

细颗粒泥沙动水絮凝沉降的基本特性*

周 海^{1,2} 阮文杰³ 蒋国俊³ 姚胜初³ 张志忠³

(1. 河海大学交通学院 南京 210098; 2. 上海航道勘察设计院 上海 200120;

3. 浙江大学港口海岸与近海工程研究所 杭州 310028)

提要 以流速为主要参变量,在长度为 339.3 m 的往复式直水槽中进行细颗粒泥沙絮凝沉降试验,试验得到了垂线平均含沙量、絮凝现象、垂线含沙量梯度、泥沙粒度四方面的沿程变化规律。通过对以上四方面变化分析,细颗粒泥沙动水絮凝沉降的基本特性是:动水絮凝沉降速率和沉降量受碰撞絮凝概率与剪切破碎概率、絮凝体所受外力与本身抗力两大关系的制约,而流速又通过制约以上两大因素的变化,成为制约絮凝沉降速率和沉降量的主要因素。

关键词 细颗粒泥沙,絮凝,动水沉降,流速
中图分类号 P731

在细颗粒泥沙动水絮凝沉降过程中,颗粒碰撞絮凝和絮凝体剪切破碎两种作用同时存在,且都对沉降起至关重要的作用。不同学者从不同角度对水流切应力与絮凝体剪切破碎的关系,以及颗粒碰撞对絮凝作用的影响分别作了论述(马青山, 1988; Mehta, 1986; 张志忠等, 1995; Owen, 1972),但两者有机结合相互影响的研究有待进一步深入。由于细颗粒泥沙在水流中下沉十分缓慢,完成沉降过程需经历相当长的时间,故以往的室内研究除个别学者采用长水槽外(黄建维, 1983),大部分都在环型水槽中进行(Partheniades, 1986; 金鹰等, 1997; 赵龙保, 1995),而环型水槽的水流结构不甚理想,研究成果难以得到普遍认同。

细颗粒泥沙动水絮凝沉降对河口最大混浊带和拦门沙的形成起至关重要的作用(沈焕庭等, 2001),随着长江口深水航道治理工程的实施,结合工程需要,作者开展了水温对悬沙絮凝沉降的影响和悬沙动水絮凝沉速两方面的研究。为克服以往研究之不足,专门设计了长度为 339.3m 的往复式定底坡直水槽,并先后进行了 14 组次试验。其中第一方面的成果已另文发表(蒋国俊等, 2002),本文中仅是悬沙动水絮凝沉速研究的部分内容。

1 实验过程

试验在长 339.3m 的往复式定底坡直水槽中进行,该水槽由供水系统、进水段、试验段、出水段和加盐加沙装置 6 部分组成,其中试验段由七道长 46.2m、宽 0.2m、高 0.76m 的直道段和六个半圆型弯道组成(姚胜初等, 2004),为改善弯道水流结构,加装了半圆型的不锈钢导流板,水槽设计底坡为 0.0004,经调试测定,当流速为 30cm/s 时,水流满足稳定均匀流条件,当试验流量大于或小于设计流量时,如 h_0 维持不变,则底坡就要作相应的调整,水槽内的水流才能形成均匀流。本试验在低流速时采用构筑潜坝措施,水流条件基本符合试验要求,但流速较高时(40cm/s),会出现沿程流速增加的趋势,这是定底坡水槽所决定的。为满足试验对含沙量和盐度的要求,专门研制了自动加盐、加沙装置,并用光电测沙仪直接监测进口段含沙量。

试验泥样取自长江口横沙浅滩,经分散处理后,用蒸馏水反复清洗、分离,以去除盐分、粗颗粒和杂质。由于进行一组试验所需的泥浆达数百公斤之多,全部试验用的泥浆需分批制备,故各组试验的粒度级配会有所差异,但其中值粒径在 10—22 μm 之间(表 1)。试验用未加碘的天然

*国家自然科学基金资助项目,49976023 号。周 海,博士研究生, E-mail: zhouhai@shiw.com.cn

收稿日期: 2005-09-16, 收修改稿日期: 2006-12-04

表 1 试验泥样颗粒粒级
Tab.1 Particle sizes of sediments tested

分离 批次	各粒径重量百分比(%)					中值粒径 $d_{50}(\text{mm})$
	>0.03	0.03—0.01	0.01—0.005	0.005—0.002	<0.002	
1	17.0	43.0	22.0	16.0	2.0	0.013
2	17.0	55.0	16.0	12.0	0	0.016
3	14.9	35.0	23.7	10.9	15.5	0.010
4	22.1	57.8	9.5	5.4	5.2	0.022
5	18.5	57.5	9.9	7.2	6.9	0.018
6	21.7	49.2	6.5	7.1	15.5	0.019
7	22.0	52.5	9.5	6.3	9.7	0.019

