



盐水环境下细颗粒淤泥的起动试验研究*

刘欣, 张晓雷, 吴浩然, 刘书瑜
(华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450046)

摘要: 为掌握细颗粒淤泥在盐水环境下的起动规律, 利用可循环水槽开展盐水 0‰泥(仅水体含盐)、盐水盐泥(水体和泥沙均含盐)和 0‰水盐泥(仅泥沙含盐)3 个系列的泥沙起动水槽试验。基于 PIV(粒子图像测速)系统和数字图像灰度处理技术实现泥沙起动流速的定量判别。结果表明: 水体或黏性泥沙的含盐度越高, 黏性泥沙越难起动。黏性泥沙起动流速与水体盐度或泥沙盐度呈对数关系, 盐度 0‰~10‰范围内起动流速急剧增大, 10‰~40‰范围内缓慢增大。对于同一含盐度而言, 0‰水盐泥的起动流速最大, 盐水盐泥起动流速次之, 盐水 0‰泥起动流速最小。含砾粉砂质淤泥在盐水环境下会发生絮凝现象, 以 520 r/min 的速率搅拌会使含盐的粉砂质淤泥发生絮散, 盐度对粉砂质淤泥的起动影响甚微。

关键词: 黏性泥沙; 泥沙起动; 盐度; 淤泥质黏土; 砂质粉土

中图分类号: TV 142.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)03-0014-07

Experimental study on incipient motion of newly deposited fine sediment under different saline conditions

LIU Xin, ZHANG Xiao-lei, WU Hao-ran, LIU Shu-yu

(School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: To master the incipient motion of newly deposited fine sediment under different saline conditions, we carry out three series of mud incipient tests with circulating flume, including salt-free mud incipient motion tests in saltwater(saltwater-salt-free mud), salt mud incipient motion tests in saltwater(saltwater-salt mud), and salt mud incipient motion tests in freshwater(freshwater-salt mud). On the basis of the particle image velocimetry(PIV) system and digital image gray processing technology, we identify quantitatively the critical incipient velocity of sediment. The results show that the higher salinity of water body or cohesive sediments makes it more difficult to start. There is a logarithmic relationship between the incipient velocity of cohesive sediments and the salinity of water or cohesive sediments. The incipient velocity increases sharply at the salinity of 0‰-10‰ and slowly at the salinity of 10‰-40‰. For the same salinity, the incipient velocity of salt mud in freshwater is the highest, followed by that of salt mud in saltwater, and that of salt-free mud in saltwater is the lowest. For sandy silt mixtures containing gravel, it is easy to flocculate in saltwater. However, the flocs are easy to disperse under high-speed stirring at 520 r/min, so salinity has little effect on the incipient motion of sandy silt.

Keywords: cohesive sediment; sediment incipient motion; salinity; mucky clay; sandy silt

收稿日期: 2021-06-15

*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41930643); 水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室开放研究基金项目([2018]KJ06)

作者简介: 刘欣(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学。

通讯作者: 张晓雷(1981—), 男, 博士, 副教授, 从事水力学及河流动力学方向的教学及科研工作。E-mail: zxl1334@163.com

细颗粒泥沙大量存在于水库、河口港湾、湖泊、粉质海岸中, 对水库淤后冲刷、港口航道的回淤、河口湖泊污染物吸附在黏性泥沙表面迁移扩散问题、河流演变及治理有重要影响。因此, 研究黏性细颗粒泥沙的起动问题是解决工程泥沙问题的关键所在, 具有重要的实际意义。

