

水利水运工程学报

HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

级配影响下泥沙制约沉降特性试验研究

李子琦, 许春阳, 罗雯, 周春艳

Experimental study on the constrained settling characteristics of sediments under grading effects

LI Ziqi, XU Chunyang, LUO Wen, ZHOU Chunyan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20240620002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



扫码进入官网, 阅读更多精彩文章



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20240620002

李子琦, 许春阳, 罗雯, 等. 级配影响下泥沙制约沉降特性试验研究 [J]. 水利水运工程学报. (LI Ziqi, XU Chunyang, LUO Wen, et al. Experimental study on the constrained settling characteristics of sediments under grading effects[J]. Hydro-Science and Engineering(in Chinese))

级配影响下泥沙制约沉降特性试验研究

李子琦^{1,2}, 许春阳^{1,2}, 罗雯³, 周春艳²

(1. 河海大学 江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 盐城市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 盐城 224000)

摘要: 针对不同级配组成泥沙混合物, 利用沉降试验方法, 系统探究了级配对泥沙混合物制约沉降特性的影响, 包括对质量浓度分布、清浑界面沉降速度及沉积层厚度的分析。结果表明: 混合物制约沉降的泥沙分离现象在粉沙质量分数为 35%~38% 时尤为显著, 该粉沙质量分数可看作是不同级配组成泥沙制约沉降方式转变的临界值; 清浑界面沉降速度随粉沙质量分数或中值粒径的增大而线性增大, 依托试验数据拟合得到悬沙质量浓度为 100 g/L、盐度为 3‰条件下粉沙质量分数和界面沉降速度的经验公式; 沉积层厚度随粉沙质量分数的增加呈现逐渐减小的趋势, 粉沙质量分数较少时以黏土沉降为主导, 大体积的絮凝体堆积, 沉积层厚度大, 而随粉沙质量分数增加, 絮凝特性减弱, 以粉沙沉降为主导, 并且其结构浓度与粉砂含量为 69% 时的接近, 因此沉积层厚度较小。

关键词: 细颗粒泥沙; 多组分泥沙; 制约沉降; 级配

中图分类号: TV142.1

文献标志码: A

文章编号:

粉沙淤泥质海岸地区泥沙颗粒较细, 在极端海洋动力作用下易在港口航道内形成较厚的浮泥层, 产生大量淤积以致阻塞航道, 严重影响船舶通航安全^[1]。同时细颗粒泥沙具有吸附特性, 含有重金属等污染物, 疏浚过程中处理不当易造成二次污染^[2]。浮泥层内部泥沙质量浓度较高, 其动力特性区别于低质量浓度状态下泥沙输移特征。低质量浓度条件下泥沙沉降速度受到泥沙颗粒形状、粒径大小、密度等多种因素影响^[2-4]。随着水体中泥沙质量的增加, 含沙水体浮力、黏性增大, 且泥沙颗粒沉降过程受到周围泥沙颗粒(絮凝体)沉降产生的回流、尾流等因素的影响时^[5-6], 泥沙颗粒进入制约沉降阶段^[7]。目前国内外学者针对单一组分的泥沙条件下制约沉降开展了大量研究, 并取得了丰硕的成果^[8-9]。Richardson 等^[10]基于泥沙颗粒在水体中均匀分布的假设, 探讨了高浓度悬浮液中泥沙制约沉降过程, 采用单一的指数 n 描述泥沙制约沉降过程中黏性、尾流、浮力等制约沉降影响因素。部分学者^[11]通过探讨 Richardson-Zaki 指数 n 与雷诺数 Re 之间的关系, 进一步给出经验方程来估计 n 。Dankers 等^[12-13]针对纯黏土和纯粉沙开展了制约沉降试验, 并在 Winterwerp^[6]的研究基础上通过修正尾流项、胶凝点浓度(结构浓度)项给出了纯黏土和纯粉沙的制约沉降公式。针对混合沙的研究也在逐步开展, Cuthbertson^[14]通过理论推导认为在泥沙混合物中存在影响沉降速度的因素, 分别是泥沙相互作用、黏度增加及浮力, 并给出黏性沙和非黏性沙沉降速度公式, 在混合沙制约沉降公式的推导中考虑了滑移速度, 但缺乏相应的物理试验验证; Spearman^[15]提出了修正后的 Richardson-

收稿日期: 2024-06-20

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3008100); 国家自然科学基金资助项目(42376171); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B230201047); 国家自然科学基金合作交流项目(W2421060)

