

文章编号: 0258-2724(2012)04-0586-05 DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2012.04.008

单向流作用下淤泥质黏土起动试验研究

杨兵¹, 蔡瑞卿¹, 唐驰², 马建林¹, 呼和敖德²

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川成都 610031; 2. 中国科学院力学研究所水动力学与海洋工程重点实验室, 北京 100190)

摘要: 为掌握淤泥质黏土的起动规律, 采用水体灰度和水流速度同步测量的方法, 对不同沉积密度条件下淤泥质黏土的起动特性进行了试验研究. 试验结果表明: 淤泥质黏土的起动现象可用弱起动和普遍起动描述. 弱起动床面冲刷率低, 水体灰度值的变化约为 10; 普遍起动床面冲刷率明显提高, 灰度曲线发生突变的附近为普遍起动, 相应的灰度值变化一般超过 20. 普遍起动流速约为弱起动流速的 1.5 倍.

关键词: 淤泥质黏土; 临界起动流速; 灰度; 单向流

中图分类号: TV14 **文献标志码:** A

Experimental Research on Onset of Muddy Clay Exposed to Unidirectional Flow

YANG Bing¹, CAI Ruiqing¹, TANG Chi², MA Jianlin¹, HUHE Aode²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Key Lab for Hydrodynamics and Ocean Engineering, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to investigate the onset law of muddy clay, the onset characteristics of muddy clay with different sedimentary densities were investigated experimentally by the synchronous measurement of water grey level and flow velocity. The experimental results show that the phenomenon of the onset of muddy clay can be divided into weak onset and general onset. To the weak onset, the rate of erosion on the muddy bed is low and the variation of water grey level is about 10. While to the general onset, the rate of erosion corresponding to a sudden change in the curve of water grey level increases evidently and the variation of water grey level is usually more than 20. The flow velocity of the general onset is 1.5 times as much as that of the weak onset.

Key words: muddy clay; critical flow velocity of onset; grey level; unidirectional flow

港口、河口航道、港池等地方存在大量淤泥质黏土, 这些淤泥质黏土的存在可能对大型交通工程建设和船舶航行带来很大的影响. 研究淤泥质黏土的运动规律对于跨江、跨海铁路大桥、港口航道的建设和维护具有重要的参考价值. 另一方面, 港口、航道中的冲淤计算、港池回淤规律的分析以及数值模拟所需的淤泥质黏土的基本特征参数, 均有赖于淤泥质黏土运动规律的研究. 淤泥质黏土的临界起动条件(临界起动流速或临界起动切应力)是淤泥

质黏土的基本特性参数, 也是合理预测港口、航道泥沙回淤的重要参数^[1].

淤泥质黏土主要由黏性细颗粒泥沙组成. 黏性细颗粒泥沙与无黏性沙之间存在某些实质差异, 影响淤泥质黏土起动的因素也变得十分复杂, 包括泥沙粒径、含沙量、黏性土的含量、矿物成分、颗粒表面的物理化学特性以及环境水等, 主要表现在黏性细颗粒泥沙之间粘结力增强.

关于淤泥质黏土的起动问题, 受到众多学者关

收稿日期: 2011-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10902112)

作者简介: 杨兵(1976-), 男, 副教授, 研究方向为流固土耦合分析、桩基与基坑工程. 电话: 15008478135 E-mail: yangb@home.swjtu.edu.cn

注,取得了丰硕成果^[2-18].一些学者将起动流速与土颗粒粘结力、土的塑性指数、黏性土的固结密实程度、抗剪强度等参数相关联,以便能够较为可靠地预测起动流速^[2-6,8-9].这些研究对掌握淤泥质黏土起动的物理机理有很大帮助,然而,由于黏性土本身的复杂性,很多参数难以准确测量,上述研究成果在实际应用中效果不理想.另一方面,大部分研究对淤泥质黏土起动的判别依靠肉眼观察,具有很大的主观性.因此,如何对淤泥质黏土的起动现象进行定量判别,找到更符合实际的淤泥质黏土起动流速计算公式是需要深入研究的问题.