对于黏性泥沙的起动研究, 比较典型的泥沙起动公式是 20 世纪 50~60 年代张瑞瑾、窦国仁、唐存本和沙玉清的公式^[1-4], 它们以单颗粒受力分析为出发点, 考虑颗粒间的黏结力, 适合不同粒径颗粒(含黏性泥沙)的起动规律。然而受黏土物理化学特性、水动力条件、水动力和黏性床面耦合效应的影响, 黏性细颗粒泥沙的起动一直以来都是一个复杂的、综合性的课题, 针对具体的实际工程和不同的研究目的时, 仍需对现场泥样的起动规律、物理特性、流变特性进行相关的试验研究。一些学者^[5-10]围绕黏土的物理化学特性对泥沙起动的影响展开研究, 探讨黏性细颗粒泥沙起动与沉积密度、泥沙粒径、土体液限/自然含水率及液性指数等的关系, 还有一些学者^[11-14]从水动力条件对泥沙起动的影响入手, 分别取不同粒径或不同干密度的黏性泥沙研究水压力、水深、水流含沙量等对起动的影响。其中, 针对沉积密度小于 1.6 t/m^3 的固结前黏性泥沙起动的研究也受到众多关注并取得丰硕的成果^[15-18]。

目前, 细颗粒泥沙起动的研究已较为成熟, 但盐度影响下的细颗粒泥沙起动问题的研究成果较少。盐度对泥沙起动流速的影响是由于盐度对水动力条件的改变还是完全取决于盐度对细颗粒泥沙本身物理化学性质的影响尚不可知。而潮汐河口是海水和内陆河流交汇过渡地段, 既有内陆来沙也有海域来沙, 有盐淡水混合和盐水入侵的问题, 盐度会显著增强黏性泥沙的絮凝、团聚效应, 进而影响水沙起动输移。笔者通过水槽试验对细颗粒泥沙在不同盐度条件下的起动进行研究, 试验过程中依托粒子图像测速系统(PIV)的激光片光源和 CMOS 高速相机及数字图像处理技术对泥沙起动现象进行量化, 避免肉眼观察判别的主观

性, 定量判别泥沙的起动流速。研究成果将有助于丰富泥沙起动理论, 揭示河床演变机理, 完善河流管理体制, 同时对船舶通航、洪水防治与生态修复等工程问题也具有重要意义。

1 试验设备及方法

1.1 试验沙样

试验用沙一组取自黄河花园口滩地, 经筛分和沉降分选所得, 由沙粒(6.9%), 粉沙(58.6%)和粒径小于 0.005 mm 的黏粒(34.5%)组成, 中值粒径为 0.008 mm ; 另一组为珠江口原状沙样, 由砾石(11.9%), 沙粒(47.5%), 粉沙(30.7%)和黏粒(9.9%)组成, 中值粒径为 0.085 mm 。首先, 分别将各组沙样搅拌均匀; 然后, 采用比重法测量沙样湿密度, 少量多次加水搅拌, 将沙样密度统一配置成 1.3 t/m^3 (淤泥阶段); 最后, 采用电子盐度计(WS-31)测量泥沙盐度, 少量多次加盐搅拌, 配置不含盐泥沙及 5‰、10‰、20‰、30‰、40‰盐泥, 以备试验铺置。

1.2 试验装置

采用可调坡自循环明渠水槽(图 1)开展不同盐度条件下的淤泥起动试验。水槽断面为矩形, 长 13 m 、宽 0.25 m 、高 0.4 m , 坡度调至 5‰。为避免水槽进口及尾门段对水流的扰动, 保证测量段恒定均匀紊流充分发展, 水槽中段设置一段长 1.6 m 、宽 0.25 m 、高 0.02 m 的凹槽, 用于放置淤泥。沙样铺置到与水槽床面水平, 并用刮泥板平整泥床表面以及泥床与凹槽两端相接处, 避免泥沙受地形影响而起动。水槽底板及边壁都由玻璃拼接而成, 壁面光滑、平整且便于观察。水槽进口处依次设置蜂窝状整流格栅、溢流板、导流管道、压波板整流平波, 出口设置合页式尾门, 满足试验水流要求。水流循环系统由 2 个独立的泵送系统组成, 水泵最大功率 50 kW , 可提供的最大流量为 40 L/s 。由调频器控制泵的功率大小, 用电磁流量计测定流量, 结合尾门开度调控流速。泥沙起动过程中, 采用 PIV 系统采集泥床表面附近的水体灰度图像。