作者简介: 李子琦(2000—), 女, 广东江门人, 硕士研究生, 主要从事河口海岸水运工程相关研究。

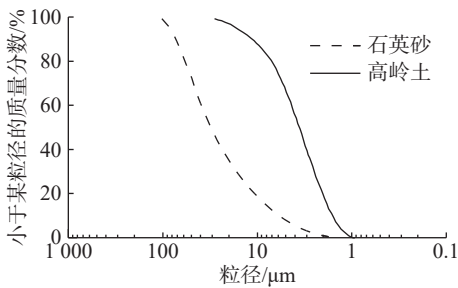
E-mail: 221303020062@hhu.edu.cn 通信作者: 许春阳(E-mail: cyxu@hhu.edu.cn)

zaki 方程, 并利用试验数据^[16-17]进行验证, 提出了沉降模型。尽管目前有不少混合沙制约沉降的研究成果, 但是针对不同比例的黏土-粉沙混合物制约沉降特性研究较为匮乏, 且由于泥沙中粉沙组分具有黏性沙和非黏性沙的双重特性, 使得混合沙制约沉降过程更为复杂。鉴于中国沿海地区广泛分布着粉沙淤泥质海岸, 黄河口、长江口及江苏沿海地区粉沙占比较大^[18-20], 长江口深水航道贯通后, 深水航道维护中泥沙疏浚量始终较大, 航道维护成本较高。本文通过开展沉降试验, 根据质量浓度分布、清浑界面沉降速度及沉积层厚度等试验数据, 结合粒径分布特征探讨泥沙级配对黏土和粉沙混合物沉降特性的影响。

1 泥沙样品及测量方法

1.1 泥沙样品

试验配置泥沙样品的人工泥沙分别是煅烧高岭土、石英砂。这两种矿物在天然流域中分布广泛, 能够较好地模拟天然河口地区不同级配组成泥沙的沉降, 并且保证了试验的可重复性。图 1(a) 为使用马尔文激光粒径分析仪 (Malvern 3000) 测得的高岭土和石英砂粒径分布, 其中高岭土粒径集中于 0~10 μm , 中值粒径 d_{50} 为 3.6 μm ; 石英砂粒径主要集中于 10~100 μm , 中值粒径 d_{50} 为 30.9 μm 。需要指出的是, 粒径 8 μm 以下的黏土和极细粉沙均具有较强黏性^[21]。文中黏土特指粒径小于 8 μm 的泥沙 (泥沙组分 A), 而粉沙特指粒径为 8~63 μm 的泥沙 (泥沙组分 B)。在进行试验分组时, 按照比例分别称取高岭土和石英砂, 随后根据级配曲线计算各组分的质量分数。试验步骤如下: 首先, 对泥沙样品进行烘干处理, 避免土样吸收空气中的水分, 影响配置试样的实际浓度。在试验分组时, 高岭土和石英砂按照一定比例进行混合, 得到 S1~S21 的沙样。由于本文仅关注泥沙级配对沉降特性的影响, 因此计算了每个沙样中高岭土和石英砂中所含黏土和粉沙的比例, 并测量了中值粒径 (表 1); 随后将泥沙样品放置在直径 10.3 cm、高 15.8 cm 的玻璃沉降筒中 (图 1(b)), 较小的沉降筒高度在一定程度上影响沉降特性。本文主要研究高含沙水体制约沉降特性 (100 g/L), 沉降速度比较小, 因此沉降时间较长 (60~180 min), 可以提供较长的时间观测清浑界面的稳定沉降速度, 且泥沙和水体的初始运动惯性也可以忽略不计。在沉降筒中加入配置含盐度为 3‰ 的水, 由于根据前人研究^[22]认为细颗粒泥沙在盐度为 0.5‰ 对于絮凝来说已经达到饱和, 且本文主要关注级配影响, 因此选择 3‰ 的盐度作为试验条件。悬沙试样初始质量浓度均为 100 g/L, 由于河口海岸地区, 在人工开挖的航道内或者在大小潮期间潮滩上近底层会形成浮泥层密度范围是 1 050~1 250 kg/m^3 , 100 g/L 悬沙试样质量浓度换算成对应的水体密度为 1 060 kg/m^3 , 在浮泥层密度范围内, 因此本文选取上述质量浓度开展试验。沉降试验开始前, 提前 24 h 将土样放入水中浸泡, 保证泥沙悬浊液在沉降开始前达到稳定状态^[23]。



(a) 石英砂、高岭土的级配曲线



(b) 沉降装置

图 1 试验泥沙级配曲线及试验装置

Fig. 1 Sediment grading curve and experimental setup

表 1 试验泥沙组分
Tab. 1 Experimental sediment composition

组次	粉沙质量分数 (泥沙组分A)/%	黏土质量分数 (泥沙组分B)/%	中值粒径/ μm	组次	粉沙质量分数 (泥沙组分A)/%	黏土质量分数 (泥沙组分B)/%	中值粒径 / μm
S1	16	84	3.6	S12	46	46	11.3
S2	19	80	3.8	S13	48	42	13.6
S3	22	77	4.0	S14	51	39	15.5
S4	24	73	4.2	S15	53	35	17.9
S5	27	70	4.5	S16	56	32	21.1
S6	30	66	4.8	S17	59	29	24.2
S7	32	63	5.3	S18	61	25	26.3
S8	35	60	5.8	S19	64	22	27.6
S9	38	56	6.5	S20	67	18	29.0
S10	40	53	7.4	S21	69	15	30.9
S11	43	49	9.0				

