



# 条子泥滩地粉细沙起动流速试验研究

陈海英<sup>1</sup>, 尹家春<sup>2</sup>, 王费新<sup>3</sup>, 张 忱<sup>3</sup>

(1. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120; 2. 上海交通建设总承包有限公司, 上海 200136;  
3. 中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司, 上海 201208)

**摘要:** 条子泥表层滩地土极易受水流影响而起动, 导致堤坡脚塌陷, 需要进行保护, 而合适的保护方法与泥沙起动流速有关。通过室内物理模型试验得到了条子泥表层粉细砂不同水深下的起动流速, 与当前使用较多的起动流速计算公式, 包括张瑞瑾、窦国仁、唐存本等公式, 进行比较。给出了条子泥表层粉细砂起动流速计算公式建议。

**关键词:** 起动流速; 表层粉细沙; 条子泥

中图分类号: TV 83

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0022-04

## Experimental study on threshold velocity of fine silty sand at Tiaozini beach

CHEN Hai-ying<sup>1</sup>, YIN Jia-chun<sup>2</sup>, WANG Fei-xin<sup>3</sup>, ZHANG Chen<sup>3</sup>

(1. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China;

2. Shanghai Communications Construction Contracting Co., Ltd., Shanghai 200136, China;

3. Key Laboratory of Waterway Dredging Technology, Ministry of Transport, PRC, Shanghai 201208, China)

**Abstract:** Entrainment of the topsoil at Tiaozini beach is vulnerable to water flow, and it leads to the collapse of embankment toe, thus protection measure shall be taken. Appropriate protection measures are associated with the threshold velocity. The threshold velocities of the fine silty sand sampled from the topsoil at Tiaozini beach under different water depths are tested by indoor experiments, and compared with those calculated by several widely used calculation formula, including Zhang Ruijin, Dou Guoren, Tang Cunben, et al. Based on the results of the experiments, suitable formula for the threshold velocity of fine silty sand of topsoil at Tiaozini beach are proposed.

**Keywords:** threshold velocity; fine silty sand of the topsoil; Tiaozini

条子泥匡围(一期)工程位于江苏省条子泥沿海滩涂, 堤身总长度约 27 km, 堤身建在粉细沙(0.005~0.075 mm 颗粒占比约 80%)上。堤坝施工过程中由于滩地土极易扰动, 在堤身坡脚外缘出现沿堤长冲刷沟, 局部堤段坡脚塌陷, 需要采取保护措施, 而合理的保护方式和表层土起动流速有关。长期以来, 许多学者对泥沙起动规律及起动流速计算方法进行了深入的研究, 提出了大量的泥沙起动计算公式, 但各公式计算效果不同, 本文选择张瑞瑾、窦国仁、唐存本等公式进行计算, 发现对于颗粒分布均匀的

条子泥土壤而言计算结果差异较大, 通过与室内试验数据成果对比后, 提出建议采用的公式, 供使用者参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试验平台及仪器设备

试验在波流试验水槽中进行(图1), 水槽长 45 m、宽 0.7 m、高 1 m。水槽上游端配备有造流和造波系统, 下游端配备水位控制系统、消波系统, 水槽中段设置试验区, 流量控制通过供水泵变频实现。

收稿日期: 2014-09-22

作者简介: 陈海英(1976—), 女, 高级工程师, 从事港口、航道科研及设计。



图1 试验水槽

试验观测要素包括来流水深和来流流速,并观测泥沙起动。(图2)测试仪器有NDV流速仪、标尺等。

### 1.2 试验土质

试验土从条子泥施工现场运回,试验土粒径级配曲线见图2,检测结果表明该种土中值粒径 $D_{50}$ 为0.094 15 mm,  $C_u$ 值为2.5,含水率33.7%,土粒比重2.69,饱和密度 $1.89 \text{ g/cm}^3$ ,干密度 $1.41 \text{ g/cm}^3$ ,孔隙比0.906。土质为匀粒土,级配不良,粉细砂。