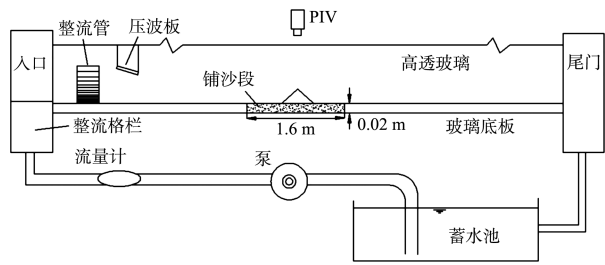


图 1 试验装置

1.3 试验方法

为掌握盐水环境下细颗粒淤泥的起动规律，自循环系统蓄水池依次配置淡水、5‰、10‰、20‰、30‰、40‰盐水，试验水深恒定为 0.155 m，仅控制盐度这一单一变量开展试验。为弄清楚盐度对泥沙起动流速的影响是出于盐度对水动力条件的改变还是完全取决于盐度对细颗粒泥沙本身物理化学性质的影响，每组沙样在盐水环境下的起动试验各分 3 个系列：盐水 0‰泥（仅水体含盐）、盐水盐泥（水体和泥沙均含盐）和 0‰水盐泥（仅泥沙含盐）起动试验。

为判别淤泥的临界起动条件，开展基于过程的泥沙起动变化规律研究。首先，水体灰度图像与流速同步采集，将 PIV 系统的激光器和摄像机布置在铺泥段中部，使激光器发射的片光源水平且贴近泥面，照亮泥床近底层一个很薄的面，摄像机镜头与片光源垂直，用于捕捉泥沙起动时近底层水体灰度图像（图 2）；然后，采用 MATLAB 编程将灰度图像转化成灰度值；接着，绘制泥沙起动过程中水体灰度随流速变化曲线；最后，利用所绘水体灰度流速关系曲线拐点实现对黏性泥沙起动流速的定量判别。

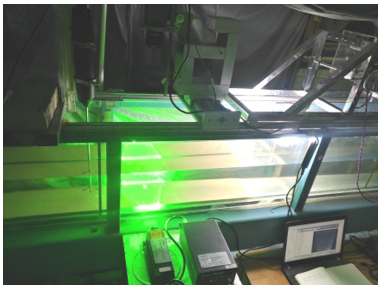


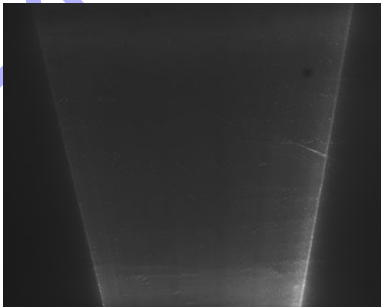
图 2 泥沙起动图像采集

2 试验结果及分析

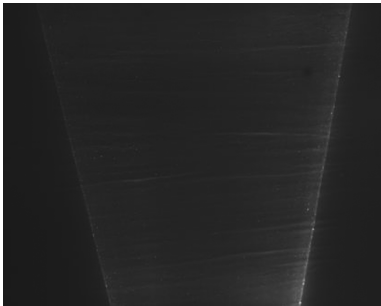
2.1 起动现象及判别

图 3 为黄河花园口分选泥沙的起动现象，以

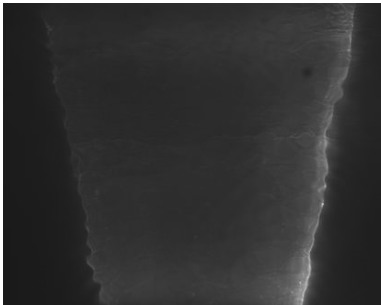
10‰水 0‰泥（水体盐度 10‰，泥沙盐度 0‰）为例，当流速较低时，床面附着颗粒微团随水流缓慢移动，见图 3a）；增大流速，暴露在泥床表面的颗粒微团缕状条纹输移，见图 3b）；再增大流速，床面缕状条纹输移且泥沙条纹长度增大、间距增密、输移速度加快；当流速增大到某一值后，输沙停止，床面平整干净；当流速再次增大到某一值后，床面局部薄弱位置出现小坑，时而有少量泥沙从小坑处贴近床面悬移；当流速进一步增大，床面多处位置泥沙小块剥离，持续少量泥沙从小坑处贴近床面悬移；再稍增大流速，小坑纵向撕裂拉长，泥沙“烟雾”持续多处悬扬，泥沙普遍起动，见图 3c）~d）。盐水环境下，黏性淤泥絮凝、团聚作用增强，随着流速的增大，床面要么纹丝不动，要么起动亦是局部冲刷，见图 3e）~f）。