1.2 测量方法

在不同级配组成泥沙沉降试验过程中测量质量浓度分布、清浑界面沉降速度及沉积层厚度等参数。沉降试验开始前,以 Dankers^[12] 和 Te slaa^[13] 的试验为参照,先进行预备试验,再开始正式试验,对沉降筒进行编号并在其外壁贴上刻度标尺,保证刻度尺 0 刻度线与沉降筒底部平齐,每组次泥沙制约沉降试验的初始沉降高度均为 12.8 cm。试验同时配有 5 ml 移液枪、微量勺、玻璃培养皿进行取样工作。取样前用电子天平称量干燥培养皿的质量,取样后测量培养皿和含沙水体的总质量,将培养皿放入烘箱烘干 24 h,取出后待冷却至室温,称量培养皿和干燥泥沙的总质量,由此可计算各测点位置处的悬沙质量浓度。

沉降筒中部和底部取样前均进行多组预试验,针对取样方法进行了验证。对于沉降筒中部的泥沙使用移液枪取样。首先用电动搅拌装置将配置的质量浓度为 100 g/L 的泥沙试样充分搅拌,保证沉降筒内泥沙均匀分布,搅拌停止后短时间内系统即进入静水条件下高质量浓度泥沙制约沉降过程,水平方向速度为 0,且选取宽口的沉降筒可降低边壁的影响。此时,立刻用移液枪进行取样,烘干称量后得到 3 个组次均匀混合时的水体质量浓度分别为 104.46、98.08 和 101.02 g/L,与试验配置的泥沙质量浓度误差小于 5%,说明在泥沙沉降阶段用移液枪取样能反映该位置处的实际浓度。在制约沉降阶段后期,沉降筒底部存在明显的泥沙堆积,此时采用移液枪取样可能掉落质量较大的泥沙颗粒,因此对于沉降筒底部泥沙,利用微量勺在排尽上层水体后进行取样。为避免试验的偶然误差,均进行多组重复试验,并且每组重复试验保证试验的沉降初始状态相同。

2 试验结果及分析

根据试验所得的混合沙样品制约沉降的质量浓度分布、清浑界面的沉降速度及沉积层厚度等结果,具体分析级配对混合物制约沉降特性的影响。

2.1 质量浓度分布

2.1.1 悬沙层垂向质量浓度分布 试验中沿着垂向高度设置了 10 个取样点,以获取不同沉降时刻沉降筒内的泥沙质量浓度,取样点距离底部高度为 12、10、8 和 6 cm 的中上部测点,以及距离底部高度为 5、4、3、2、1 及 0 cm 的下部测点。根据图 2 不同粉沙质量分数下泥沙质量浓度分布,可以看出试验初期(10 min),泥沙垂向质量浓度分布较为均匀,试验后期(3h、4 h),泥沙质量浓度出现较大梯度。随粉沙质量分数或者中值粒径的增加,沉降筒底部的泥沙质量浓度显著增大,粉沙质量分数 16%(图 2(a))底部质量浓度约为 600 g/L,且近底时质量浓度增长缓慢,粉沙质量分数为 38% 时(图 2(e)),沉降筒底部质量浓度约为 1 300 g/L,近底处泥沙质量浓度快速增大。当粉沙含量增大到 43% 时,清浑界面变得模糊,制约沉降段历时随粉沙质量

分数和中值粒径的增加显著缩短,从粉沙质量分数为 16%(图 2(a))的 3 h 到粉沙质量分数为 43% 时(图 2(f))对应的 1 h 左右。制约沉降段历时指的是,在混合物制约沉降过程中,上界面即清水与泥沙混合物交界面,下界面即泥沙混合物与沉积层交界面,沉积过程中下层界面上升,而上层界面下降,最终两个界面相交的这段时间。