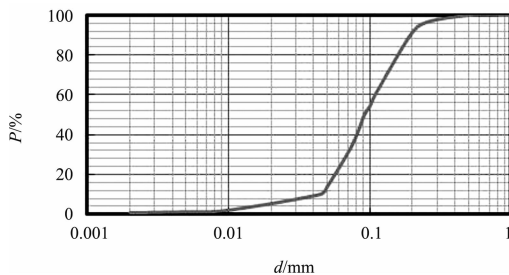


图2 试验土粒径级配曲线

### 1.3 试验步骤和方法

试验基本步骤为:1)在水槽试验段铺设试验用土,保持床面水平。2)放水到试验水深(放水时严格控制来流流速,确保试验土不起动)。3)起动供水水泵,控制试验水深,并逐级加大来流流量及流速;观察泥沙起动现象,记录泥沙起动状态。当观察到泥沙处于临界起动状态时,测定水流流速和水深。4)每个测点流速数据采集3次做平均,作为该点的流速实测结果。5)关闭水泵,整理试验设备,试验完毕。

在试验过程中,流速测量的时间包括临界起动、全面起动和沙纹形成时3种状态,测定水深为 $0.6H$ 处。

### 1.4 泥沙起动的判别标准

受床面条件、泥沙颗粒组成、水流脉动特性等客观条件的影响,泥沙起动的判别标准带有很大的任意性。

窦国仁<sup>[1]</sup>将泥沙的起动分为3种状态,即将动未动、少量动和普遍动。第1种状态是指床面泥沙除个别凸出颗粒可动外,基本不动;第2种状态是指床面上的泥沙,时而这个部位起动,时而那个部位起动,经常能观察到有少量颗粒起动;在第3种起动状态下床面上各部位的泥沙并不是同时起动而是有先有后,但在一定观察时段内床面上各部位均能看到泥沙颗粒的运动。通常将少量起动作为泥沙起动标准,但也有学者将普遍动作为起动标准。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验结果

共进行了3组不同水深情况下的临界流速观测试验,分别为水深10、30、50 cm,每组水深按流速由小到大进行若干试验(从床面静止直至开始出现沙粒悬浮),且各进行一次重复试验。试验以少量动作为泥沙起动标准。试验结果见表1。

表1 条子泥试验土临界流速试验结果

试验水深/cm	实测水深/cm	流速/ ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	是否 起动	床面砂粒运动状态
10	10.2	12	否	
	10.3	16	否	
	10.5	21	是	部分砂粒起动,呈滚动状运动
	10.6	22	是	
	10.8	32	是	砂粒整体起动,呈悬浮状运动,出现砂纹
30	10.9	35	是	
	30.0	18	否	
	30.3	21	否	
	29.5	25	是	部分砂粒起动,呈滚动状运动
	29.7	27	是	
50	30.1	42	是	砂粒整体起动,呈悬浮状运动,出现砂纹
	30.8	38	是	
	49.8	26	否	
	49.5	28	否	
	50.5	31	是	部分砂粒起动,呈滚动状运动
	50.1	33	是	
	50.2	45	是	砂粒整体起动,呈悬浮状运动,出现砂纹
	50.6	43	是	

## 2.2 结果分析

### 2.2.1 利用已有起动流速公式计算值

以下列出部分较有知名度的临界流速公式<sup>[2-3]</sup>：

岗恰洛夫公式：

$$\frac{v_c}{\sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g D}} = 1.071 g \frac{8.8 h}{D_{95}} \quad (1)$$

式中： $v_c$ 为起动流速 (m/s)； $\rho_s$ 、 $\rho$ 分别为泥沙颗粒和水的密度 ( $t/m^3$ )； $D$ 、 $D_{95}$ 分别为泥沙颗粒的中值粒径和特征粒径 (m)； $h$ 为水深 (m)。

沙莫夫公式：

$$\frac{v_c}{\sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g D}} = 1.14 \left( \frac{h}{D} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (2)$$

窦国仁公式：

$$v_c = 0.32 \left( \ln \frac{11 h}{K_s} \right) \left( \frac{D'}{D_*} \right)^{\frac{1}{3}} \left\{ 3.6 \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g D + \left( \frac{\rho'}{\rho_c} \right)^{2.5} \left[ \frac{\varepsilon_0 + g h \delta (\delta/D)^{0.5}}{D} \right]^{0.5} \right\} \quad (3)$$

