

厦门大小嶝造地工程吹填砂起动流速试验研究

康学增¹, 张晴波², 张忱², 王费新^{2*}

(1. 中交疏浚(集团)股份有限公司, 北京 100088;

2. 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: 大小嶝陆域形成采用耙吸船、绞吸船联合采砂吹填施工方案。其吹填砂料经检测成分主要为粗砂且粒径较为单一。起动流速是疏浚吹填土质基本水动力学特性之一。通过室内物理模型试验, 测试了吹填粗砂不同水深下的起动流速, 并与当前常用的张瑞瑾、窦国仁、唐存本等起动流速公式进行了比较, 推荐适用于该类粗砂的起动流速计算公式, 为现场疏浚吹填施工分析计算提供基础数据资料。

关键词: 大小嶝; 起动流速; 粗砂; 吹填砂

中图分类号: U615.4; TV142.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2017)06-0041-03

doi: 10.7640/zggwjs201706009

Experimental study on threshold velocity of backfill sand at Daxiao Deng Islands reclamation works in Xiamen

KANG Xue-zeng¹, ZHANG Qing-bo², ZHANG Chen², WANG Fei-xin^{2*}

(1. CCCC Dredging (Group) Company Limited, Beijing 100088, China;

2. CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment Co., Ltd., Shanghai 201208, China)

Abstract: The joint sand excavating and filling scheme using trailing suction dredger and cutter suction dredger is employed in Daxiao Deng Islands land formation project. Main component of filled sand material is coarse sand and the particle size is relatively unitary. Threshold velocity is one of the fundamental hydrodynamic characteristics for filled material. The threshold velocity of filled coarse sand was tested under different water depth due to indoor physical model test. The testing results are compared with several common formulas, including Zhang Ruijin formula, Dou Guoren formula and Tang Cunben formula, et al. The calculation formula for the threshold velocity of this kind of coarse sand is recommended after the comparison. The results provide fundamental data for analysis and calculation of the dredging and filling construction project.

Key words: Daxiao Deng Islands; threshold velocity; coarse sand; backfill sand

0 引言

大小嶝造地工程作为厦门翔安新机场填海造陆工程的一部分, 工程包含陆域形成及地基处理。其中陆域形成采用吹(回)填砂技术方案。施工时耙吸船、吸砂王船组、绞吸船联合采砂, 通过布置的管线输送进入吹填区, 管线总长约 5.5 km, 由沉管、浮管和岸管组成。

起动流速是疏浚吹填土质水动力学特性分析

和测试的基础参数, 也是疏浚吹填过程中影响施工作业及施工效率的基本土质特性参数之一。对于耙吸挖泥船而言, 疏浚吹填土质的起动流速, 是决定耙吸挖泥船挖掘过程中土体切削后破碎松散过程进而影响抽吸浓度的重要参数, 也是装舱过程中决定装舱效率及装舱量的一个关键参数。对于吸砂王船组及绞吸挖泥船而言, 土质的起动流速也是影响挖掘输送浓度及产量的一个重要影响因素。此外, 输送粗颗粒土质工况下, 起动流速也是泥泵-管道输送系统工况参数控制的一个重要参考因子。因此, 有必要针对工程典型土质,

收稿日期: 2017-02-09 修回日期: 2017-03-27

作者简介: 康学增(1958—), 男, 河北黄骅人, 硕士, 总裁, 高级工程师, 从事疏浚技术研究及管理工作。

* 通讯作者: 王费新, E-mail: wangfeixin2005@126.com

开展起动流速研究和分析，为现场施工分析计算提供基础数据资料。

1 试验概况

1.1 试验仪器设备

试验在波流试验水槽中进行，水槽长度 45 m，宽度 0.7 m，水槽高度 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。