食盐配制盐水。

试验观察内容和方法: 在水槽直段内沿纵向布置 6 个观察断面, 七道直道共 42 条垂线, 每条垂线分 6 层(0.0H、0.2H、0.4H、0.6H、0.8H、1.0H) 进行同步观察, 用光电测沙仪进行含沙量测量, 取代表性样品进行粒度分析, 并同时在显微镜下进行絮凝体观测。

本文中作者采用的试验资料为: 起始含沙量 $5\text{kg}/\text{m}^3$ 、水温 26°C 、试验水深 25cm , 流速分别是 6、16、30、40cm/s。试验以流速为主要参变量, 通过相同条件下泥沙在盐、淡水中沉降对比和絮凝规律的差异, 来分析细颗粒泥沙动水沉降的基本规律。

2 动水絮凝沉降过程

2.1 垂线平均含沙量沿程变化

图 1 为本次试验所得到的不同流速条件下含沙量的沿程变化曲线。从图中可知, 动水絮凝沉降的总趋势是: 在流速恒定的条件下, 试验的初始阶段含沙量下降很快, 随着运距的增长, 含沙量则逐渐减少; 进入试验的最后阶段, 含沙量沿程变化很小, 几乎保持稳定状态, 沉降过程的垂线平均含沙量变化规律基本符合指数曲线:

$$\frac{C_t}{C_0} = a + (1-a)\exp(-kt) \quad (1)$$

式中, C_t 为任意时刻的含沙量; C_0 为起始含沙量; a 、 k 在同一组试验中为常数, 其值见表 2; t 为沉降时间。从图 1 和表 2 可知, 随着流速的提高, a 、 k 值逐渐增大, 沉降曲线逐条变缓, 达到含沙量稳定所用的时间不断减少, 稳定含沙量值亦不断提高。把相同流速和起始含沙量的盐水组和淡水组沉降过程曲线进行比较(图 2)可知, 虽然淡水中的沉降过程曲线也符合指数关系, 但明显缓于盐水中的情况, 稳定含沙量也明显高于盐水中的。以上两组资料表明, 动水中絮凝泥沙沉降与

单颗粒泥沙沉降存在着明显的差别, 而不同流速条件下的絮凝沉降, 同样也存在着一定的差异。

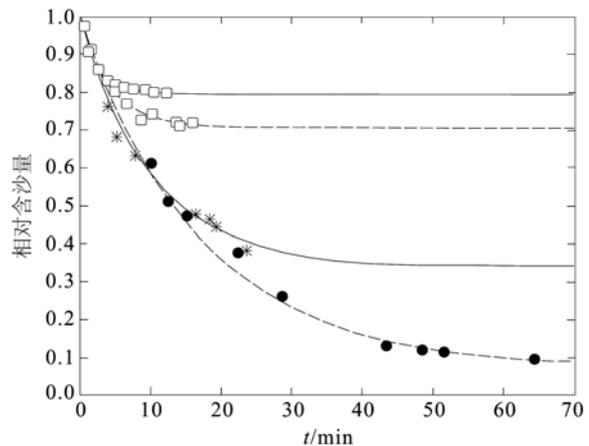


图 1 不同流速条件下的含沙量过程线

试验条件: $S = 10$; $C = 5\text{g}/\text{L}$; $t = 26$

Fig.1 The sediment concentration curves at different flow speeds

Test conditions: $S = 10$; $C = 5\text{g}/\text{L}$; $t = 26$

— — 40cm/s; -- --30cm/s; —*— 16cm/s; --●--6cm/s

表 2 动水絮凝沉降曲线 a 、 K 值

Tab.2 a , K value of particle settling of hydrodynamic flocculation

流速(cm/s)	a	K
6	0.074	0.058
16	0.335	0.098
30	0.709	0.235
40	0.832	1.290

2.2 絮凝现象沿程变化

为研究泥沙下沉过程中絮凝现象的变化, 笔者用偏光显微镜对水流中泥沙的絮凝现象逐时、逐点地进行观察。从拍摄的絮凝照片(图 3a—3e)可知, 在流速为 16cm/s、盐度为 10 条件下, 起始断面至 46m 段, 床面附近存在着密集的网状结构絮凝体和较粗的单颗粒泥沙; 在 114—160m 床面附近出现细小絮粒和较细单颗粒并存的格局; 而至 206m 后, 较细的单颗粒泥沙已占绝对优势。