a) 颗粒微团



b) 缕状条纹输沙



c) 泥沙“烟雾”

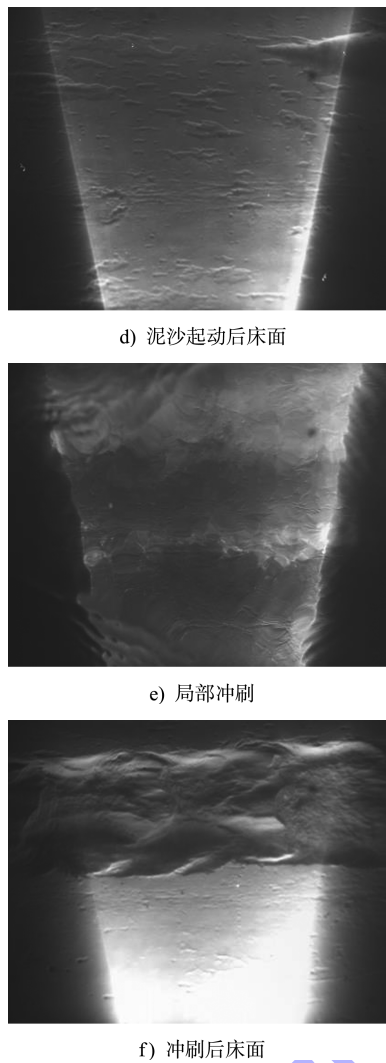


图 3 黄河花园口沙样起动现象

图 4 为黄河花园口泥沙起动流速灰度对应关系, 水体灰度值随断面平均流速 v 变化曲线很好地反映了泥沙起动全过程。泥沙起动过程中近底层水体灰度与流速成指数关系, 灰度值先缓慢增大后急剧变大, 将灰度急剧增大的突变值所对应的流速作为起动流速。泥沙起动前灰度值随流速增大时有波动, 正好对应到各级流速下泥沙起动和止动的情况, 当床面浮泥及附着凸出颗粒随泥沙带走后, 水流灰度值有所减小; 随着流速增大, 床面局部小块掀起, 少许泥沙贴近床面输移, 灰度值又有所增大。水体或泥沙含盐条件下, 泥沙起动前水体灰度变化幅度不大, 甚至泥沙起动流速的前一级流速下水体灰度值都无明显变化。但是, 稍增大流速, 水体灰度值即陡然增大, 特别是 0‰水盐泥 (仅泥沙含盐) 试验, 水体灰度值急剧增大至起动前的 2 倍。

