大于排斥势能 分析入手,得出了细颗粒泥沙产生絮凝的条件,建立絮凝沉速计算式。细颗粒泥沙絮凝机理的研究表明,絮 凝机理应包括化学的、生物的和物理方面的原因^[9]。针对港口、河口泥沙冲淤问题,国内外许多学者开展了 海水中细颗粒泥沙絮凝沉降的大量试验,总结其规律和特征,分析了絮凝沉速与含沙浓度、海水含盐度以及 水温的关系,成果被广泛纳入港口规范和泥沙手册中。对于湖泊中由于长期污染产生大量有机质引起生物 絮凝的研究较少。黄建维等^[10-11]分别在 2002 年和 2006 年,对太湖淤泥的静水沉降进行了初步研究,得出 随着含沙浓度的不同,按淤泥沉降机理和性态,大致可分为以下 3 种不同性质的区段,也有描述为直线段,过 渡段和压缩段^[12]:①絮凝沉降段(水体初始含沙浓度 *S*₀=0.004 6~10.6 kg/m³),该区段由于含沙浓度较低, 泥沙颗粒以絮团方式沉降,絮团沉速远大于单颗粒沉速;②群体沉降段(*S*₀=11~160 kg/m³),该区段含沙浓 度增大,泥沙颗粒羁绊成一整体结构,在沉降性态上形成有清浑水交界面的匀速沉降;③密实沉降段(*S*₀> 160 kg/m³),群体沉降段以后,含沙浓度进一步增大,泥沙沉降缓慢且呈非线性变化,在长期沉降过程中逐步 排除其中的自由水,是一个缓慢的密实过程。

3 试验和计算方法

本文研究低含沙浑水泥沙的絮凝沉降段,其试验和计算方法与测定浑水含沙浓度的垂线分布相类似。 悬浮泥沙在静水中的沉降属于一维泥沙运动过程,因此可以在实验室中用沉降筒来模拟泥沙的沉降过程,试 验自浑水沉降开始到泥沙完全沉降为止,约为3h,试验水温约15℃。

浑水体中含沙浓度的测定方法有多种,例如:光电法、比重瓶法和烘干法等。由于光电法、比重瓶法简单 方便,因此常用此法测定浑水体含沙浓度。比重瓶法精度高于光电法,两种方法同时使用,以比重瓶法为主, 并用其校核光电法。在沉降分析法中,大致有液体比重计法、吸管法和累计重量法等。比重计法精度较差, 对于测定小含沙浓度下的絮凝沉降,吸管法和累计重量法较为常用。

1961 年 T. McLaughlin 从输沙平衡方程式得出,在静水条件下泥沙浓度、沉速的变化满足下列方程式: $\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial (\sigma s)}{\partial z} = 0$,在该式中对 z 积分^[4]得: $(\sigma s)_{z=H} = -\int_{0}^{H} \frac{\partial s}{\partial t} dz = -\frac{\partial}{\partial t} \int_{0}^{H} s dz$ 。

在沉降试验中,通过测定不同时间含沙浓度的分布,运用上式,采用图积分 方法,即可求出不同 Z 处的平均沉速 σ 随时间的变化,此为 T.McLaughlin 的 "重复深度吸管法"。本研究采用重复深度吸管法。按测定方法要求,采用有机 玻璃制作了高2m,直径0.5m的圆筒,圆筒自下向上每隔0.2m开一直径 0.005 m 小孔安装软管,其结构见图 1。试验开始时,人工充分搅拌浑水体使初 始含沙浓度均匀。通过上、中、下取样测定,含沙浓度均匀后开始计时试验。每 隔一定时间,通过软管取出少许浑水,用光电法、比重瓶法测定浑水体含沙浓 度,并且两种方法同时使用,相互校核。

沉降试验 4

4.1 试验概况

沉降试验的浑水体由原湖泊泥样配置而成,考虑实测太湖等大风天8m/s 的风速持续1h以后的水体含沙浓度最大可以达到2.58 kg/m^{3[13]},因此试验的 初始含沙浓度选定在 $S_0 = 0.08 \sim 2.80 \text{ kg/m}^3$ 范围以内。试验配置了近 8 组不同 初始含沙浓度的浑水,每个泥样进行了8组试验。各泥样沉降试验的初始含沙 Fig.1 Sketch of settling cylinder 浓度见表2。