淤泥质黏土的临界起动条件与其本身的颗粒密度、粒径、级配、矿物成分等密切相关,这些因素基本上可以由淤泥质黏土的沉积密度 ρ_c 综合反映.而该参数无论是在实验室还是在工程现场,均便于测量.

因此,本文将探讨淤泥质黏土的临界起动流速与沉积密度 ρ_c 的关系.另一方面,为了克服起动现象判别的主观性,尽可能实现起动现象的定量判别,通过水体灰度与观察相结合的方法识别淤泥质黏土的起动现象,采用同步测量水体灰度和水流速度的方法实现淤泥质黏土起动流速的判别.在单向流水槽中研究不同沉积密度的新淤泥质黏土的起动特性.

1 试验设备及方法

试验在单向流可调坡水槽中进行,水槽长19.0 m,宽0.5 m,高0.6 m.侧壁由玻璃镶嵌而成,以便观测和摄像.水槽侧壁标尺可读水位;水流平均流速采用转轮流速仪测量.

淤泥质黏土起动试验中,采用水体灰度和水流速度同步测量的方法.水体泥沙灰度场(相当于浓度场)采用SONY数码摄像机测量,拍摄速度为25帧/s.在水槽中部9~11 m范围内对水体灰度

和水流速度进行同步测量,测量灰度的摄像机水平置于水槽一侧.在泥沙起动过程中,用录像机记录水体灰度的变化过程.

为判断淤泥质黏土的临界起动条件,摄像机记录下泥沙起动过程水体灰度变化的整个过程.通过对记录的灰度图的图像处理,可以得到一定灰度(或浓度)对应的水力条件,从而定量判断泥沙的起动速度.根据灰度变化规律确定不同的临界起动条件,即少量起动(弱起动)和普遍起动.为准确、快速捕捉起动现象,主要测量淤泥质黏土表面附近水体的灰度值,也就是泥沙起动后水体灰度改变迅速且明显的区域.

原状淤泥质黏土的密度为 1.440 kg/m^3 ,中值粒径 $d_{50} = 5.12 \text{ }\mu\text{m}$.试验前先将泥样搅拌均匀,并按事先设计好的淤泥质黏土密度调制泥样浓度,再将泥样均匀地铺在水槽底部.铺设长度为14 m,厚度为5 cm,并用工具将淤泥质黏土表面刮平.

由于淤泥质黏土的结构在搅拌后受到破坏,考虑到淤泥质黏土的结构对抗剪强度的影响较大,因此,将淤泥质黏土自然沉积24 h后再试验.配制泥样的密度范围为 $1.155 \sim 1.400 \text{ kg/m}^3$.

为了更好地模拟海水的影响,试验时在水槽中缓慢注入盐度为15‰的盐水.共进行11组试验,试验参数见表1(水深均为10 cm).调节可控硅调速装置,从低流速开始,逐渐增大流量,每一级流量稳定5~10 min后进行测量,记录流量、水深、水位和流速.

淤泥质黏土的粒径用Horiba La-920激光粒度仪测量,量程为 $0.02 \sim 2000 \text{ }\mu\text{m}$.分别用离心泵(方法1)和离心泵与超声波(方法2)测得的2个样品的粒径级配曲线见图1.

综合2种取样结果可知,试验用淤泥质黏土的中值粒径约为 $5.12 \text{ }\mu\text{m}$,颗粒密度 ρ_s 的平均值为 2.706 g/cm^3 .

表1 试验参数
Tab. 1 The test parameters

No.	$\rho_c / (\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$S / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	C_v	No.	$\rho_c / (\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$S / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	C_v
1	1.400	624.0	0.230 6	7	1.250	383.7	0.141 8
2	1.354	550.3	0.203 4	8	1.207	334.8	0.116 3
3	1.319	494.2	0.182 6	9	1.206	313.2	0.115 7
4	1.314	486.1	0.179 7	10	1.179	269.9	0.099 7
5	1.303	468.6	0.173 2	11	1.155	231.5	0.085 5
6	1.262	402.9	0.148 9				

注: S 为沉积含沙量; C_v 为体积含沙量.

