科学通报 2018 年 第 63 卷 第 7 期: 684 ~ 692
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

高含沙“浮泥”运动判别水槽试验

李涛[1,2*], 张俊华[1], 夏军强[2], 郜国明[1,2], 任智慧[1], 闫振峰[1]

1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院黄河小浪底研究中心, 郑州 450003;
2. 武汉大学水利水电学院, 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072
* 联系人, E-mail: litao@hky.yrcc.gov.cn

2017-08-23 收稿, 2017-09-05 修回, 2017-09-06 接受, 2017-11-16 网络版发表
国家自然科学基金(51679103, 51309110, 51509100, 51409116)、水利公益性行业科研专项经费项目(201401023, 201501003, 201501033-2)和黄河水利科学研究院院所长基金(HKY-JBYW-2017-19)资助

摘要 为研究高含沙“浮泥”及其后续异重流水流要素的变化, 以进口流量、含沙量和“浮泥”的含沙量为变量, 在水槽中开展了21次异重流与“浮泥”作用概化试验. 结果表明, 具有宾汉剪切力的“浮泥”与不同含沙量形成异重流的水流剪切力的差别作用, 产生了有区别的头部形态, 可分为侵入型与界面型; 不同含沙量的异重流不仅影响了浑水厚度和掺混情况, 而且决定了异重流头部运动形态, 异重流的流量主要影响异重流的浑水厚度和运动速度; 前期异重流沉降形成的“浮泥”随历时的增加容重增加由快到慢. 结合理论分析, 获得了“浮泥”层起动的临界判数; 基于试验数据, 提出了由异重流厚度、比降、体积比含沙量组成的计算公式. 研究成果既可丰富河流泥沙动力学学科内容, 又可为多沙河流水库调度与规划设计提供技术参考.

关键词 水库“浮泥”, 宾汉剪切力, 水流剪切力, 水槽试验, 临界判数

“浮泥”的研究大约始于20世纪50年代, Inglis和Allen[1]在研究Thames河的泥沙运动时首次使用了“浮泥”(fluid mud)这一名称. 自此, 呈现出区别于牛顿流体特性的、含沙浓度范围很广(10000~150000 ppm)的泥水混合物都被称为“浮泥”. Migniot[2]和荷兰工程咨询家协会(Nether Lands Engineering Consultants)[3]也分别用过“cremede vase”和“sling mud”等名称. Kirby和Parker[4]定义在经历静止沉降、密实过程后具有1.3~1.7 t/m^{3}密度的黏性细颗粒泥沙淤积体为“浮泥”. 由于“浮泥”定义的困难和使用的随意性, Parker和Hooper[5]基于回声探测仪探测水下淤泥的密度梯度而不是密度本身的原理, 采用了“高浓度水底泥层”(hyper concentrated benthic layers)这一名称替代了“浮泥”. 对于“浮泥”的定义与界定理论不一.

对于“浮泥”的形成, 前人[6,7]通过大量的研究试验达成了共识: 黏性悬沙在沉降过程, 由于絮凝作用, 使得泥沙颗粒形成絮凝结构, 到一定浓度后, 絮凝颗粒聚集成蜂窝状高含沙絮团结构, 并于其与上层水体间出现清晰界面, 便形成“浮泥”. 钱宁和万兆惠[8]认为, “浮泥”形成的必要条件是其悬沙落淤率大于其沉积率. 徐建益等人[9]认为, “浮泥”形成的条件: 一是细颗粒泥沙多; 二是水动力条件相对较弱. 前人主要针对河口区的“浮泥”开展的研究.

贾复等人[10]开展了两种不同密度的异重流的流态观测的水槽试验, Fernandez等人[11]开展了不同场次的异重流追赶试验, 二者的相同之处在于均为两次异重流, 不同之处在于前者的试验是两场异重流不同流向, 后者是相同流向的异重流. 从以上看出, 尚无两场次泥沙异重流相互作用研究, 且是第一场次异重流停滞、沉降后, 第二次异重流到来时与第一

引用格式: 李涛, 张俊华, 夏军强, 等. 高含沙“浮泥”运动判别水槽试验. 科学通报, 2018, 63: 684–692
Li T, Zhang J H, Xia J Q, et al. Experiments on critical judgment parameter of heavily silt-laden fluid mud (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 684–692, doi: 10.1360/N972017-00910

© 2017《中国科学》杂志社

场次停滞异重流的相互作用.

在小浪底水库调水调沙的方案计算与实测数据对比研究过程中, 研究者发现由于异重流排沙而产生的“滞留层”与以往学者研究的“浮泥”有相似之处. 黄河中出现的高含沙水流具有一般河流水沙运动不具备的特性, 即高含沙就可能发生“减阻(阻力骤减)”、“揭河底(块状冲刷)”、“浆河(整体淤积)”与“间歇流(阵性流动)”现象, 这些现象与高含沙水流黏弹性体和宾汉体的混合特性有关.