试验观测要素包括来流水深和来流流速，并观测泥沙起动。相应配备的测试仪器有 NDV 流量计、标尺等。

1.2 试验土样

试验土从大小嶝施工现场运回，检测结果表明该种土中值粒径 D_{50} 为 0.8 mm(见图 1)，根据 JTJ/T 320—1996《疏浚岩土分类标准》，判别为匀粒土，级配不良，粗砂。

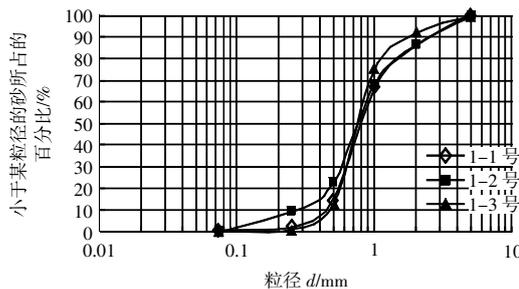


图 1 试验砂样粒径级配曲线

Fig. 1 Grain size distribution curve of test sand

1.3 试验断面及试验过程

根据 SL 99—2012《河工模型试验规程》选定试验断面(图 2)。试验断面布设在波流水槽中段。试验砂样铺设长度为 5.0 m，厚度 5.0 cm，宽度 0.70 m(与水槽同宽)。试验砂样上、下游侧分别设置过渡段用以平缓水流，过渡段采用中粗砂铺设，外表面涂抹水泥形成较为光滑的面，水平顶面长度 10 m，坡面坡度 1:10，高度与试验砂样同高。

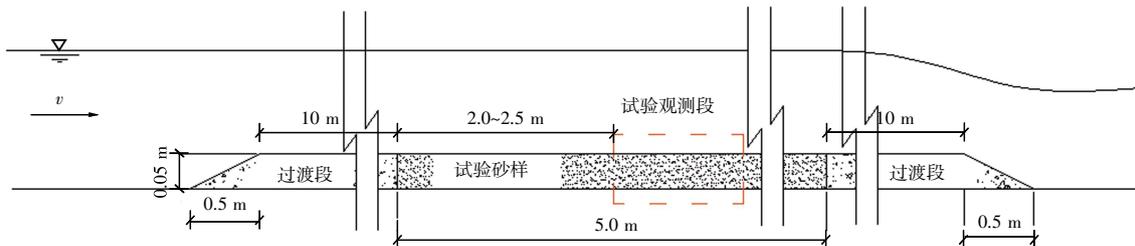


图 2 试验断面示意图

Fig. 2 Test section diagram

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) 每组水深进行流速数据采集 3 次的平均值，作为该点的流速实测结果；关闭水泵，整理试验设备，试验完毕。

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。根据克雷默对泥沙的起动的描述，可将之分为 4 种状态，即不动、弱动、中动和普动。其中弱动状态是指床面泥沙除个别凸出颗粒可动外，基本不动；中动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；普动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^[1]。通常将中动作为泥沙起动标准，但也有学者将普动作为起动标准。

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

共进行了 5 组不同水深情况下的起动流速观测试验，分别为水深 15 cm、20 cm、25 cm、30 cm 和 35 cm，每组水深按流速由小到大进行了若干试验(从床面静止直至开始出现砂粒悬浮)，且各进行 1 次重复试验。试验以中动作为泥沙起动标准。试验结果见表 1，为简单起见每组水深仅列出 1 组数据。表 1 列出了 5 组水深下观测到砂粒部分起动(中动)和砂粒整体悬浮运动，开始出现砂纹(普动)2 种运动状态，略去了未动和弱动的试验数据。

表1 大小嶼粗砂起动流速试验结果

Table 1 Test results of threshold velocity for coarse sand of Daxiao Deng Islands