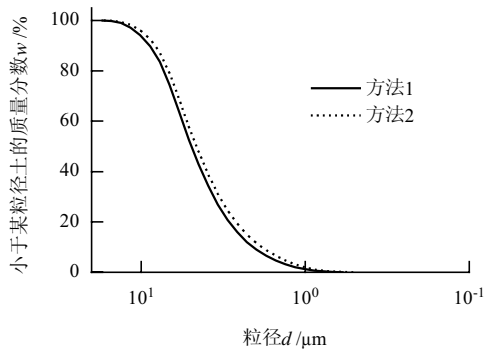


图1 粒径级配分布曲线
Fig.1 Particle-size distribution curves

2 试验结果及分析

试验结果表明,当水流速度很小时,淤泥质黏土表面保持平整、光滑;随水流速度的逐渐增大,床面逐渐出现局部破坏、撕裂,小片脱落,并扬起卷入水中(图2(a)),水体开始变得浑浊.此时,达到弱起动的临界条件.随水流速度的继续增大,泥面多处或普遍被水流撕裂,甚至发生破坏(图2(b)),水体逐渐变得浑浊.床面破坏首先发生在泥面结构薄弱处,一旦发生破坏,很快向下游扩展.

在水流作用下,床面泥土扬起,使水体变得浑



(a) 弱起动($\rho_c = 1.206 \text{ g/cm}^3$)



(b) 大面积薄层撕裂($\rho_c = 1.250 \text{ g/cm}^3$)

图2 淤泥质黏土的起动现象
Fig.2 The phenomenon of muddy clay onset

浊.记录淤泥质黏土床面起动过程中水体灰度随流速的变化(图3),然后对灰度图进行数值化处理,建立水体灰度与水流速度的关系(图4).

从图4可见,流速很小时,水体灰度的变化很缓慢;当达到弱起动时,水体灰度开始明显增大;达到普遍起动时,水体灰度经历一突增过程.从图4中灰度的变化曲线可以看出:弱起动时,床面冲刷率低,水体灰度值变化约为10;普遍起动时,床面冲刷率明显提高,相应的灰度值变化超过20.

为了进一步验证灰度与床面冲刷率的上述关系,对灰度与冲刷率的关系进行了标定.标定是在一个已知底面积的玻璃槽中进行的,初始时刻槽中装满清水,然后每隔一定时间向槽中倒入已知质量的淤泥质黏土,每次倒入后搅拌均匀.计算出水体中每次倒入淤泥质黏土后的面积含沙率,并通过拍摄槽中水体照片获得每组含沙率对应的灰度值,从而可得冲刷率与水体灰度的关系.图5给出了冲刷率-水体灰度的标定曲线.



(a) 初始时刻



(b) 弱起动时



(c) 普遍起动时

图3 淤泥质黏土起动过程中水体灰度的变化
Fig.3 The variation of water gray level during the onset

从标定结果可知,冲刷率与水体灰度呈线性关系. 当灰度为 10 左右时,试验得到的冲刷率约为 $0.60 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 当水体灰度为 20 左右时,冲刷率约为 $1.00 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. 根据已有研究^[19],当冲刷率为 $1.00 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以上时,泥沙已经普遍起动.

由水体灰度随水流速度变化的规律,可以确定淤泥质黏土的临界起动流速.

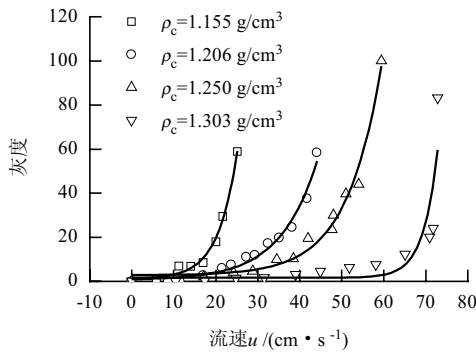


图4 泥沙起动过程中水体灰度随流速的变化
Fig. 4 The variation of water gray level with flow velocity during the onset

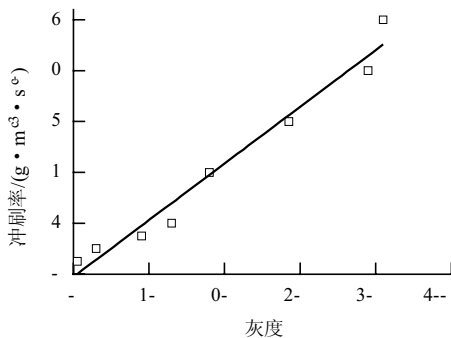


图5 泥沙冲刷率与灰度关系的标定
Fig. 5 The labelled relationship between sediment erosion rate and gray level

如前所述,淤泥质黏土的临界起动条件与其本身的颗粒密度、粒径、级配、矿物成分等特性密切相关,这些因素基本上可以由淤泥质黏土的沉积密度 ρ_c 综合反映.