本文在了解黄河高含沙水流沉降特性、黏弹性体和宾汉体的混合特性基础上, 采用水槽试验和理论分析相结合的手段, 建立高含沙水流流变特性与泥沙中值粒径、体积比含沙量关系, 并开展了水库“浮泥”层起动的理论推导和水槽试验研究. 这既可为水库“浮泥”数学模型提供物理图形与参数, 又可为制定合理的黄河调水调沙预案提供理论依据.

1 试验条件

浑水异重流槽宽突变的水槽试验在水利部黄河泥沙重点实验室的自动调坡水槽内进行, 水槽约40 m长, 有效段36 m. 槽宽60 cm, 深40 cm. 见图1.

水槽坡度通过电动机驱动蜗轮和蜗杆调节, 调坡的范围为0.5‰~15‰, 精确度达0.5‰. 采用电磁流量计控制进入水槽流量, 并通过闸板插拔的方式控制水流从水槽底部加入, 以直接形成异重流. 出口通过调整固定闸板配合试验.

根据水槽比降、进口流量与含沙量等条件共安排了6组试验, 模拟了在不同时间间隔又发生洪水产生异重流与前期浑水层之间的作用与影响, 其中每一组又依次施放了多次浑水异重流叠加过程, 试验组次水沙与边界条件见表1. 表中n为试验组数, i为某组试验施放浑水形成异重流的叠加次数. 试验用沙泥沙级配曲线见图2. 按试验要求配制各种不同含沙量的浑水备用.

2 试验结果分析

2.1 试验过程

将玻璃水槽比降调至控制值, 充满清水, 提前在搅拌池中配置一定含沙量的浑水. 试验开始后施放拟定的浑水过程, 形成异重流过程, 关闭尾门后在水槽底部形成浑水层. 根据试验要求静置2~24 h不等历时, 浑水层悬沙产生沉降、絮凝、淤积, 形成含沙量不同的“浮泥”层. 在此基础上, 再叠加施放一次浑水异重流过程. 由于两场次异重流过程含沙量与之间的时间间隔不同, 异重流与前期“浮泥”层之间的相互作用, 表现出不同的流动现象.

在1-1组次所形成的浑水水库基础上, 依次叠加了1-2, 1-3, 1-4, 1-5组次试验. 1-1组次为第1试验组中的首次试验, 初始地形为原始槽底. 该组次流量Q=0.20 L/s, 含沙量S=200 kg/m^3, 水槽比降为5‰, 进口闸门开度H=2 mm, 释放的浑水持续时间64 s, 异重流头部运行距离10.2 m(平均速度约0.159 m/s)时关闭进口闸门, 226 s后异重流头部运行26.3 m到达尾门(平均速度约0.115 m/s), 尾门反射波运行了3.06 m后消失, 形成浑水层. 各组次头部运动现象见表2.

异重流的头部出现了3种不同情况.

(1) 后续异重流浑水切应力大于前期“浮泥”层屈服应力. 当后续异重流浑水切应力大于前期“浮泥”层屈服应力时, 头部流速最大点以下厚度与前期

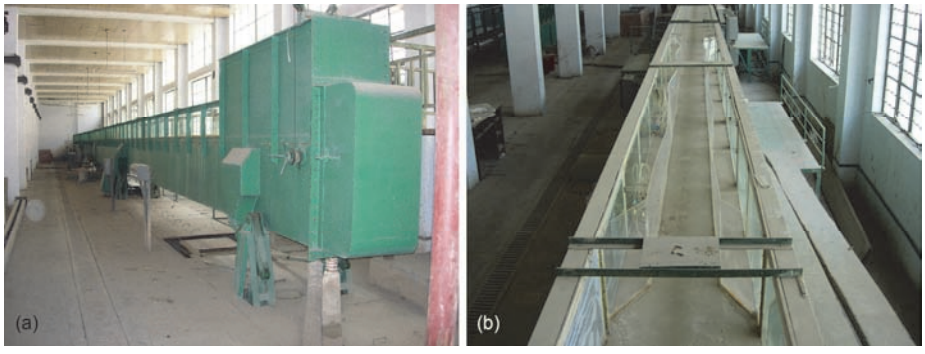


图 1 (网络版彩色)水槽全景图

Figure 1 (Color online) The panorama of water channel

表 1 试验组次[a)]