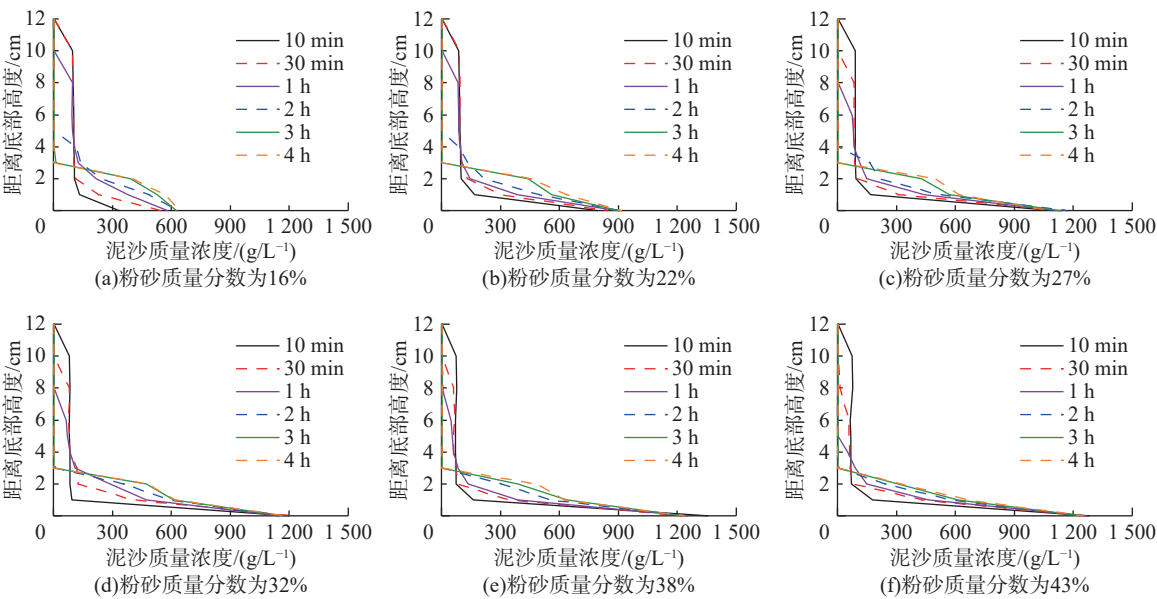


图 2 不同粉沙质量分数下的垂向质量浓度分布曲线
Fig. 2 Vertical mass concentration distribution curves under different silt mass fractions

2.1.2 沉积层质量浓度分布 沉降筒内悬沙完全沉降后,在沉降筒内形成沉积层。为分析沉积层不同高度的质量浓度变化情况,在沉降筒底部设置了取样点,分别是距离底部高度 0、2 cm 及界面处。当粉沙质量分数增加到 30%(S6),底部出现明显的黄色粉沙堆积,为细致呈现沉积层泥沙质量浓度,增设了距底部高度为 1 cm 的取样点。取样时间为悬沙层界面和底部沉积层相遇时,即制约沉降结束的時刻。从图 3 距离底部不同高度处的质量浓度分布能可见,所有样品沉积层质量浓度垂向从上到下呈现增大的趋势。上部测点的泥沙质量浓度均小于 200 g/L,底部测点泥沙质量浓度较大,质量浓度从 700 g/L 增至 1 400 g/L。当粉沙质量分数增加至 30%,沉降筒底部能观察到黄色粉沙堆积,而在粉沙质量分数增大到 35% 后,距离底部 0 和 1 cm 处的泥沙质量浓度变化显著,可能由于黏土和粉沙沉降过程中出现了明显分离,导致底部泥沙粉沙成分占主导。当粉沙质量分数达到 43% 后,距离底部 1 cm 处泥沙质量浓度维持在稳定状态。

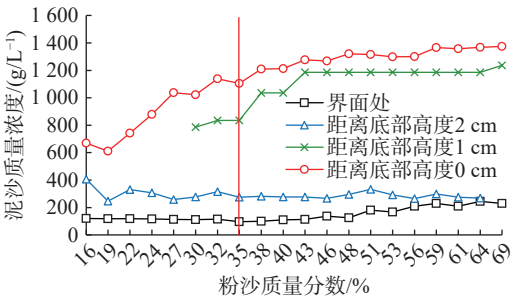


图 3 距离底部不同高度处泥沙质量浓度分布
Fig. 3 Sediment mass concentration distribution at different heights above the bottom

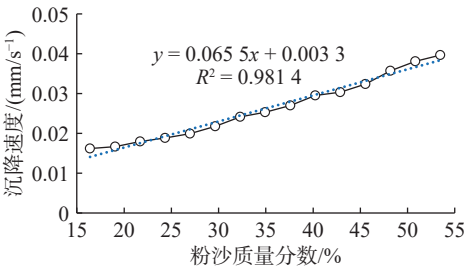


图 4 平均浑清界面沉降速度及线性拟合
Fig. 4 Average settling velocity of the clear-muddy interface and linear fitting