下面用相对沉积密度 $(\rho_c - \rho) / \rho$ 来关联淤泥质黏土的临界起动速度 u_c (ρ 为环境水密度,取 $\rho = 1.0105 \text{ g}/\text{cm}^3$),并建立两者之间的关系,结果见图6.

结果表明,淤泥质黏土的沉积密度对临界起动流速的影响十分显著. 淤泥质黏土的沉积密度越大,临界起动流速 u_c 也越大. 可以用以下拟合关系式描述淤泥质黏土的弱起动流速 u_{c1} 和普遍起动流速 u_{c2} 与相对沉积密度之间的关系:

$$u_{c1} = 342.62 \left(\frac{\rho_c - \rho}{\rho} \right)^{1.575}, \quad (1)$$

$$u_{c2} = 504.41 \left(\frac{\rho_c - \rho}{\rho} \right)^{1.575}. \quad (2)$$

由式(1)和(2)可以看出,普遍起动流速 u_{c2} 约为弱起动流速 u_{c1} 的 1.5 倍.

需要说明的是,式(1)和(2)是在本试验条件 ($d_{50} = 5.12 \text{ }\mu\text{m}$, $\rho_c = 1.155 \sim 1.400 \text{ g}/\text{cm}^3$) 下得出的.

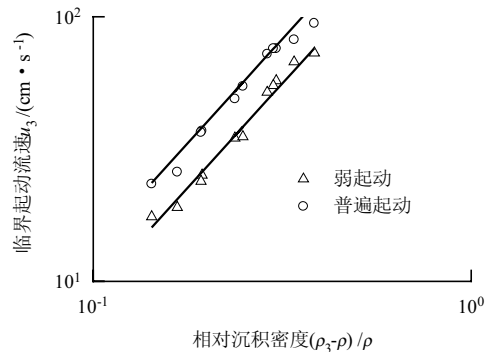


图6 淤泥质黏土临界起动流速与相对沉积密度的关系
Fig. 6 The relationship between critical onset velocity and relative sedimentary density

3 结果讨论

图7给出了本文试验结果与洪柔嘉、蒋昌波等的试验结果的比较^[19-20](其试验条件(含淤泥质黏土粒径)与本试验较接近). 洪柔嘉等试验的淤泥质黏土样品的容重在浮泥容重范围内,中值粒径与本试验用的淤泥质黏土相近;蒋昌波等研究的淤泥质黏土的容重范围较大.

从图7可以看出,本文拟合的经验公式能较好地预测文献[19-20]的试验结果(H 为水深).

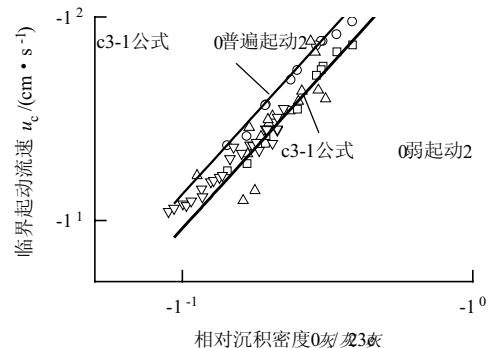


图7 本文结果与已有结果的比较
Fig. 7 The comparison of experimental results

4 结论

通过单向水流作用下淤泥质黏土的起动的试验研究,采用水体灰度和水流速度同步测量的方法确定临界起动速度,探讨了淤泥质黏土临界起动流速与沉积密度 ρ_c 的关系.结果表明:

(1) 弱起动床面冲刷率低,水体灰度变化约为10;普遍起动床面冲刷率明显提高,灰度曲线发生突变的附近为普遍起动,相应的灰度值变化一般超过20.