Table 1 Test group

组次(n-i)	Q(L/s)	S(kg/m^3)	初始比降 J(‰)	组次简述 (Q-S-J)
1-1	0.20	200		0.20-200-5
1-2	0.08	200		0.08-200-5
1-3	0.18	200	5	0.18-200-5
1-4	0.30	300		0.30-300-5
1-5	0.60	300		0.60-300-5
2-1	0.18	100		0.18-100-5
2-2	0.60	100	5	0.60-100-5
2-3	0.30	100		0.30-100-5
3-1	0.06	250		0.06-250-5
3-2	0.18	250	5	0.18-250-5
3-3	0.18	250		0.18-250-5
4-1	0.30	300		0.30-300-25
4-2	0.20	300	25	0.20-300-25
4-3	0.45	300		0.45-300-25
5-1	0.35	300	10	0.35-300-10
5-2	0.45	300		0.45-300-10
6-1	0.35	350		0.35-350-10
6-2	0.50	300	10	0.50-300-10
6-3	0.35	350		0.35-350-10
6-4	0.35	180		0.35-180-10

a) 表中Q, S, J分别表示进口流量、含沙量、水槽底坡比降

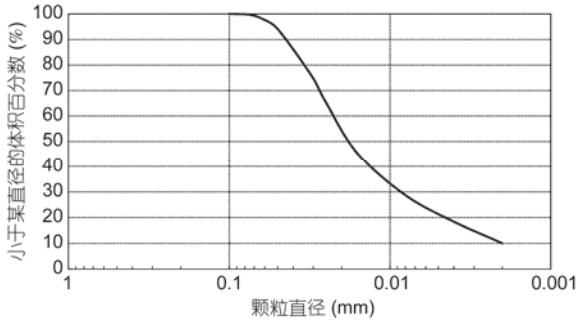


图 2 试验用沙颗粒级配曲线

Figure 2 The particle grading curve of test sand

“浮泥”层厚度接近, 异重流鼻端嵌入前期“浮泥”层表层, 后续洪水在破坏前期“浮泥”层的基础上形成异重流, 例如1-2, 1-3两组次, 虽然初始含沙量相同, 但由于进入水槽的流量不同, 与清水掺混程度不同, 形成异重流的含沙量也不同, 试验过程中在不同槽段出现的现象(图3), 以下文中均称之为侵入型异重流.

表 2 试验现象描述[a)]

Table 2 The description of experiment phenomenon

试验组次	观测范围 (m)	试验条件 (Q-S-J)	头部运动现象描述
1-1	0.0~36.0	0.20-200-5	界面型
1-2	0.0~18.4	0.08-200-5	界面型
	18.4~36.0		侵入型
1-3	0.0~4.8	0.18-200-5	界面型
	4.8~16.6		侵入型
	16.6~36.0		界面型
1-4	0.0~36.0	0.30-300-5	界面型
1-5	0.0~36.0	0.60-300-5	侵入型
2-1	0.0~24.0	0.18-100-5	界面型
2-2	0.0~36.0	0.60-100-5	侵入型
2-3	0.0~36.0	0.30-100-5	侵入型
3-1	0.0~36.0	0.06-250-5	界面型
3-2	0.0~36.0	0.18-250-5	界面型
3-3	0.0~36.0	0.18-250-5	界面型
4-1	0.0~36.0	0.30-300-25	界面型
4-2	0.0~1.0	0.20-300-25	侵入型
	1.0~36.0		界面型
4-3	0.0~16.5	0.45-300-25	侵入型
	16.5~36.0		界面型
5-1	0.0~36.0	0.35-300-10	界面型
5-2	0.0~2.0	0.45-300-10	侵入型
6-1	0.0~36.0	0.35-350-10	界面型
6-2	0.0~36.0	0.50-300-10	界面型
6-3	0.0~36.0	0.35-350-10	界面型
6-4	0.0~36.0	0.35-180-10	界面型

a) 表中Q, S, J分别表示进口流量(L/s)、含沙量(kg/m^3)、水槽底坡比降(‰)

(2) 后续异重流浑水切应力不大于前期“浮泥”层屈服应力. 当后续异重流浑水切应力不大于前期“浮泥”层屈服应力时, 异重流在前期“浮泥”层表层滚动, 基本不与前期“浮泥”层有掺混. 例如3-2, 3-3等组次, 见图4. 以下文中均称之为界面型异重流.

(3) 运动过程中转化. 由于浑水挟带泥沙沿程发生分选, 沿程“浮泥”层级配与容重不同, 而且异重流在运动过程中亦发生沿程分选, 水流含沙量沿程调整. 相对而言, 相同历时、相同含沙量, 粒径越小的颗粒沉速越小, 形成宾汉体的可能性越大, 粒径越大的颗粒沉速越大, 形成宾汉体的可能性越小. 此条件发生调整, 异重流在运动过程中, 沿程发生由侵入型的异重流转变为在前期“浮泥”层滚动的界面波型.