编号	试验水深/cm	实测水深/cm	实测流速/(m·s ⁻¹)	泥沙起动状态描述
1	15	14.5	0.397 2	中动,部分砂粒起动,呈滚动状运动。
2		14.7	0.455 3	普动,砂粒整体起动,呈悬浮状运动,出现砂纹。
3	20	20.0	0.408 2	中动,部分砂粒起动,呈滚动状运动。
4		20.1	0.468 9	普动,砂粒整体起动,呈悬浮状运动,出现砂纹。
5	25	24.7	0.420 1	中动,部分砂粒起动,呈滚动状运动。
6		25.1	0.484 4	普动,砂粒整体起动,呈悬浮状运动,出现砂纹。
7	30	30.4	0.430 3	中动,部分砂粒起动,呈滚动状运动。
8		29.7	0.505 5	普动,砂粒整体起动,呈悬浮状运动,出现砂纹。
9	35	35.3	0.447 3	中动,部分砂粒起动,呈滚动状运动。
10		35.1	0.514 5	普动,砂粒整体起动,呈悬浮状运动,出现砂纹。

2.2 结果分析

以下列出部分较有知名度的起动流速公式^[1-4]:

1) 冈恰洛夫公式:

$$\frac{V_c}{\sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g D}} = 1.07 \lg 8.8 \frac{h}{D_{95}} \quad (1)$$

式中: V_c 为起动流速, m/s; γ_s 、 γ 分别为泥沙颗粒和水的重度, kN/m³; 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。

2) 沙莫夫公式:

$$\frac{V_c}{\sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g D}} = 1.14 \left(\frac{h}{D}\right)^{\frac{1}{6}} \quad (2)$$

3) 窦国仁公式:

$$V_c = 0.32 \left(\ln 11 \frac{h}{K_s}\right) \left(\frac{D'}{D_*}\right)^{\frac{1}{6}} \left[3.6 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g D + \left(\frac{\gamma'}{\gamma_c'}\right)^{2.5} \left(\frac{\varepsilon_0 + gh\delta(\delta/D)^{0.5}}{D}\right)^{0.5}\right] \quad (3)$$

式中: D_* 为参考粒径, 取为 10 mm; D' 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, $K_s = \sqrt{2D_*D}$; δ 为薄膜水厚度参数, 取 2.31×10^{-5} cm; ε_0 为综合黏结力参数, 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 cm³/s², 对于黏土最大可达 17.5 cm³/s²; γ' 、 γ_c' 分别为床面泥沙的干重度和稳定干重度, kN/m³。

4) 张瑞瑾公式:

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

5) 唐存本公式:

$$V_c = 1.79 \frac{1}{1+m} \left(\frac{h}{D}\right)^m \left[\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g D + \frac{\gamma'}{\gamma_c' \rho D}\right]^{0.5} \quad (5)$$

式中: m 为指数, 对于一般天然河道, $m = 1/6$, 对于平整河床, $m = \frac{1}{4.7} \left(\frac{D}{h}\right)^{0.06}$; c 为系数, 取 0.906×10^{-4} g/cm; ρ 为水的密度, kg/m³。

6) 沙玉清公式:

$$V_c = \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g D} h^{\frac{1}{5}} \left[266 \left(\frac{\delta}{D}\right)^{\frac{1}{4}} + 6.66 \times 10^9 (0.7 - \varepsilon) \cdot \left(\frac{\delta}{D}\right)^{2.05}\right] \quad (6)$$

式中: δ 为薄膜水厚度, 取 0.000 1 mm; ε 为孔隙率, 其稳定值约为 0.4。

本文以泥沙中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, 见图 3。其中, 窦国仁公式中 ε_0 取 55 cm³/s², 取 $\gamma' = \gamma_c'$; 唐存本公式中, 取 $\gamma' = \gamma_c'$; 沙玉清公式中, ε 取 0.43; 其余参数均按实际情况选取。

根据图 3, 沙莫夫公式和张瑞瑾公式计算结果与试验数据相比明显偏小, 而沙玉清公式计算值与实测的普动流速值接近; 唐存本、窦国仁及冈恰洛夫计算公式与中动实测数据较为接近, 实测数据落在唐存本公式和冈恰洛夫公式计算值区域之间, 且基本与窦国仁公式重合。因此这 3 个

(下转第 94 页)