表 2 沉降试验初始含沙浓度

Tab. 2 Initial sediment concentration									$(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
泥 样	太 湖	龙感湖	巢 湖(1)	巢 湖(2)	泥 样	太 湖	龙感湖	巢 湖(1)	巢 湖(2)
1	2.32	2.75	2.79	2.70	5	0.38	0.20	0. 24	0.35
2	1.20	1.20	1.54	1.66	6	0.30	0.14	0.14	0. 22
3	0.78	0.78	0.88	0.82	7	0.18	0.07	0.08	0.11
4	0.54	0.41	0. 49	0.61	8	0.08	_	-	0.07

4.2 试验结果及分析

三湖四泥的絮凝沉速值见表 3, w, w, 和 w, 是分别对应沉距为 50, 70 和 170 cm 的沉速。不同起始含沙浓 度下的沉速变化过程见图 2。从表 3 和图 2 中可见, 5,接近 5, 5,可以作为天然水深下的泥沙絮凝沉速。

表3 絮凝沉速统计

Tab. 3 Flocculating settling velocities

 $(\mathrm{cm}\cdot\mathrm{s}^{-1})$

				龙感湖				
$S_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$oldsymbol{arphi}_{ m l}$	ϖ_2	\overline{w}_3	$S_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$oldsymbol{\sigma}_{\mathrm{l}}$	$oldsymbol{\varpi}_2$	$oldsymbol{arpi}_3$	
2.32	0.057	0.127	0.129	2.75	0.091	0.124	0.138	
1.20	0.017	0.031	0.041	1.20	0.033	0.073	0.100	
0.78	0.008	0.013	0.014	0.78	0.024	0.046	0.063	
0.54	0.006	0.007	0.011	0.41	0.016	0.028	0.035	
0.38	0.005	0.007	0.010	0.20	0.013	0.023	0.030	
0.30	0.004	0.007	0.009	0.14	0.010	0.019	0.022	
0.18	0.003	0.006	0.008	0.07	0.007	0.013	0.018	
0.08	0.002	0.005	0.007	_	-	-	-	



图 1 沉降筒示意

(续表)								
巢湖(1)				巢湖(2)				
$S_0/(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^{-3})$	$oldsymbol{arphi}_{ m l}$	$oldsymbol{arphi}_2$	\overline{w}_3	$S_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	${oldsymbol arpi_{ m l}}$	\overline{w}_2	\overline{w}_3	
2.79	0.119	0.153	0.162	2.70	0.060	0.122	0.126	
1.54	0.083	0.122	0.142	1.66	0.042	0.092	0.113	
0.88	0.046	0.071	0.091	0.82	0.014	0.031	0.040	
0.49	0.016	0.028	0.040	0.61	0.012	0.027	0.034	
0.24	0.011	0.023	0.035	0.35	0.011	0.016	0.022	
0.14	0.010	0.020	0.031	0.22	0.010	0.015	0.022	
0.08	0.009	0.019	0.030	0.11	0.009	0.013	0.021	
-	_	-	_	0.07	0.008	0.012	0.019	



图 2 3 个湖泊底泥沉速与含沙浓度及沉距的关系

Fig. 2 Relationships between settling velocities and sediment concentration and depths of 3 lakes

从沉速与起始含沙浓度来看,在絮凝沉降段初期,浑水体泥沙颗粒有一个相互碰撞的过程,初期颗粒沉 速较小,待形成絮团后,沉速加大。随着含沙浓度的增加,泥沙颗粒絮凝碰撞几率增加,沉速也有逐渐增大的 过程。絮凝沉降速度随着沉距的增大而增大,由沉速变化过程可以看出: $\varpi_3 > \varpi_2 > \varpi_1$ 。细颗粒泥沙絮凝沉降 过程比较复杂,在絮团沉降时沉速加大的同时受到水体阻力也在加大,其过程是一个变速运动的过程,因此 观测计算的沉降速度为最终沉降后的平均速度。