式中： $D_*$ 为参考粒径，取为 10 mm。 $D'$ 的取值，当  $D \leq 0.5$  mm 时， $D' = 0.5$  mm；当  $0.5$  mm  $< D < 10$  mm 时， $D' = D$ ；当  $D \geq 10$  mm 时， $D' = 10$  mm。对于平整河床， $K_s$ 取值，当  $D \leq 0.5$  mm 时， $K_s = 1.0$  mm；当  $0.5$  mm  $< D < 10$  mm 时， $K_s = 2D$ ；当  $D \geq 10$  mm 时， $K_s = \sqrt{2D_* D}$ 。 $\delta$ 为薄膜水厚度参数，取  $2.31 \times 10^{-5}$  cm。 $\varepsilon_0$ 为综合粘结力参数，其值与颗粒的物理化学性质有关，对于黏土还与有机质含量及沉积环境等有关，变化范围较大，对于一般泥沙取  $1.75$  cm<sup>3</sup>/s<sup>2</sup>，对于黏土最大可达  $17.5$  cm<sup>3</sup>/s<sup>2</sup>。 $\rho'$ 、 $\rho'_c$ 分别为床面泥沙的干密度和稳定干密度 ( $t/m^3$ )。

张瑞瑾公式：

$$v_c = \left( \frac{h}{D} \right)^{0.14} \left[ 17.6 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} D + 0.000\ 000\ 605 \left( \frac{10 + h}{D^{0.72}} \right) \right]^{0.5} \quad (4)$$

唐存本公式：

$$v_c = \frac{1.79}{1+m} \left( \frac{h}{D} \right)^m \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g D + \frac{\rho'}{\rho_c} \cdot \frac{c}{\rho D} \right)^{0.5} \quad (5)$$

式中： $m$ 为指数，对于一般天然河道， $m = 1/6$ ，对于平整河床， $m = \frac{1}{4.7} \left( \frac{D}{h} \right)^{0.06}$ ；系数  $c$  取  $0.906 \times 10^{-4}$  g/cm； $\rho$ 为水的密度 ( $kg/m^3$ )。

沙玉清公式：

$$v_c = \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g D h^{\frac{1}{5}}} \left[ 266 \left( \frac{\delta}{D} \right)^{\frac{1}{4}} + 6.66 \times 10^9 (0.7 - \varepsilon) \left( \frac{\delta}{D} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (6)$$

式中： $\delta$ 为薄膜水厚度，取 0.000 1 mm； $\varepsilon$ 为孔隙率，其稳定值约为 0.4。

本文以少量起动作为泥沙起动标准，将各家公式计算值与物模试验结果进行对比 (表 2)。其中，窦国仁公式中  $\varepsilon_0$  取  $7.5$  cm<sup>3</sup>/s<sup>2</sup>，取  $\rho' = \rho'_c$ ；唐存本公式中，取  $\rho' = \rho'_c$ ；沙玉清公式中， $\varepsilon$  取 0.45；其余参数均按实际情况选取。

表 2 条子泥土样起动流速对比

水深/cm	实测值	临界流速/(cm·s <sup>-1</sup> )					
		公式计算值					
		沙莫夫	刚	张	窦	唐	沙玉清
10	21.5	14.4	15.2	23.2	23.3	20.8	21.9
30	26.0	17.3	17.2	27.2	27.0	24.3	27.3
50	32.0	18.8	18.2	29.4	28.7	26.1	30.3

### 2.2.2 计算值与实测值对比分析

根据表 2，物模实测值明显大于沙莫夫公式及刚恰洛夫公式计算值，表明由较粗颗粒特性分析得出的沙莫夫公式 (适用范围为  $D > 0.2$  mm) 及刚恰洛夫公式 (适用范围为  $D = 0.08 \sim 0.15$  mm) 不适用于颗粒较细的条子泥试验土样。后 4 个公式均考虑了粒间粘结力的作用，计算值明显大于沙莫夫和刚恰洛夫公式，与实测值也较为接近。其中，唐存本公式计算值整体偏小；张瑞瑾和窦国仁公式基本一致，与实测值比 10 cm 水深下略偏大，50 cm 水深下略偏小；沙玉清公式则与实测值最为接近。