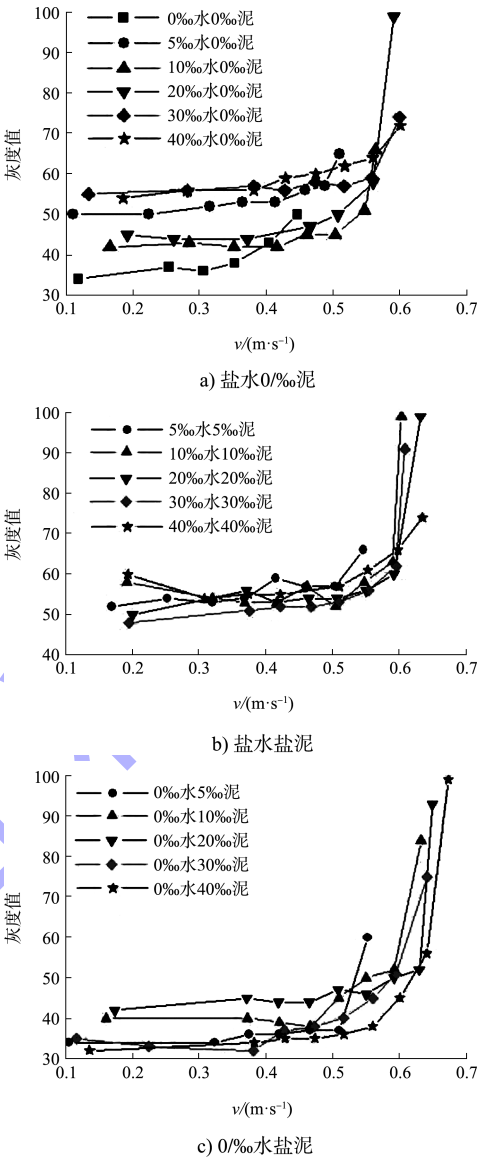


图 4 黄河花园口沙样起动过程中水体灰度随流速的变化

对于黏性泥沙含量占比仅为 9.9% 的珠江口泥沙而言, 盐度环境下泥沙虽会发生絮凝现象, 但絮凝体结构不如黄河花园口分选沙样稳固, 小流量蓄水过程便能带走一波泥沙, 在逐级增大流速过程中, 全床面均有泥沙贴近床面输移。从床面特征及水体浑浊程度的变化难以找到泥沙起动的临界值。试验过程中以铺沙段后面的玻璃底板上出现月牙状泥沙小堆作为珠江口泥沙起动试验的最后一级调控流速, 这是由于珠江口沙样级配较宽, 起动试验过程中经水流分选最后沉积在铺沙段后的泥沙颗粒较粗, 不属于黏土、粉沙质范畴。

图 5 显示珠江口泥沙流速灰度对应关系。如图 5a) 所示, 盐水 0‰泥起动过程中水体灰度值随

流速增大基本呈线性增长，且盐水 0‰泥在不同盐度条件下随流速变化趋势基本一致，起动流速相等。如图 5b) 所示，盐水盐泥在同等盐度条件下起动时，水体灰度值先缓慢增大后急剧增大，最后一级形成月牙状泥沙堆积的流速时，水体灰度值增长稍有减缓。相对于盐水 0‰泥起动灰度值的线性增长，在低流速时盐水盐泥絮团现象明显，起动颗粒及微团数量偏少，但稍增大流速，絮凝体即发生絮散现象，分散成细颗粒泥沙起动悬扬，并且盐水盐泥起动灰度值在不同盐度条件下随流速变化趋势基本一致，起动流速相同。如图 5c) 所示，0‰水盐泥絮凝现象较弱，稍增大流速，絮凝体即易发生絮散，但是各盐度条件下，0‰水盐泥的起动流速等于盐水盐泥起动流速，珠江口泥沙在盐度条件下的“絮凝”“絮散”基本不改变泥沙起动特性。