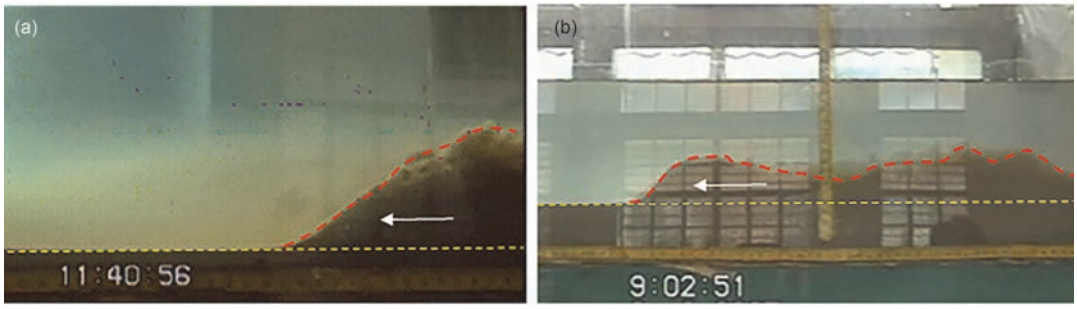


图 3 (网络版彩色)后期洪水形成异重流以潜入型在前期“浮泥”层中运动

Figure 3 (Color online) The density current running in fluid mud at sinking type

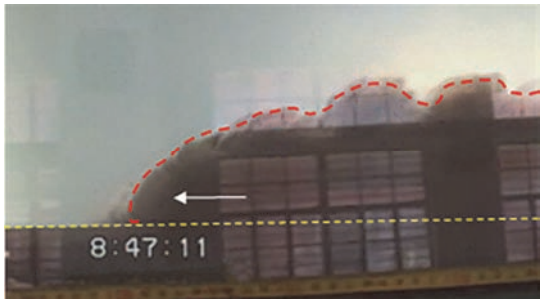


图 4 (网络版彩色)后期洪水形成异重流在前期淤积物表面以界面型运动

Figure 4 (Color online) The density current running on depositing matter at interface type

例如4-3组次，图5(a)与(b)，在经过垂线含沙量取样断面的23 s(图5(a))时为侵入型，在紧接着的24 s处(图5(b))已转化为界面型．在某些情况下，还会发生异重流在前期“浮泥”层表面滚动至尾门，经闸门反射后在前期“浮泥”层上运动到进口，如6-3组次图5(c).

2.2 头部流速变化分析

图6为异重流头部流速沿程变化图．从图中可以看出:

(1) 施放一定体积的浑水，塑造的首次异重流运行随着距离的增加流速逐渐减小，之后在水槽底部形成浑水层，且随着历时递增出现由厚变薄的压缩现象，浑水层的容重在垂向存在梯度;

(2) 后续异重流的切应力大于前期“浮泥”层的宾汉剪切力时，异重流可侵入前期“浮泥”层，流速减小．异重流头部运动为侵入型．如图6(b);

(3) 后续异重流的切应力小于前期“浮泥”层的宾汉剪切力时，异重流头部在前期“浮泥”层表面以界面型运行，流速较上一组次试验增大，并出现波动．

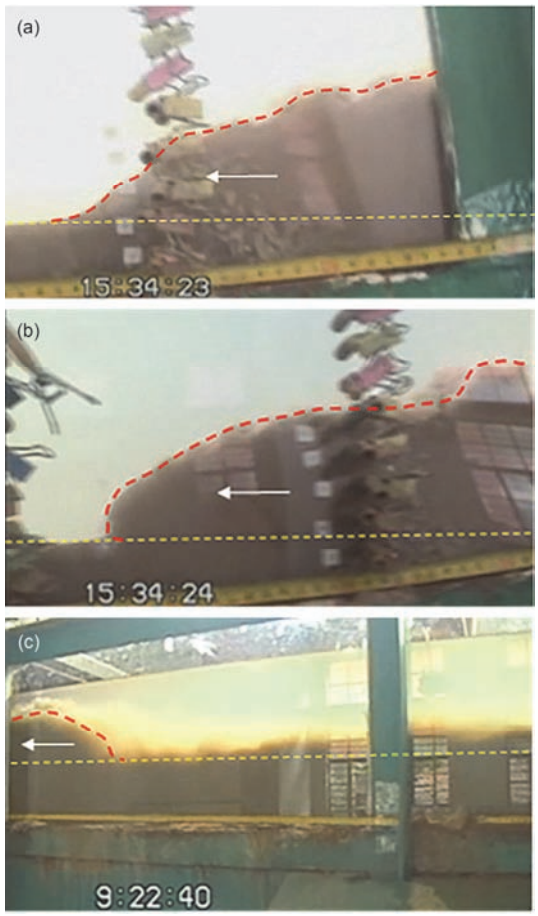


图 5 (网络版彩色)历次后续洪水异重流运动过程中转化

Figure 5 (Color online) The transformation of density current movement pattern

如图6(c).