(2) 普遍起动流速约为弱起动流速的1.5倍.

(3) 在本文的试验条件下,临界起动流速与相对沉积密度之间呈指数关系.

参考文献:

- [1] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社,1983: 420-425.
- [2] 张瑞瑾,谢鉴衡,王明甫,等. 河流泥沙动力学[M]. 北京: 水利电力出版社,1989: 109-114.
- [3] 唐存本. 泥沙起动规律[J]. 水利学报,1963(2): 1-12.
- [4] 沙玉清. 泥沙运动学引论[M]. 北京: 中国工业出版社,1965: 302-310.
- [5] 龚国仁. 论泥沙起动流速[J]. 水利学报,1960(4): 44-60.
- [6] SMERDON E T, BEASLEY R P. Tractive force theory applied to stability of open channels in cohesive soils[R]. Columbia, Missouri: University of Missouri, 1959: 60-68.
- [7] 曹叔尤,杜国翰. 黏性土充淤的试验研究[J]. 泥沙研究,1986(4): 73-82.
- [8] 徐伦. 水库黏性淤积体溯源冲刷试验研究[C]//中国水利水电科学研究院科学研究论文集: 第33集. 北京: 水利电力出版社,1990: 121-130.
- [9] 黄岁梁,陈稚聪,府仁寿. 黏性类土的起动模式研究[J]. 水动力学研究与进展: A辑,1997,12(1): 1-7. HUANG Suiliang, CHEN Zhicong, FU Renshou. Study on starting model of clay of all types[J]. Journal of Hydrodynamics: Series A, 1997, 12(1): 1-7.
- [10] 杨美卿,王桂玲. 黏性细泥沙的临界起动公式[J]. 应用基础与工程科学学报,1995,3(1): 99-109. YANG Meiqing, WANG Guiling. The incipient motion formulas for cohesive fine sediments[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 1995, 3(1): 99-109.
- [11] 韩其为,何明民. 泥沙起动规律及起动流速[M]. 北京: 科学出版社,1999: 200-212.
- [12] 张兰丁. 黏性泥沙起动流速的探讨[J]. 水动力学研究与进展: A辑,2000,15(1): 82-88. ZHANG Landing. Study on starting velocity of cohesive sediment[J]. Journal of Hydrodynamics: Series A, 2000, 15(1): 82-88.
- [13] JOCHEN A, VLADIMIR N, ROY W. Effects of bed material properties on cohesive sediment erosion[J]. Marine Geology, 2004, 207: 83-93.
- [14] TAN G M, WANG J, SHU C W, et al. Effects of consolidation time and particle size on scour rates of cohesive sediment[J]. Journal of Hydrodynamics: Series B, 2007, 19(2): 160-164.
- [15] RAMBABU M, RAO S N, SUNDAR V. Current-induced scour around a vertical pile in cohesive soil[J]. Ocean Engineering, 2003, 30: 893-920.
- [16] GANAOUI O E, SCHAAFF E, BOYER P, et al. The deposition and erosion of cohesive sediments determined by a multi-class model[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 60: 457-475.
- [17] 肖辉,曹祖德,赵群,等. 波、流作用下粘性淤泥的起动试验研究[J]. 泥沙研究,2009(3): 75-80. XIAO Hui, CAO Zude, ZHAO Qun, et al. Experimental study on incipient motion of coherent silt under wave and flow action[J]. Journal of Sediment Research, 2009(3): 75-80.
- [18] KNAPEN A, POESEN J, GOVERS G, et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion: a review[J]. Earth-Science Reviews, 2007, 80: 75-109.
- [19] 洪柔嘉,应水良. 水流作用下的浮泥起动流速试验研究[J]. 水利学报,1988(8): 49-55.
- [20] 蒋昌波,白玉川,姜乃申,等. 海河口粘性淤泥起动规律研究[J]. 水利学报,2001(6): 51-56. JIANG Changbo, BAI Yuchuan, JIANG Naishen, et al. Incipient motion of cohesive silt in the Haihe River estuary [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(6): 51-56.

(中、英文编辑: 付国彬)