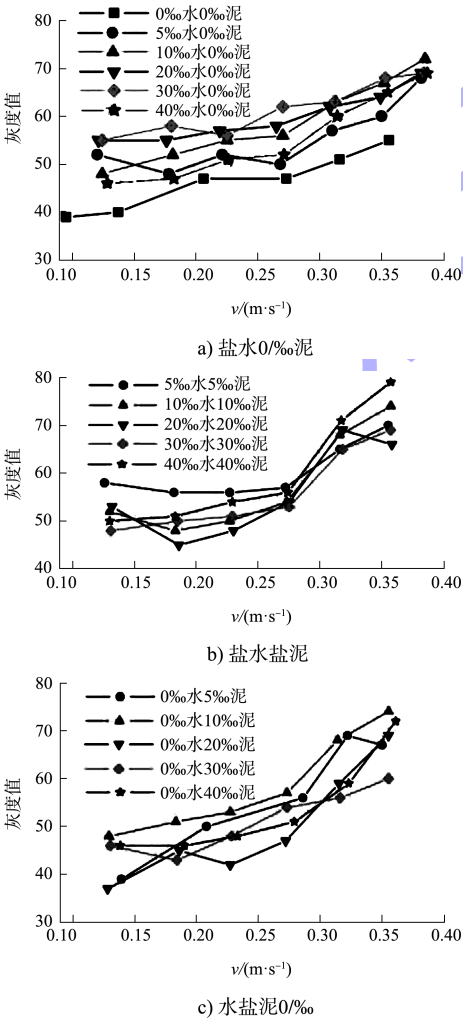


图 5 珠江口沙样起动过程中水体灰度与流速的关系

2.2 淤泥起动特性

图 6 为 2 组沙样起动流速随盐度的变化关系。黏粒占比 34.5% 的黄河花园口泥沙，表现出黏性泥沙特性。水体或黏性泥沙的含盐度越高，黏性泥沙越难起动。水体及泥沙均不含盐时起动流速最小，为 0.446 m/s；40‰盐泥在淡水条件下起动流速最大，为 0.673 m/s。黏性泥沙起动流速与水体盐度或泥沙盐度呈对数关系，盐度 0‰~10‰范围内起动流速急剧增大，10‰~40‰范围内缓慢增大。对于同一含盐度而言，0‰水盐泥（仅泥沙含盐）的起动流速最大，盐水盐泥（水体和泥沙均含盐）起动流速次之，盐水 0‰泥（仅水体含盐）起动流速最小。

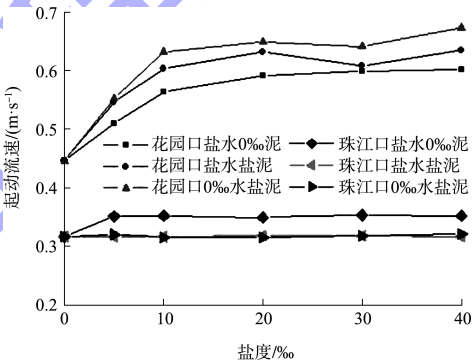


图 6 细颗粒淤泥起动流速随盐度变化关系

对比黄河花园口沙样 3 个系列泥沙起动规律可知：盐度能增强水流对黏性泥沙的驱动力以及黏性泥沙的黏性，使其抗剪切能力增强，但泥沙黏结力增强需要时间。对于盐水 0‰泥起动试验，试验过程中盐水逐渐渗入静置的沙样，沙样盐度略小于盐水盐泥起动试验所用盐泥的盐度，并且从水槽蓄水至泥沙起动约 2 h 内，盐度影响下的泥沙黏结力未达到峰值，故而同等盐度条件下，盐水 0‰泥起动流速小于盐水盐泥起动流速。另外，王梦寒等^[19]关于黏性泥沙流变特性的研究表明，本文以 520 r/min 的速率搅拌配置含盐试验沙样，搅拌速率会破坏含盐泥沙的稳定结构，使得黏度减小；但是对于黄河花园口沙样而言，黏性含量占比高达 34.5%，盐度对泥沙黏度的增大作用占主导作用，这也是盐水盐泥起动流速大于盐水 0‰泥起动流速的原因。盐水盐泥与 0‰水盐泥试验相

比,虽然所用泥样相同,但是盐水浮力大于清水浮力,作用于黏性泥沙的上举力更大,所以同等盐度条件下,盐水盐泥起动流速小于 0‰水盐泥起动流速;另外,根据相似相溶原理,盐水较 0‰水更容易渗入盐泥颗粒间盐水分子中,从而更易驱动泥沙微团起动。

黏性泥沙含量占比仅为 9.9%的珠江口泥沙属于粉沙质,盐度对泥样的起动影响甚微。水体沙样均不含盐时的起动流速最低,为 0.316 m/s;仅盐水 0‰泥的起动流速增大为 0.352 m/s。