表3和4分别为1~3组次头部流速统计表、不同组次头部流速对比表．从中可以看出，侵入型与界面型运动时流速存在相同点和不同点．相同点是异重流发生这两种现象时，平均流速均为沿程减小；不同点

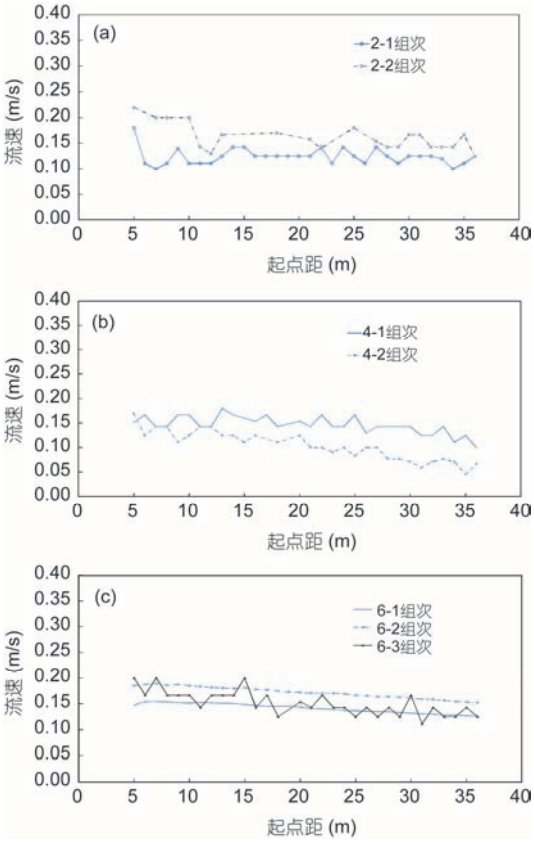


图 6 (网络版彩色)异重流在水槽沿程各点处头部流速变化图

Figure 6 (Color online) The graph of density current head velocity variation in channel

表 3 1~3 组次头部流速统计表

Table 3 The statistical table of head velocity in 1–3 group

时刻(s)	起点距(m)	流速(m/s)	现象
39	4.8	0.123	界面型转为侵入型
113	16	0.142	侵入型转为界面型

表 4 不同组次头部流速对比表

Table 4 The comparison table of head velocity in different group

1~4组次		1~5组次	
起点距(m)	沿程界面型(m/s)	起点距(m)	沿程侵入型(m/s)
16.9	0.117	15.2	0.253
21.6	0.107	22.0	0.244
27.1	0.106	23.0	0.237
32.2	0.101	25.0	0.227
33.8	0.098	27.0	0.220
34.9	0.098	31.0	0.211
36.1	0.095	33.8	0.202
39.5	0.069	36.0	0.199

是界面型异重流平均流速大于侵入型平均流速，这说明异重流头部以侵入型运行时与前期浮泥层掺混，可能遇到的阻力较界面型时大.

前期洪水“浮泥”层沿程分选，发生不均匀沉降和淤积，上游段泥沙颗粒级配较下游段的为粗，在相同的历时条件下，上游段浑水层水流剪切力大于下游段的. 在后续洪水进入水槽后，其水流剪切力小于上游段的宾汉剪切力，出现界面型头部现象，在向下游运动过程中，大于某段宾汉剪切力后，异重流头部将发生由侵入型到界面型的现象；继续运动后，由于洪水与周围流体掺混，洪水水流剪切力减小，异重流头部将在某处发生侵入型转变为界面型的现象.

2.3 异重流形成“浮泥”与运动机理

异重流发生时，实际上是浑水在两层不同密度的介质中传播，上层介质为清水，下层介质为前期“浮泥”层. 当前期“浮泥”层的屈服切应力大于异重流有效切应力时，前期“浮泥”层表现为固体特性，只发生应变，淤积物无流动，异重流以界面型运动；当前期“浮泥”层的屈服切应力小于异重流有效切应力时，前期“浮泥”层表现为液体特性，两层之间产生了应变速率，淤积物发生流动，后续异重流以侵入型运动.

对于大多数液体而言，剪切变稀作用是可逆的，但常常滞后一些时间. 当剪切速率减小或剪切停止时，液体将回复其原来的高黏度，即链状分子回复其无取向的自然位置，变形了的液滴回复为球形，聚集体因布朗运动重新形成. 流变学文献指出，物料剪切变稀的另一个可能原因就是从溶解的分子或颗粒中脱出一溶剂层，意味着引起流动阻力的分子间相互作用减弱.

有效切应力公式:

$$\tau = (\gamma_s - \gamma_0)hJ, \tag{1}$$

式中，τ为有效切应力，γ_s, γ_0分别为浑水、清水容重，h为浑水水深，J为比降.

直接采用文献[12]中已经建立的公式形式，本试验开展前，对试验沙样进行了相关的流变试验对公式的指数率定，得出小浪底水库坝区泥沙悬液宾汉极限剪切力即屈服应力随含沙浓度、中值粒径变化如下:

$$\tau_B = 0.15\times10^{-3}\frac{S_v^{\,5}}{D_{50}^{\,3}}, \tag{2}$$

式中，τ_B为宾汉极限剪切力，S_v为含沙浓度，D_{50}为中值

粒径.

此时, 定义浮泥层流动判数

$$I=\frac{\tau}{\tau_{\mathrm{B}}}, \tag{3}$$

当I>1浮泥层方可流动; I≤1浮泥层停滞.