对于单颗粒泥沙的沉降速度一般按 Stokes 公式计算, 黏性细颗粒泥沙(*d*<0.1 mm, *R*_{ed}<0.5)应修订为 如下表达式:

$$\boldsymbol{\varpi} = \frac{1}{24} \frac{r_{\rm s} - r}{r} g \frac{d^2}{\nu}$$

其中:r,为泥沙的密度;r为水的密度;v为水流运动黏滞系数;g为重力加速度;d为泥沙颗粒粒径。

经计算,太湖,龙感湖,巢湖(1)和巢湖(2)4种泥样,对应 D₅₀为0.0090,0.0070,0.0070和0.0100 mm 时,单颗粒沉降速度分别为0.0061,0.0037,0.0037和0.0075 cm/s。

从单颗粒泥沙沉速与絮凝沉速的比较来看,在试验初始含沙浓度范围内,太湖、龙感湖和巢湖水体泥沙 絮凝沉速分别是单颗粒沉速的1.1~21.1倍,4.9~37.3倍和8.1~43.8倍。当浑水体含沙浓度很小时,例如 S₀<0.08 kg/m³时,泥沙颗粒碰撞几率很小,基本不发生絮凝现象,浑水体内细颗粒泥沙的沉速基本接近单颗 粒沉速。

5 结 语

对于湖泊淤泥静水沉降特性,本文只试验研究了低含沙浓度下的沉降特性,沉降特性均属于底泥的絮凝 沉降段。湖泊底泥静水沉降特性试验表明:太湖、龙感湖和巢湖3个湖泊水体中悬浮泥沙的沉降均为絮凝 沉降,其沉降过程和沉速同单颗粒泥沙相比均发生了量和质的变化,絮凝沉速远大于单颗粒泥沙的沉速。

在风浪掀沙后,当太湖水体初始含沙浓度为 2.32 kg/m³时,其水体泥沙絮凝沉速为 0.129 cm/s;当龙感 湖水体初始含沙浓度为 2.75 kg/m³时,其水体泥沙絮凝沉速为 0.138 cm/s;当巢湖水体初始含沙浓度为 2.79 kg/m³时,其水体泥沙絮凝沉速为 0.153 cm/s;当巢湖水体初始含沙浓度为 2.70 kg/m³时,巢湖(2)水体 泥沙絮凝沉速为 0.126 cm/s。

湖泊水体中悬浮泥沙絮凝平均沉速随沉距、含沙浓度的增大而增大。含沙浓度很小时(S₀ < 0.08 kg/m³),其沉速基本接近单颗粒沉速。当初始含沙浓度约 2.5 kg/m³时,太湖水体泥沙絮凝沉速约是单颗粒泥沙沉速的 20 倍,龙感湖水体和巢湖水体泥沙絮凝沉速约为单颗粒泥沙沉速的 40 倍。

参考文献:

- [1] 秦伯强.太湖水环境面临的主要问题、研究动态与初步进展[J].湖泊科学,1998, 10(4):1-9. (QIN Bo-qiang. A review and prospect about the aquatic environment studies in Taihu Lake[J]. Journal of Lake Science, 1998, 10(4):1-9. (in Chinese))
- [2] 洪大林,高亚军,谢瑞. 湖泊淤泥运移规律的研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2005. (HONG Da-lin, GAO Ya-jun, XIE Rui. A study of lake sediment transport law[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2005. (in Chinese))
- [3] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版杜, 1983. (QIAN Ning, WAN Zhao-hui. Mechanics of sediment transport [M]. Beijing: Science Press, 1983. (in Chinese))
- [4] 关许为,陈英祖,杜心慧. 长江口絮凝机理的试验研究[J]. 水利学报, 1996(6):70-74. (GUAN Xu-wei, CHEN Ying-zhu, DU Xin-hui. Experiment study on mechanism of flocculation in Yangtze estuary[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996(6): 70-74. (in Chinese))
- [5] 何静, 吕志刚, 彭嘉培. 絮凝沉降法在河湖底泥处理中对水质的影响[J]. 环境科技,2009,22(2):46-47,50. (HE Jing, LV Zhi-gang, PENG Jia-pei. Impact of flocculation sedimentation dealing with urban river and lake sediment on water quality[J]. Environmental Science and Technology, 2009, 22(2):46-47,50. (in Chinese))
- [6] 严镜海. 粘性细颗粒泥沙絮凝沉降的初探[J]. 泥沙研究, 1984(1): 41-49. (YAN Jing-hai. A preliminary study on the flocculated settling velocity of fine sediment particles[J]. Journal of Sediment Research, 1984(1): 41-49. (in Chinese))
- [7] 严镜海. 紊动水流中泥沙沉降速度的初步分析[J]. 水利水运科学研究,1992(1): 25-37.(YAN Jing-hai. Preliminary study of the sediment settling velocity in turbulent water[J]. Jounal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1992(1): 25-37. (in Chinese))
- [8] 黄建维. 粘性泥沙在静水中沉降特性的试验研究[J]. 泥沙研究, 1981(2): 30-41.(HUANG Jian-wei. Experimental study of settling properties of cohesive sediment in still water[J]. Journal of Sediment Research, 1981(2): 30-41.(in Chinese))
- [9] 张庆河,王殿志,吴永胜,等. 粘性泥沙絮凝现象研究述评(1):絮凝机理与絮团特性[J].海洋通报,2001,20(6):80-90.
 (ZHANG Qing-he, WANG Dian-zhi, WU Yong-sheng, et al. A review on aggregation pheonomena for cohesive sediment(I): mechanism for aggregation and properties of floes[J]. Marine Science Bulletin, 2001,20(6):80-90. (in Chinese))
- [10] 黄建维,张金善. 太湖泥沙静水沉降特性的初步试验研究[R]. 南京:南京水利科学研究院, 2003. (HUANG Jian-wei,

ZHANG Jing-shan. Preliminary experimental study of settling properties of Taihu Lake sediment in still water [R]. Nanjing: Hydraulic Research Institute, 2003. (in Chinese))

- [11] 陈鋆,高光,李一平,等. 太湖水体中悬浮物的静沉降特征[J]. 湖泊科学,2006,18(5):528-534.(CHEN Jun, GAO Guang, LI Yi-ping, et al. Hydrostatic settling of suspended matter of Taihu Lake[J]. Journal of Lake Science, 2006, 18(5): 528-534.(in Chinese))
- [12] 刘林双,杨国录,王党伟,等. 淤泥絮凝沉降中清浑界面沉速计算[C]//河湖水生态水环境专题论坛论文集,2011.(LIU Lin-shuang, YANG Guo-lu, WANG Dang-wei, et al. Calculation of interface settling velocity of sediment flocculating settling[C] // Proceedings of Water Ecology, Water Environment Forum of Rivers and Lakes, 2011.(in Chinese))
- [13] 朱广伟,秦伯强,高光.风浪扰动引起大型浅水湖泊内源磷暴发性释放的直接证据[J]. 科学通报,2005, 50(1): 66-71. (ZHU Guang-wei, QIN Bo-qiang, GAO Guang. Direct evidence of phosphorus outbreak release from sediment to overlying water in a large shallow lake caused by strong wind wave disturbance[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(1): 66-71. (in Chinese))

Experimental studies of flocculaton settling of sediment from three lakes

XIE Rui, JI Chang-hui, WANG Yong-ping

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Autogenic pollution sources coming from lake sediment motion process aggravate ecological environment deterioration of lakes. A study of settlement law of lake sediment after suspension by the action of water wave provides a reference for understanding causes of water quality change and ecological environment governance of lakes. Settlement experiments of sediment from the Taihu Lake, Longgan Lake and Caohu Lake under hydrostatic conditions were performed in an organic glass cylinder. The changes in sediment concentrations under the conditions of different initial sediment concentrations and different water depths have been studied, and the laws of the sediment settlement of three lakes have been analyzed, which can approximately represent the dynamic state of the lakes' sediment. The analysis results show that the settlement of sediment from three lakes is charactorized by the flocculating settling, and that the settlement process and velocities have quantitative changes and fundamental changes comparing with a single particle sediment. The average flocculating settling velocities increase with the increment of settling height and sediment concentration. The flocculating settling velocities of the sediment from three lakes have been obtained. The experiment results can give a good basis for improving water quality by the flocculation settling method.

Key words: lake sediment; sediment concentration; settling velocity; flocculation; experiment on settlement