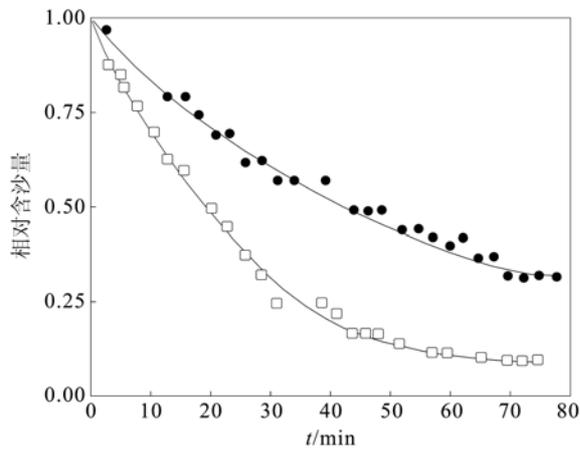


图2 不同盐度条件下泥沙沉降过程曲线

试验条件: $V = 6\text{cm/s}$; $C = 5\text{g/L}$; $t = 26$

Fig.2 The curves of sediments settling in different salinities

Test conditions: $V = 6\text{cm/s}$; $C = 5\text{g/L}$; $t = 26$

—●— 0 盐度; —□— 10 盐度

水槽不同位置絮凝体尺寸和参与絮凝泥沙数量的不同,反映泥沙沿程絮凝程度的不同。综上所述,细颗粒泥沙在起始断面至 114m 附近絮凝作用最强,然后沿程逐渐递减,最后絮凝作用已极其微弱。从镜下观测可知,随着流速的提高,絮凝体形成趋势逐渐减弱。当流速达到 40 cm/s 时,无论距起始断面 46m 或 99m,均未见到絮凝体存在(图 3f—3h)。当流速提高至一定值后,亦即大于动水絮凝临界流速值时(阮文杰,1991)基本不发生絮凝,这说明流速对絮凝有明显的制约作用。

2.3 垂线含沙量沿程变化

试验表明,单颗粒泥沙下沉过程,垂线含沙量的分布基本上是上小下大,略为弯曲的斜直线(图 4)。而絮凝泥沙垂线含沙量分布,在絮凝作用较强的初始阶段,床面以上 0.8—1.0H 处含沙量明显增大,并在 0.8H 处呈现突变趋势,以后随着运移距离的增加,又逐渐过渡为斜直线分布,底部附近含沙量的增大,说明紊动扩散作用的减弱。由于该处的絮凝体大而多,产生一定的制紊作用亦是符合规律的,可见垂线含沙量的分布,亦明显反映出絮凝作用的强弱。

2.4 泥沙粒度沿程变化

本次试验所用的泥样属细颗粒非均匀沙,其中 10—30 μm 颗粒占总重的 50%左右。絮凝作用可使该部分泥沙以絮凝体的形式大量下沉,其结果使水流中该部分含量明显减少,如流速 16cm 的条件下,10 盐度组次至沉降稳定时,该部