水流中挟带泥沙后, 容重比清水增加, 关系式为

$$\gamma=\gamma_S S_v+\gamma_0\left(1-S_v\right)=S+\gamma_0\left(1-\frac{S}{\gamma_S}\right)=\gamma_0+S\left(\frac{\gamma_S-\gamma_0}{\gamma_S}\right), \tag{4}$$

式中, S为质量含沙量, S_v为体积含沙量, γ为浑水容重, γ_0为清水容重, γ_S为泥沙容重, 取2650 kg/m^3.

根据式(2)~(4)可得

$$I=\frac{\tau}{\tau_{\mathrm{B}}}=\frac{(\gamma-\gamma_0)hJ}{0.15\times10^{-3}\dfrac{S_V^5}{D_{50}^3}}=\frac{0.623SD_{50}^3hJ}{1.15\times10^{-21}S^5}=\frac{D_{50}^3hJ}{1.84\times10^{-21}S^4}. \tag{5}$$

当I=1可得浑水特征厚度

$$h=\frac{CS^4}{D_{50}^3J}, \tag{6}$$

式中, C为系数, 取1.84×10^{-21}, 其余同前.

式(6)中, 当浑水体含沙量、颗粒级配变化较小或近似不变时, 浑水特征厚度与河底比降呈反相关关系, 河床比降小, 特征厚度大; 河床比降大, 特征厚度小.

3 讨论

水库产生异重流并能达到坝前, 除需具备一定的洪水历时之外, 还需满足一定的流量及含沙量, 即形成异重流的水沙过程所提供给异重流的能量, 足以克服异重流的能量损失. 例如, 小浪底水库在一场洪水过程中, 产生的异重流往往能量不足而不能顺利到达坝前, 发生中途停止而形成浑水水库; 异重流排沙过程中, 由于入库洪水过程结束而无足够的后续能量时滞留库区. 这两种情况下均会在库区坝前段产生沿垂向"浓缩"的浑水层, 本文中称之为"浮泥"层, 浑水层与"浮泥"层均为浑水水库发生沉降后的产物, "浮泥"层为浑水层浓缩后的产物. "浮泥"层不仅涉及本次洪水泥沙输移, 而且对接踵而来的后续洪水泥沙输移产生影响. 目前, 人们对这种由异重流形成的"浮泥"层的归宿问题从未开展过研究, 既无统一的认识, 又无实测资料的证明. 一般地, 黄河中出现的高含沙水流常属粒径细、级配均匀、黏度高的浆体, 通常将这种高含沙水流归为宾汉体. 现场及试验室资料表明: 含沙水流, 在浓度不高时, 属牛顿流体; 当含沙浓度高达一个阈值时, 并含有絮凝细颗粒泥沙时, 呈现黏弹性体的特性; 当含沙量进一步提高时, 呈现黏弹性体和宾汉体的混合特性. 而"浮泥"层属于这种分类.

显而易见, 适时开启排沙洞或借助于后续洪水泥沙输移, 使"浮泥"启动并排出库外, 达到水库的高效输沙的目的. "浮泥"层中具有黏着力的细颗粒泥沙的群体沉降机理及过程、后续异重流发生时机与"浮泥"层重新启动的可能性、后续异重流与"浮泥"层的相互影响等是实现水库高效输沙的基础与关键技术.

利用测验资料, 综合考虑相关因素, 采用式(2)计算了宾汉极限剪切力, 采用公式(1)计算了有效切应力, 计算结果见表5. 从计算结果看, 由于异重流淤积分选作用, 不同级配泥沙形成表层具有不同的流变特性, 宾汉切应力有所变化. 而有效切应力主要与来水来沙水沙条件相关.

表6为流动特性分析表. 从浮泥层流动判数I与头部运动现象对比中可以看出, 同一场次洪水过程中, 上、中、下游I值可能不同, 其头部运动情况也不同: 当$I>1$, 有效切应力大于宾汉切应力时, "浮泥"层可发生流动. 当$I<1$, 有效切应力小于宾汉切应力时, 一定程度上将"挤压"前期"浮泥"层, 使前期"浮泥"层具有流动趋势, 但"浮泥"层不能流动. 当$I\approx1$异重流与前期"浮泥"层掺混, 将"推动"前期"浮泥"层, 当来流能量大于促使前期"浮泥"层运动的动量时, 前期"浮泥"层可流动.

4 结论

本项目在分析小浪底水库运用情况和异重流排沙特性基础上, 利用水槽试验研究了叠加洪水塑造异重流形成"浮泥"层, 及其相互影响; 通过水槽试验, 提出了"浮泥"层流动判数, 推导出特征厚度. 当"浮泥"层流动判数大于1时, 前期"浮泥"层发生流动, 后期洪水形成异重流以侵入型在前期"浮泥"层中运动; 当"浮泥"层流动判数小于1时, 前期"浮泥"层不流动, 后续洪水形成异重流在前期"浮泥"层表面以界面型运动; 当"浮泥"层流动判数等于1时, 后续洪水异重流与前期"浮泥"层发生掺混, 后续洪水异重流无典型头部型式.