根据以上对比结果，并综合考虑各公式特点 (窦国仁公式中需确定综合粘结力参数  $\varepsilon_0$  值；沙玉清公式中需确定  $\varepsilon$  值)，从实用性角度，建议计

算条子泥表层土体临界流速时,首选张瑞瑾公式,如有相应的土体特性参数 ( $\varepsilon_0$ 、 $\rho'$ 、 $\rho'_c$ 、 $\varepsilon$  值)时,也可选用窦国仁及沙玉清公式。

表3与图4为按张瑞瑾公式计算得到的条子泥土样不同水深下起动流速,可作为工程应用参考。根据计算结果,条子泥土样极易起动,随着水深增大,起动流速有所增加,但即使在10 m水深条件下,起动流速也仅0.563 m/s。

表3 条子泥土样起动流速参考值

水深/m	临界流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	水深/m	临界流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1.0	0.329	6.0	0.481
1.5	0.353	6.5	0.492
2.0	0.373	7.0	0.503
2.5	0.390	7.5	0.514
3.0	0.406	8.0	0.524
3.5	0.420	8.5	0.534
4.0	0.434	9.0	0.543
4.5	0.446	9.5	0.553
5.0	0.458	10.0	0.563
5.5	0.470		

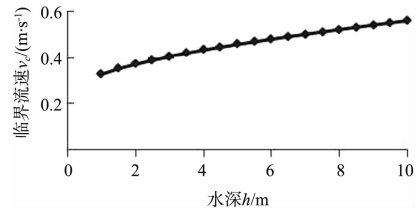


图4 条子泥土样起动流速参考值

### 3 结论

1) 本文采用室内物理模型试验模拟了条子泥表层粉细沙的起动流速,结果表明,条子泥粉细沙起动流速很小,非常容易受到冲刷。

2) 与各家计算公式结果进行对比后,考虑到计算的实用性,建议选用张瑞瑾公式进行计算。

### 参考文献:

- [1] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究, 1999(6): 1-9.
- [2] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [3] 钱宁, 万兆慧. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1991.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第21页)

### 参考文献:

- [1] 别社安, 时忠民, 王翎羽. 气浮结构的静浮态分析[J]. 中国港湾建设, 2000(6): 18-23.
- [2] 别社安, 时忠民, 王翎羽. 气浮结构的小倾角浮稳性分析[J]. 中国港湾建设, 2001(2): 31-35.
- [3] 别社安, 时忠民, 王翎羽. 气浮结构的运动特性研究[J]. 中国港湾建设, 2001(2): 18-21.
- [4] 季春群. 浮式生产系统的设计考虑[J]. 中国海洋平台, 1989(5): 42-44.
- [5] 王胜永. 桶型基础平台在渤海边际油田开发中的应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [6] 栾文辉. 筒型基础平台气浮拖航研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [7] 倪云林, 辛华龙, 刘勇. 我国海上风电的发展与技术现状分析[J]. 能源工程, 2009(4): 21-25.
- [8] Ding Hongyan, Zhang Puyang, Le Conghuan. Behavior of bucket foundations for offshore wind turbines under cyclic horizontal loading [C]. Proceedings of 2010 IEEE The

International Conference on E-product, E-service and E-Entertainment, 2010: 1-4.

- [9] Ding Hongyan, Zhang Puyang, Le Conghuan, et al. Construction and installation technique of large-Scale top-bearing bucket foundation for offshore wind turbine[C]. Proceedings of The 2nd International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, 2011: 7 234-7 237.
- [10] 竺艳蓉. 海洋工程波浪力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 1991: 9-59.
- [11] 李玉成, 滕斌. 波浪对海上建筑物的作用[M]. 北京: 海洋出版社, 2002.
- [12] 李远林. 近海结构水动力学[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1999.
- [13] Guéret R, Hermans A J. Air cushion under floating offshore structure [C]. 16th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, 2001: 45-49.

(本文编辑 武亚庆)