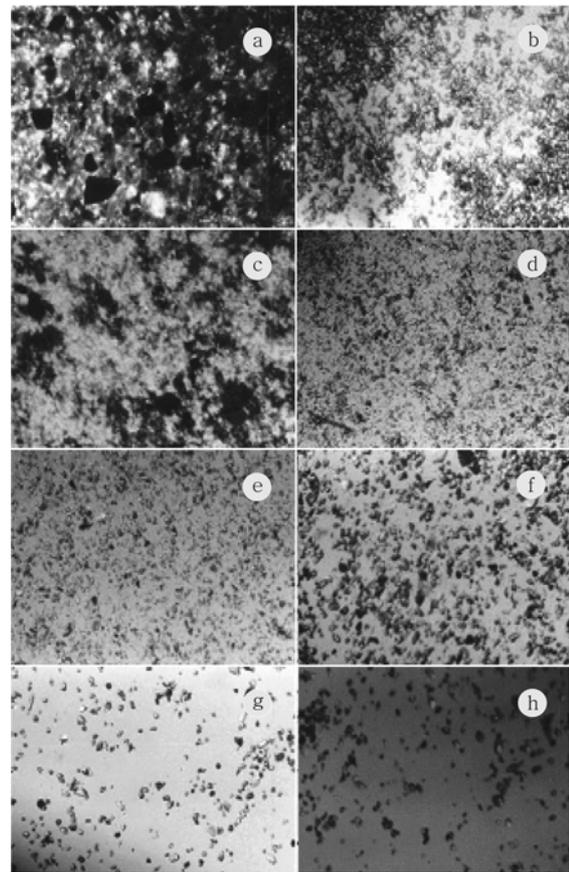


图3 试验现场絮凝照片

a.起始断面床面附近的泥沙颗粒(网状结构絮凝体上嵌有较粗的单颗粒); b.距起始断面 46m 床面附近的泥沙颗粒(网状结构絮凝体); c. 距起始断面 114m 床面附近的泥沙颗粒(较大的絮凝团); d. 距起始断面 160m 床面附近的泥沙颗粒(细小絮粒和单颗粒); e.距起始断面 206m 床面附近的泥沙颗粒(以单颗粒为主); f.起始断面床面附近的泥沙颗粒(单颗粒); g.距起始断面 46m 床面附近的泥沙颗粒(单颗粒); h.距起始断面 97m 床面附近的泥沙颗粒(单颗粒)

试验条件: a—e. $v = 16\text{cm/s}$; f—h. $v = 40\text{cm/s}$; a—h.

$c = 5\text{g/L}$; $s = 10$; $t = 26$; $h = 25\text{cm}$

Fig.3 Photos of sediments flocculation

a. Sediment particles on the flume bed at the beginning (flocs in net structure with some single coarser particles attached); b. Sediment particles on the flume bed at 46m from the beginning (flocks in net structure); c. Sediment particles at 114m (larger floc lumps); d. Sediment particles on the flume bed at 160m (small flocs and individual sediment particles); e. Sediment particles on the flume bed at 206m (mainly individual sediment particles); f. Sediment particles on the flume bed at the beginning (individual particles); g. Sediment particles on the flume bed at 46m (individual sediment particles); h. Sediment particles on the flume bed at 97m (individual particles)

Test condition: a—e. $v = 16\text{cm/s}$; f—h. $v = 40\text{cm/s}$; a—h. $c = 5\text{g/L}$; $s = 10$; $t = 26$; $h = 25\text{cm}$

分含量减少 44%,而淡水中仅减少 19%(表 3)。但当流速大于 30cm/s 后,盐水和淡水试验组次的变

表 3 水流中泥沙粒径 10—30 μm 含量变化Tab.3 The change in content of sediments (10—30 μm) in water current

流速 (cm/s)	盐度 10			盐度 0		
	起始泥样(%)	沉降稳定后(%)	变化量(%)	起始泥样(%)	沉降稳定后(%)	变化量(%)
40	58.5	58.0	0.5	48.0	55.0	-7.0
30	54.5	51.5	3.0	62.0	57.0	5.0
16	64.0	20.0	44.0	55.0	36.0	19.0
6	52.0	15.5	36.5	51.0	28.0	23.0

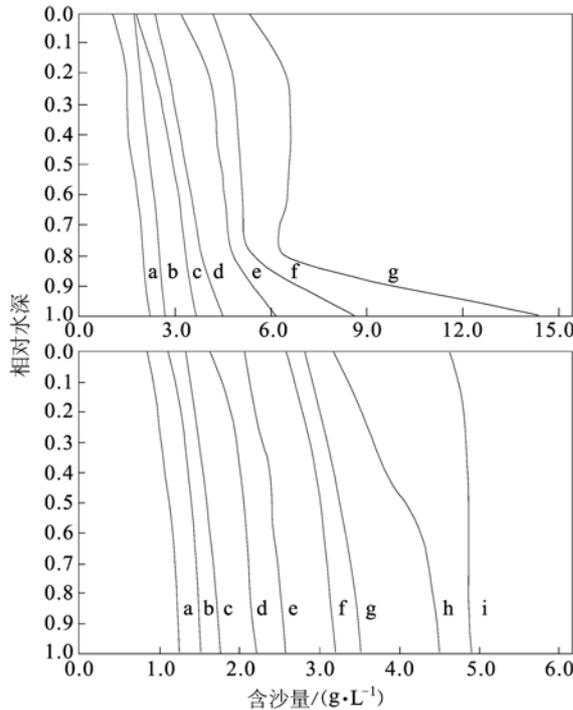


图 4 垂线含沙量分布沿程变化

距水槽起始端距离: 上图: a. 11m; b. 37.4m; c. 55.31m; d. 92.71m; e. 130.43m; f. 185.74m; g. 223.46m; 下图: a. 0m; b. 19.80m; c. 72.91; d. 112.83m; e. 165.94m; f. 205.86m; g. 258.97m; h. 298.88m; i. 325.28m。