2.2 清浑界面沉降速度及沉积层厚度

由于粉沙质量分数大于 53% 的组次 (S16-S21) 清浑界面完全消失, 因此只呈现粉沙质量分数小于 53%(S1-S15) 的上界面沉降速度 (表 2)。图 5 为 3 组重复试验的清浑界面沉降速度平均值, 可以看出清浑界面沉降速度随着粉沙质量分数的增加呈现线性增长的趋势, 粉沙质量分数为 53%(S15) 的清浑界面沉降速度 (0.039 7 mm/s) 是粉沙质量分数 16%(S1, 沉降速度 0.016 2 mm/s) 的 2 倍多。由试验数据得到在悬沙质量为 100 g/L、盐度为 3‰ 条件下, 清浑界面沉降速度随粉沙质量分数变化的经验公式为 $y=0.065\ 5C_s+0.003\ 3$, 其中 C_s 为粉沙质量分数。当粉沙质量分数在 16%~53% 时, 可以根据上述公式计算不同级配组成泥沙混合物清浑界面沉降速度, 主要适用于静水环境下的泥沙沉降研究, 也可以用于数值模拟中验证垂向沉降过程, 为高含沙水体的制约沉降过程提供数据, 尤其是级配变化条件下高含沙水体的沉降数据, 为拓展相关模型提供数据支撑, 具有一定的参考价值。

表 2 不同粉沙质量分数清浑界面沉降速度的平均值
Tab. 2 Average settling velocity of the clear-muddy interface under different silt mass fractions

粉沙质量分数/%	沉降速度/(mm/s)	粉沙质量分数/%	沉降速度/(mm/s)
16	0.016 2	38	0.027 0
19	0.016 7	40	0.029 5
22	0.018 0	43	0.030 3
24	0.018 8	46	0.032 4
27	0.019 9	48	0.035 7
30	0.021 7	51	0.038 1
32	0.024 1	53	0.039 7
35	0.025 3		

图 5 为制约沉降完成后, 沉降筒内泥沙沉积高度。总体上, 沉积层厚度随着粉沙质量分数或中值粒径的增加逐渐减小。对比不同级配的混合物沉降 200 min 以后的沉积层厚度, 当粉沙质量分数为 16%~22%(S1-S3) 时, 沉积层厚度增大到最大值为 2.7 cm 左右, 当粉沙质量分数增大至 35%~38%(S8-S9), 沉积层厚度减小至 2 cm 左右, 并随粉沙增大趋于稳定状态。可能由于粉沙质量分数低于 35% 时, 黏土和粉沙未发生完全分离。且由于黏土颗粒容易发生絮凝形成较大的絮团结构, 沉积至底部所占空间较大, 所以沉积层厚度较大。当粉沙质量分数高于 35% 时, 泥沙中黏土质量相对减少, 絮凝效应减弱, 沉积厚度和粉沙质量分数强相关。

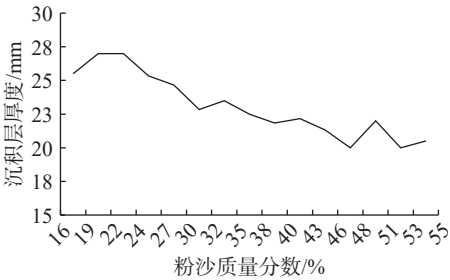


图 5 不同粉沙质量分数的沉积层厚度
Fig. 5 Sediment layer thickness under different silt mass fractions

3 讨 论

为进一步阐释混合沙制约沉降特性, 将试验过程中取样泥沙采用马尔文仪器进行颗分试验。图 7 展示了不同粉沙质量分数条件下沉降筒中泥沙粒径分布, 取样时间是在沉降 15 min 以后, 此时泥沙制约沉降进入稳定阶段, 取样点为沉降筒底部 (距离底部 0 cm) 和中部 (距离底部 6.3 cm), 其中“初始”曲线 (蓝色线) 表示的是沉降前均匀混合时的泥沙粒径分布。随着粉沙质量分数的增加, 沉降筒中部的泥沙粒径分布规律未发生明显变化, 绝大多数泥沙的粒径小于 10 μm; 沉降筒底部的泥沙粒径分布曲线从初始的双峰形, 随粉

沙质量分数增大变成单峰形,右峰值逐渐增大,左峰趋于平缓。在粉沙质量分数增大到 38% 时 (图 6(e)), 底部泥沙粒径分布规律与粉沙质量分数为 69% 时 (图 6(f)) 的相近, 说明粉沙质量分数达到 38% 时出现明显泥沙分离现象。