目前, 小浪底水库已转入拦沙后期, 利用水库蓄

表 5 流变特性计算成果表

Table 5 Computation results of rheological property

试验组次	有效切应力(kg/m^2)				宾汉切应力(kg/m^2)			
	上游段	中游段	下游段	平均值	上游段	中游段	下游段	平均值
1-1	–	–	–	–	–	–	–	–
1-2	0.0048	0.0032	0.0011	0.0020	0.1310	0.0030	0.0071	0.0224
1-3	0.0326	0.0084	0.0231	0.0073	0.0561	0.0057	0.0028	0.0105
1-4	0.0481	0.0066	0.0033	0.0088	0.0520	0.0388	0.0047	0.0355
1-5	0.2493	0.1030	0.0709	0.0675	0.0067	0.0017	0.0007	0.0021
2-1	–	–	–	–	–	–	–	–
2-2	0.0073	0.0044	0.0269	0.0030	0.0008	0.0006	0.0007	0.0007
2-3	0.0448	0.0217	0.0000	0.0147	0.0010	0.0012	0.0010	0.0011
3-1	–	–	–	–	–	–	–	–
3-2	0.0087	0.0008	0.0005	0.0014	0.0043	0.0026	0.0022	0.0029
3-3	0.0206	0.0094	0.0266	0.0064	0.0090	0.0017	0.0008	0.0024
4-1	–	–	–	–	–	–	–	–
4-2	0.0123	0.0110	0.0031	0.0081	0.0078	0.0212	0.0036	0.0090
4-3	1.2016	0.6524	0.5191	0.3477	0.0040	0.0137	0.0152	0.0084
5-1	–	–	–	–	–	–	–	–
5-2	0.4361	0.5331	0.9182	0.3948	0.0094	0.0061	0.0064	0.0069
6-1	–	–	–	–	–	–	–	–
6-2	0.0180	0.0010	0.0024	0.0023	0.0183	0.0107	0.0025	0.0080
6-3	0.0588	0.0073	0.0171	0.0100	0.0948	0.0073	0.1497	0.0266
6-4	0.0231	0.0137	0.0164	0.0106	0.4124	0.1401	0.8228	0.1951

表 6 流动特性分析表

Table 6 Analysis of rheological property

试验组次	I				头部运动物理现象
	上游段	中游段	下游段	平均值	
1-1	–	–	–	–	界面型
1-2	0.04	1.07	0.16	0.09	界面型转为侵入型
1-3	0.58	1.47	8.36	0.69	界面型转为侵入型
1-4	0.93	0.17	0.69	0.25	界面型
1-5	37.12	62.23	95.28	32.11	侵入型
2-1	–	–	–	–	界面型
2-2	9.10	6.84	37.19	4.12	侵入型, 头部前段出现波动
2-3	42.68	18.73	–	13.67	侵入型
3-1	–	–	–	–	界面型
3-2	2.05	0.31	0.23	0.50	界面型
3-3	2.30	5.62	33.86	2.72	界面型
4-1	–	–	–	–	界面型
4-2	1.57	0.52	0.87	0.90	侵入型转为界面型
4-3	304.06	47.73	34.22	41.59	上段侵入型下段从前期“浮泥”层表层浮出以界面型运动
5-1	–	–	–	–	界面型
5-2	46.63	87.92	142.78	57.13	侵入型
6-1	–	–	–	–	界面型
6-2	0.98	0.09	0.97	0.29	界面型
6-3	0.62	1.01	0.11	0.38	界面型
6-4	0.06	0.10	0.02	0.05	界面型

水期高效输沙技术，提高水库排沙比，减少细颗粒泥沙淤积，增加粗颗粒泥沙淤积至库区合理部位，保证水库防洪库容，是十分重要的.

建议进一步加强基础试验研究，开展细颗粒泥沙沉降密实规律研究，深化水库深水坝区“浮泥”演变科学考察，为水库淤积形态与调控方式研究提供技术支撑，提高科研成果推广到生产实践的深度，为延长水库使用寿命服务.

参考文献

1 Inglis C C, Allen F H. The regimen of the Thames Estuary as affected by currents, salinity and river flow. Ice Proc, 1957, 8: 437–439

2 Migniot C. Etude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et leur comportement sous des actions hydrodynamiques. La Houille Blanche La Houille Blanche, 1968, 7: 591–620

3 NEDECO. Surinam transportation study. Report of the Hydraulic Investigation. NEDECO, Den Haag, 1968. 293

4 Kirby R, Parker W R. Distribution and behavior of fine sediment in the Severn estuary and inner Bristol Channel. Can J Fish Aqua Sci, 1983, 40: 83–95

5 Parker W R, Hooper P M. Criteria and methods to determine navigable depth in hyper-concentrated sediment layers. In: Proceedings of Hydro-Port’94, International Conference on Hydro-Technical Engineering for Port and Harbor Construction. Yokosuka, 1994. 1211–1224