试验条件: 上图 $v=15$ cm/s, $C=7$ g/L, $S=10$; 下图 $v=15$ cm/s, $C=5$ g/L, $S=0$

Fig.4 Change in sediment concentration along the flume in different vertical directions

Top panel: a. 11m; b. 37.4m; c. 55.31m; d. 92.71m; e. 130.43m; f. 185.74m; g. 223.46m

Bottom panel: a. 0m; b. 19.80m; c. 72.91; d. 112.83m; e. 165.94m; f. 205.86m; g. 258.97m; h. 298.88m; i. 325.28m.
Test conditions: Top panel $v=15$ cm/s, $C=7$ g/L, $S=10$; Bottom panel $v=15$ cm/s, $C=5$ g/L, $S=0$

化相差无几。

综上四方面的沿程变化, 可得到如下几点认识: (1)水流中絮凝体的尺寸和数量与泥沙的沉降速率和垂线含沙量分布有明显的对应关系; (2)流速变化影响水流中絮凝体尺寸和数量的变化, 进而成为制约动水絮凝沉降至关重要的因素; (3)在恒定流速作用下, 水流中絮凝体尺寸和数量沿程

递减, 造成沉降量和沉降速率的沿程递减。上述试验的分析表明, 细颗粒泥沙动水絮凝沉降与单颗粒泥沙沉降存在明显的差别。

3 动水絮凝沉降特性

细颗粒泥沙动水絮凝沉降规律之所以与单颗粒泥沙不同, 主要由以下原因造成:

(1) 絮凝作用使单颗粒泥沙聚集成团, 因而使沉速加快, 沉降时间缩短, 沉降速率增大, 最终沉降量明显增加。

(2) 絮凝的胶体电化学反应(絮凝作用)进行的程度, 直接影响絮凝体尺寸、密度以及生成速度等, 而影响胶体电化学反应的诸因数, 如颗粒表面电荷、电介质的化合价和浓度、水流温度等也间接地成为影响动水絮凝沉降的重要因素。

(3) 本文中所论述的絮凝作用以一价钠离子为絮凝剂, 这种絮凝作用在河口、海岸水域中广泛存在, 其絮凝的特点是钠离子压缩颗粒表面双电层的厚度, 并在第二最小吸引能的位置发生絮凝。由于第二最小吸引能的引力是很弱的, 因而当电解质浓度降低或受到其他机械力作用时, 已吸引的颗粒可再度分离, 使絮凝作用变得可逆(马青山, 1988)。有关资料表明, 这种絮凝体的强度仅为十几—几十 10^{-3} N/m(Mehta, 1986), 水流的作用力已具备使它产生剪切破碎的可能。此时水流的作用除使絮凝体受力产生运动外, 又增加了使絮凝体产生剪切破碎的功能, 后者对动水絮凝沉降有明显的制约作用, 成为与单颗粒泥沙沉降有别的又一重要特性。

(4) 细颗粒泥沙在流动盐水中运动时, 碰撞絮凝作用与剪切破碎作用同时存在, 且都带有一定的随机性。絮凝体在下沉过程中可多次经受剪切破碎和碰撞再絮凝的作用。当流速较小时碰撞絮凝作用占优势, 水流中絮凝体数量就会不断增加, 尺寸也会相应增大。反之则不断减小, 一定水流絮凝体的尺寸和数量是这两种随机事件相互作用的结果, 而这两种随机事件又可随影响动水

絮凝沉降的诸多物理、化学因素变化而变化,这是造成动水絮凝沉降较单颗粒泥沙沉降更为复杂的重要原因之一。

(5) 动水絮凝沉降达到稳定时的含沙量远小于同样条件下单颗粒泥沙的稳定含沙量。如流速在 6cm/s 的条件下, 10 盐度组次的稳定含沙量与起始含沙量之比为 0.1, 而淡水组次两者之比为 0.325(若扣除沉降规律相同的粗颗粒含量, 则比值差别将更大)。由于试验是一单向淤积过程, 单颗粒泥沙悬浮稳定时的含沙量即此时水流的挟沙率。絮凝体在水流中同样受到紊动扩散和重力的作用, 因此水流也具备挟带一定絮凝体的能力。镜下观察表明, 当含沙量达到稳定时水流中基本上无絮凝体存在。可见稳定含沙量的出现并非仅由挟沙率决定, 而是当含沙量很低后, 能形成絮凝体的碰撞几率已经很弱, 因而此时的稳定含沙量较同样条件下单颗粒泥沙的稳定含沙量低。