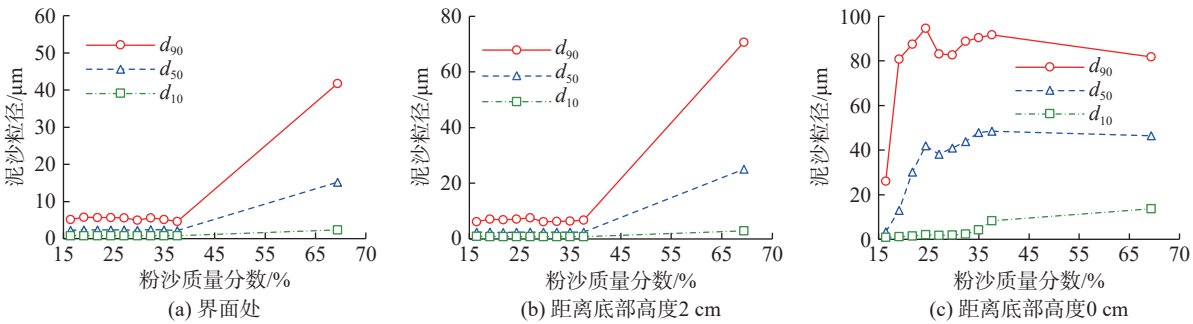


图 7 沉积层不同高度处特征粒径

Fig. 7 Characteristic particle size at different heights within the sediment layer

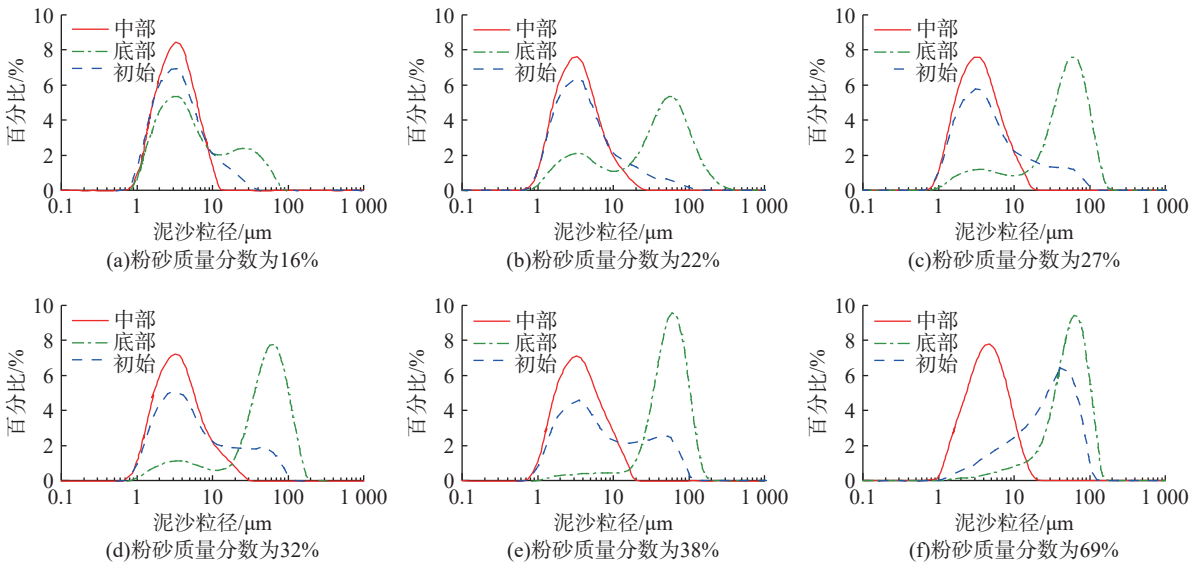


图 6 不同粉沙质量分数下垂直向粒径分布

Fig. 6 Vertical particle size distribution under different silt mass fractions

当粉沙质量分数小于 35%(S8) 时, 由于黏土颗粒小, 黏土形成的絮凝体裹挟着粉沙颗粒下沉, 在沉降筒底部能测得粉沙和较多的黏土, 此时混合物沉降以黏土为主导, 泥沙主要以絮凝体的形式堆积在底层, 占据的空间相对较大, 因此沉积层厚度更大。随着粉沙质量分数或中值粒径的增大, 絮凝效应减弱, 粉沙粒径大导致沉降速度大及制约沉降历时缩短, 此时混合物以粉沙沉降起主要作用, 并且其结构浓度与粉砂含量为 69% 时的接近 (结构浓度指泥沙颗粒初始沉降后形成稳定的骨架结构对应的泥沙质量浓度), 因此沉积层厚度较小。

沉降稳定后选择粉沙质量分数为 16%~38%(S1-S9) 和粉沙质量分数为 69%(S21) 共计 10 个组次的沉降试验, 在沉积层设置 3 个取样点 (清浑界面交界处、距离底部 2 cm 和 0 cm 处) 进一步分析泥沙粒径变化规律。从图 7 不同高度处的特征粒径变化曲线可见, 沉积层上部测点处的泥沙为小粒径的黏土颗粒, 中值粒径在 3 μm 左右, 随着粉沙质量分数的增大, 该位置的泥沙组分几乎没有发生变化。而距离底部 0 cm 处的 d_{90} 和 d_{50} 随着粉沙质量分数增大均显著提高。 d_{90} 对粉沙质量分数的变化最为敏感, 在粉沙质量分数为 19%(S2) 时已增大到 80 μm, 随粉沙质量分数进一步增大 d_{90} 的值保持稳定。 d_{50} 变化相对缓和, 粉沙质量分