对比珠江口沙样 3 个系列泥沙起动规律可知:水流浮力的增加对含砾的粉沙质起动而言微不足道,盐度对泥沙黏性的影响较小,高速搅拌就会使沙样发生絮散。对于盐水 0‰泥起动试验,盐水渗入静置泥床,颗粒间黏结力增大,起动流速增大。然而珠江口泥沙在盐度作用下絮凝团聚作用较小,盐度为 5‰时,泥床抗剪切能力达到最大;盐度大于 5‰后,起动流速随盐度无变化。对于盐水盐泥的起动试验,盐泥以 520 r/min 的速率加盐搅拌制成,搅拌破坏了盐泥的絮团结构,试验铺置时沙样为“絮散”颗粒,起动试验历时 2 h 内,未再次絮团至稳固结构,故而盐水盐泥起动流速小于盐水 0‰泥的起动流速,并且从盐泥制备到泥沙起动过程中,盐度与搅拌速率之间的博弈势均力敌,盐水盐泥的起动流速等于水体、泥沙均不含盐时的起动流速。对于 0‰水盐泥的起动试验,其起动流速等于盐水盐泥的起动流速,表明盐水与清水的浮力大小对于含砾石(11.9%)的粉沙质淤泥起动而言微不足道。

2.3 试验结果对比

将盐水盐泥试验结果趋势与 Bai 等^[20]、杨兵等^[21]的黏性淤泥起动试验结果进行对比分析(图 7)可知: Bai 淡水条件下实测起动流速随沙样沉积密度呈指数增长,杨兵 15‰盐水环境下实测流速大于 Bai 实测流速且随沉积密度呈线性增长,至密度 1.4 t/m³时流速与 Bai 实测比较接近。本文黄河花园口沙样随盐度变化的起动流速介于以上 2 条曲线之间,且呈带状分布。其中,淡水条件下

起动流速与 Bai 的相等,盐水条件下最大流速略小于杨兵的实测值,这跟杨兵试验沙样比本文试验沙样更细,且盐度大于 10‰之后流速随盐度增长率较低有关。乍一看本文珠江口沙样起动流速与黏性沙的相差不大,实则由于珠江口沙样级配较宽,从沙样铺置到泥沙起动,泥沙湿密度从 1.3 t/m³沉降密实至 1.4 t/m³。

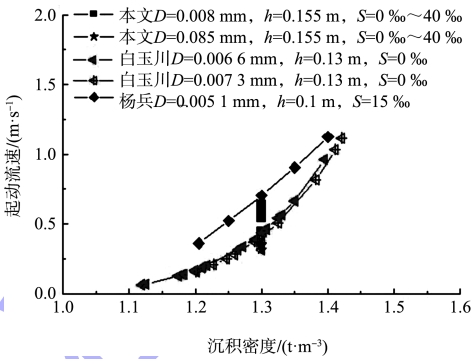


图 7 泥沙起动流速试验值

3 结论

- 1) 对于黏性淤泥,弱起动床面冲刷率低,泥床近底层水体灰度变化约为 10;普遍起动床面冲刷率显著提高,水体灰度—流速关系曲线发生突变的拐点之后的一级流速作为普遍起动,相应的水体灰度值急剧增大,可至起动前的 2 倍。
- 2) 水体或黏性泥沙的含盐度越高,黏性泥沙越难起动。黏性泥沙起动流速与水体盐度或泥沙盐度呈对数关系,盐度 0‰~10‰范围内起动流速急剧增大,10‰~40‰范围内缓慢增大。对于同一含盐度而言,盐度能增强水流对黏性淤泥的驱动力和黏性泥沙的黏性,使其抗剪切能力增强,但泥沙黏结力增强需要时间。0‰水盐泥(仅泥沙含盐)的起动流速最大,盐水盐泥(水体和泥沙均含盐)起动流速次之,盐水 0‰泥(仅水体含盐)起动流速最小。
- 3) 黏粒占比仅为 9.9%、级配较宽的珠江口泥沙起动特性有别于黏性泥沙,属于含砾粉沙质淤泥,在盐水环境下会发生絮凝现象。以 520 r/min 的搅拌速率配置的含盐粉沙质淤泥极易发生“絮散”,盐度对粉砂质淤泥的起动影响甚微。

参考文献：

[1] 张瑞瑾.河流泥沙动力学[M].北京:中国水利水电出版社,1989.