6 Cao Z D. Research of wave action down mud movement characteristics (in Chinese). J Wat Harb, 1987, 2: 10–16 [曹祖德. 波浪作用下浮泥运动特性的研究. 水道港口, 1987, 2: 10–16]

7 Hong R J, Ying Y L. Test research of under the action of fluid mud are starting velocity (in Chinese). Chin J Hydraul Eng, 1988, 8: 51–57 [洪柔嘉, 应永良. 水流作用下的浮泥起动流速试验研究. 水利学报, 1988, 8: 51–57]

8 Qian N, Wang Z H. The preliminary discussion about near the bottom high sediment concentration flow layer for the impact of water flow and sediment movement (in Chinese). Chin J Hydraul Eng, 1965, 4: 3–22 [钱宁, 万兆惠. 近底高含沙量流层对水流及泥沙运动影响的初步探讨. 水利学报, 1965, 4: 3–22]

9 Xu J Y, Yuan J H. Study on the fluid mud in the Yangtze estuary (in Chinese). J Sedim Res, 2001, 3: 74–80 [徐建益, 袁建忠. 长江口深水航道建设中的浮泥研究及述评. 泥沙研究, 2001, 3: 74–80]

10 Jia F, Wu N H, Zhang B Y. A laboratory study on intrusive gravity currents in rotating fluids (in Chinese). Acta Mech Sin, 1988, 20: 34–38, 99 [贾复, 吴乃华, 张伯寅. 旋转流体侵入型异重流实验研究. 力学学报, 1988, 20: 34–38, 99]

11 Fernandez R L, Imberger J, Asce M. Time-varying underflow into a continuous stratification with bottom slope. J Hydraul Eng, 2008, 134: 1191–1198

12 Han Q W. Reservoir Sedimentation (in Chinese). Beijing: Science Press, 2003 [韩其为. 水库淤积. 北京: 科学出版社, 2003]

Summary for “高含沙‘浮泥’运动判别水槽试验”

Experiments on critical judgment parameter of heavily silt-laden fluid mud

Tao Li[1,2*], Junhua Zhang[1], Junqiang Xia[2], Guoming Gao[1], Zhihui Ren[1] & Zhenfeng Yan[1]

[1] *Research Center of Xiaolangdi Reservoir, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China;*
[2] *School of Water resources and Hydropower Engineering, State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China*
* Corresponding author, E-mail: litao@hky.yrcc.gov.cn

In the heavily silt-laden river, density current belongs to an excellent method for flushing the input sediment without water level drawn down. Heavily silt-laden fluid mud in reservoir comes from heavily silt-laden density current. Density current comes into being in the reservoir and may reach the front of the dam with certain flood duration in addition. And the flood also needs to meet a certain sediment concentration and discharge. That makes water and sediment input need to provide density current with energy to overcome the energy loss during the forming process. For example, in a density current creeping process, the current energy shortage often can unsuccessfully reach the front of the Xiaolangdi dam, the stop makes a muddy pond before the dam. Another situation occurs during the density current flushing process. When the input flood ends without subsequent enough energy retention, the foremost density current creeps slowly and suspends before the dam. In these two cases, the muddy layer along the vertical section in front of the reservoir dam will be called fluid mud in this paper. On the basis of understanding the mixing characteristics of hyper-concentrated flow settlement characteristics, viscoelastic and Bingham fluid in the Yellow River, under the flume experiments combined with theoretical analysis method, the formula which concludes high sediment rheological properties of mud and sediment particle size, the volume ratio of sediment concentration, is established and fluid mud layer theoretical analysis had been carried out and flume experiments had been combined to carry out about the effect between density currents and fluid mud. It is found that the difference between the fluid mud with the Bingham shear stress and the flow shear stress due to different sediment concentration, which can divide the movement regime into 2 types, named invasive and interface. The heterogeneous density flow of different sediment does not only affect the muddy water thickness and blending extent, but also determine the movement regime of the head. The flow discharge mainly affects the muddy water thickness and the velocity of the density current. The density of fluid mud increased from fast to slow with the time lasting, which is formed due to settlement. Through the theoretical deduction, the critical judgment parameter of the fluid mud layer incipient motion is obtained. The calculation formula which concluded volumetric sediment concentration, slope and density current thickness is proposed based on the experiments. Obviously, timely opening the desilting tunnel or with the help of the subsequent flood, this will enable the fluid mud incipient motion and flushing out of the reservoir to achieve the purpose of efficient sediment transport. With the adhesion of the fine sediment mud layer in group settlement mechanism and process, conditions on follow-up density current occurrence, and fluid mud layer motion possibility, and its interaction are the basis and key technology of efficient way flushing sediment out of the reservoir in the heavily silt-laden river. The research results can enrich the contents of river sediment dynamics and provide technical reference for the operation and planning of sediment-laden river reservoir.

reservoir fluid mud, Bingham shear stress, flow shear stress, flume experiments, critical judgment parameter

doi: 10.1360/N972017-00910