数从 16%(S1) 增加至 24%(S4) 时, d_{50} 较快增长至 40 μm , 此时沉降筒底部既能测量到大粒径的粉沙颗粒, 也能测量到部分黏土颗粒。当粉沙质量分数的增大到 35%(S8) 时, 沉积层已几乎不存在黏土组分, 这表明黏土的絮凝作用随粉沙质量分数增加而减弱, 大颗粒粉沙迅速在沉降筒底部堆积, 黏土由于粒径较小, 沉速较缓, 堆积在沉积层上部, 出现明显的泥沙分离现象。当粉沙质量分数超过 35%, d_{50} 粒径值与粉沙质量分数最高时基本一致。因此, 粉沙质量分数为 35%~38% 可以看作不同级配组成泥沙混合物制约沉降方式转变的临界值。

4 结 语

本文按比例混合石英砂和高岭土, 制备了不同级配的粉沙黏土泥沙混合物, 并通过制约沉降试验, 测量了垂向质量浓度分布、清浑界面沉降速度及沉积层厚度, 具体分析了级配对混合物沉降特性的影响, 得出了以下结论:

(1) 混合物制约沉降的泥沙分离现象在粉沙质量分数为 35%~38% 时尤为显著。在粉沙质量分数为 35%~38% 时, 沉降筒底部泥沙粒径分布和粉沙质量分数为 69% 的接近, 沉积层已几乎不存在黏土组分, 黏土沉积在沉积层上部, 粉沙堆积在沉积层底部, 因此粉沙质量分数 35%~38% 可以作为不同级配组成泥沙混合物制约沉降方式转变的临界值。

(2) 混合物制约沉降过程中的清浑界面沉降速度随粉沙质量分数或中值粒径的增加而线性增大。其中粉沙质量分数为 53% 的清浑界面沉降速度是粉沙质量分数为 16% 的 2 倍多, 在悬沙质量浓度为 100 g/L、盐度为 3‰条件下, 粉沙质量分数在 16%~53% 时, 基于粉沙质量分数作为自变量的线性经验公式可以较好的计算清浑界面沉降速度。

(3) 混合物沉积层厚度随着粉沙质量分数或中值粒径的增加逐渐减小。当粉沙质量分数小于 35% 时, 混合物沉降主要以黏土为主导, 泥沙以絮凝体的形式沉积在底部, 占据的空间较大, 沉积层厚度较大; 当粉沙质量分数增大, 黏土絮凝作用减弱, 混合物沉降以粉沙沉降为主导, 并且其结构浓度与粉砂含量为 69% 时的接近, 因此沉积层厚度较小。

参 考 文 献:

- [1] 朱文武, 李九发, 姚弘毅, 等. 长江河口北槽河道悬沙絮团特性及其影响因素研究[J]. *海洋学报*, 2016, 38(3): 88-97. (ZHU Wenwu, LI Jiufa, YAO Hongyi, et al. Study on sediment floccules and the influence factors in the North Passage of the Changjiang Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(3): 88-97. (in Chinese))
- [2] 李慧梅, 陈建国, 袁玉萍. 高含沙浑水在絮凝剂作用下的絮凝沉降试验研究[J]. *泥沙研究*, 2006(4): 73-77. (LI Huimei, CHEN Jianguo, YUAN Yuping. Experimental research on flocculated sediment settling in high sediment-contents under flocculating admixture[J]. *Journal of Sediment Research*, 2006(4): 73-77. (in Chinese))
- [3] PORTELA L I, RAMOS S, TEIXEIRA A T. Effect of salinity on the settling velocity of fine sediments of a harbour basin[J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 165: 1188-1193.
- [4] 乔光全, 张金凤, 张庆河, 等. 紊动对黏性泥沙絮凝沉降影响的实验研究[J]. *天津大学学报*, 2014, 47(9): 811-816. (QIAO Guangquan, ZHANG Jinfeng, ZHANG Qinghe, et al. Experimental investigation of the influence of turbulence on the flocculation and settling of cohesive sediment[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2014, 47(9): 811-816. (in Chinese))
- [5] MEHTA A J. Characterization of cohesive sediment properties and transport processes in estuaries[M]//Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies. New York Inc.: Springer-Verlag, 2013: 290-325.
- [6] Winterwerp J C, Van Kesteren W G. Introduction to the physics of cohesive sediment dynamics in the marine environment[M].

Amsterdam: Elsevier, 2004.