[2] 窦国仁.再论泥沙起动流速[J].泥沙研究,1999(6):1-9.

[3] 窦国仁.论泥沙起动流速[J].水利学报,1960(4):44-60.

[4] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,1983.

[5] 王军,谈广鸣,舒彩文.固结状态下黏性泥沙起动规律试验研究[J].泥沙研究,2014(6):25-29.

[6] 宗全利,夏军强,张翼,等.荆江段河岸粘性土体抗冲特性试验[J].水科学进展,2014,25(4):567-574.

[7] 黄健钧,陈国平,马洪蛟.长江口航道黏性原状土冲刷特性试验[J].水运工程,2020(9):40-44.

[8] TAN G M, LEI J, SHU C W, et al. Experimental study of scour rate in consolidated cohesive sediment[J]. Journal of hydrodynamics, 2010, 22(1):51-57.

[9] XU H T, LU J Y, LIU X. Non-uniform sediment incipient velocity[J]. International journal of sediment research, 2008(1):69-75.

[10] 洪大林,缪国斌,邓东升,等.粘性原状土起动切应力与物理力学指标的关系[J].水科学进展,2006(6):774-779.

[11] 甘甜.管道压力与水深对黏性泥沙起动影响分析[J].中国农村水利水电,2017(11):143-147,154.

[12] 甘甜,谈广鸣.压力管道与明渠中固结黏性泥沙起动对比分析[J].中国农村水利水电,2017(9):122-124,131.

[13] 周雅,马洪蛟,陈大可,等.细颗粒原状土起动流速试验研究[J].人民长江,2016,47(16):92-94,98.

[14] 刘杰章,王建军.粉细质泥沙淤积前后强度分析[J].水运工程,2020(S1):114-118.

[15] 黄伟,刘亚坤,吴华林,等.泥沙起动过程中床面切应力与含沙量关系的试验研究[J].泥沙研究,2016(1):63-67.

[16] 庞启秀,白玉川,杨华,等.淤泥质浅滩泥沙临界起动切应力剖面确定[J].水科学进展,2012,23(2):249-255.

[17] 刘洁,刘洁玉,白玉川.黏性泥沙流变特性及其临界起动的研究[J].泥沙研究,2015(6):59-64.

[18] 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.

[19] 王梦寒,王宪业,陈思明,等.黏性泥沙的物理特性与起动应力的流变学分析[J].泥沙研究,2018,43(6):8-14.

[20] BAI Y C, NG C, SHEN H T, et al. Rheological properties and incipient motion of cohesive sediment in the Haihe Estuary of China[J]. China ocean engineering, 2002, 16(4):483-498.

[21] 杨兵,蔡瑞卿,唐驰,等.单向流作用下淤泥质黏土起动试验研究[J].西南交通大学学报,2012,47(4):586-590.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第13页)

[12] WANG J D, HE G H, YOU R, et al. Numerical study on interaction of a solitary wave with the submerged obstacle[J]. Ocean engineering, 2018, 158:1-14.

[13] 李凌,林兆伟,尤云祥,等.基于动量源方法的黏性流数值波浪水槽[J].水动力学研究与进展(A辑),2007,22(1):76-82.

[14] 赵艳,朱仁庆,刘珍.三维数值波浪水池的构建和粘性影响研究[J].舰船科学技术,2014,36(5):42-48.

[15] SCHÄFFER H A. Second-order wave maker theory for irregular wave[J]. Ocean engineering, 1996, 23(1):47-88.

[16] SCHÄFFER H A, STEENBERG C M. Second-order wavemaker theory for multidirectional waves[J]. Ocean engineering, 2003, 30(10):1203-1231.

(本文编辑 王璁)