- [7] WINTERWERP J C. On the flocculation and settling velocity of estuarine mud[J]. *Continental Shelf Research*, 2002, 22(9): 1339-1360.
- [8] PENG C, CHEN S G, WANG Y N. Experimental study on sand blocking characteristics of silt curtain in the ocean nearshore settling basin[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 621(1): 012078.
- [9] DE LEEUW J, LAMB M P, PARKER G, et al. Entrainment and suspension of sand and gravel[J]. *Earth Surface Dynamics*, 2020, 8(2): 485-504.
- [10] RICHARDSON J F, ZAKI W N. The sedimentation of a suspension of uniform spheres under conditions of viscous flow[J]. *Chemical Engineering Science*, 1954, 3(2): 65-73.
- [11] ROWE P N. A convenient empirical equation for estimation of the Richardson-Zaki exponent[J]. *Chemical Engineering Science*, 1987, 42(11): 2795-2796.
- [12] DANKERS P J T, WINTERWERP J C. Hindered settling of mud flocs: theory and validation[J]. *Continental Shelf Research*, 2007, 27(14): 1893-1907.
- [13] TE SLAA S, VAN MAREN D S, HE Q, et al. Hindered settling of silt[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 141(9): 4015020.
- [14] CUTHBERTSON A, DONG P, KING S, et al. Hindered settling velocity of cohesive/non-cohesive sediment mixtures[J]. *Coastal Engineering*, 2008, 55(12): 1197-1208.
- [15] SPEARMAN J, MANNING A J. On the hindered settling of sand-mud suspensions[J]. *Ocean Dynamics*, 2017, 67(3/4): 465-483.
- [16] TE SLAA S, HE Q, VAN MAREN D S, et al. Sedimentation processes in silt-rich sediment systems[J]. *Ocean Dynamics*, 2013, 63(4): 399-421.
- [17] VAN L A, PHAM VAN BANG D. Hindered settling of sand-mud flocs mixtures: from model formulation to numerical validation[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 53: 1-11.
- [18] 王孟瑶, 金秉福, 王昕, 等. 废黄河口门外砂质海滩粒度和重矿物特征及其成因机理分析[J]. *海洋科学*, 2019, 43(1): 50-60. (WANG Mengyao, JIN Bingfu, WANG Xin, et al. Characteristics of grain size and heavy minerals of sandy beach outside the abandoned Yellow River Estuary and its genetic mechanism[J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(1): 50-60. (in Chinese))
- [19] 蒋超. 黄河口动力地貌过程及其对河流输入变化的响应[D]. 上海: 华东师范大学, 2020. (JIANG Chao. [d]. Shanghai: East China Normal University, 2020. (in Chinese))
- [20] 师长兴. 黄河口不同粒度泥沙沉积与扩散分析[J]. *地理研究*, 2021, 40(4): 1125-1133. (SHI Changxing. Deposition and dispersal of different grain-size sediments in the Yellow River Estuary[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(4): 1125-1133. (in Chinese))
- [21] VAN RIJN L C. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas[M]. Amsterdam: Aqua Publications, 1993.
- [22] SHEN X T, MAA J P Y. A camera and image processing system for floc size distributions of suspended particles[J]. *Marine Geology*, 2016, 376: 132-146.
- [23] DE WIT P J, KRANENBURG C. Liquefaction and erosion of China clay due to waves and current[C]//Coastal Engineering 1992. Venice, Italy. New York, NY: American Society of Civil Engineers, 1993: 2937-2948.

Experimental study on the constrained settling characteristics of sediments under grading effects

LI Ziqi^{1,2}, XU Chunyang^{1,2}, LUO Wen³, ZHOU Chunyan²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Yancheng Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yancheng 224000, China)

Abstract: Targeting sediment mixtures of different grading compositions, a series of settling experiments were conducted to systematically investigate the influence of grading on the constrained settling characteristics of sediment mixtures. The study analyzed mass concentration distribution, the settling velocity of the clear-muddy interface, and the thickness of the sediment layer. Results indicate that the constrained settling phenomenon of sediment separation is particularly pronounced when the silt mass fraction is between 35% and 38%, which can be considered the critical value for the transition in constrained settling modes of sediments with different grading compositions. The settling velocity of the clear-muddy interface increases linearly with the silt mass fraction or median particle size. An empirical formula for the silt mass fraction and interface settling velocity was derived based on experimental data under conditions of a suspended sediment mass concentration of 100 g/L and a salinity of 3 ‰. The sediment layer thickness decreases gradually with an increase in silt mass fraction. When the silt mass fraction is low, clay-dominated settling leads to the accumulation of large flocs, resulting in a thicker sediment layer. As the silt mass fraction increases, flocculation weakens, and silt-dominated settling occurs. The structural concentration approximates that of a silt content of 69%, leading to a thinner sediment layer.

Key words: fine-grained sediment; multi-component sediment; constrained settling; grading