4 动水中颗粒碰撞与絮凝体生成速率

鉴于碰撞絮凝与剪切破碎作用对动水絮凝沉降影响之大, 有必要对该两方面作进一步分析。

颗粒间的相互碰撞是产生絮凝作用的必要条件之一, 单位时间内颗粒碰撞次数愈多, 絮凝体生成速率愈大。细颗粒泥沙在流动盐水中的碰撞可表示为(马青山, 1988):

$$N_s = \frac{4}{3} n^2 r^2 \frac{dv}{dx} \quad (2)$$

式中 N_s 为单位时间单位体积内颗粒相互碰撞次数; n 为单位体积内的颗粒数目, 即颗粒密度; r 为颗粒半径; dv/dx 为水流速度梯度。该式表明, 在同一组试验流速恒定的条件下, dv/dx 可视为常数, 初始时段水流中颗粒数 n 最大, 故碰撞次数和可能生成絮凝体的数量较后续时段有平方关系的增大。絮凝体可视为由若干单颗粒泥沙结合大量水体而形成的新颗粒, 其粒径较原单颗粒增大数十至数百倍之多。由于 N_s 与 r 的平方成正比, 由此而引起碰撞次数的增加对加大絮凝体生成速率的作用是相当可观的, 在后续的试验时段内, 随着絮凝体的下沉, 水流中颗粒数量不断减少和絮凝体数量的相应减少, 两者共同影响使碰撞次数的高次方的形成不断衰减, 碰撞作用而生成絮凝体的几率相应地也大大减小, 这是导致在恒定流速作用下, 水流中絮凝体数量和尺寸不断减小的主

要原因。

式(2)表明 N_s 与 dv/dx 的变化成正比, 一般当流速分布规律一定时, dv/dx 的变化也可用垂线平均流速变化或流速变化来表示, 故碰撞次数亦与流速变化成正比。流速对碰撞絮凝的影响, 在低流速时, 确是因增加碰撞次数而增加絮凝体的生成几率。但当流速提高后, 由于颗粒相对运动速度的提高, 碰撞剪切作用随之产生, 且随流速提高而不断增大, 其结果使能产生絮凝的有效碰撞大大降低, 因此当流速提高后, 碰撞反而起到阻碍絮凝的作用。

以上分析表明, 无论在恒定流速条件下, 或是在不同流速条件下, 颗粒碰撞对絮凝体生成几率起至关重要的作用, 而成为影响动水絮凝沉降的主要因素之一。

5 絮凝体在水流中受力与絮凝体尺寸的关系

以一价钠离子为絮凝剂所形成的絮凝体, 由于其颗粒间的连接力弱, 在水流中极易产生剪切破碎, 因此研究絮凝体在水流中受力、剪切破碎以及絮凝体尺寸之间的关系, 成为研究动水絮凝沉降的又一重要内容。

按固液两相流理论(倪晋仁, 1991), 作为固相颗粒的絮凝体, 在水流中必然要受到水流的作用力。这种力包括流体与颗粒之间的相互作用力和颗粒碰撞所产生的作用力, 为说明絮凝前后受力的变化, 可应用固液两相流中的修正的 Techen 方程进行分析。用该方程计算泥沙絮凝前后受力的变化可知, 颗粒尺寸 D 的变化可引起该方程右边各项力的变化。因为在未絮凝前, 单颗粒泥沙直径与最小漩涡尺度几乎处于同一数量级, 此时泥沙可随所有尺度的漩涡而运动, 受力是很小的, 絮凝后由于颗粒尺寸的增大, 在漩涡分解中逐渐从漩涡中脱离, 产生与水流的相对运动, 使受力大大增加; 颗粒增大后, 由于质量的集中, 重力作用变得更加显著, 惯性力亦随之增大等等。若絮凝后颗粒尺寸增大数倍或数百倍的话, 那么仅此而引起的受力的增大, 可达数百至上万倍之多。

另外, 影响絮凝体受力的是颗粒与水流的相对运动, 这也在 Techen 方程右边多项中得到体现。由于相对运动的存在, 絮凝体必然要受到水流的作用, 相对运动的大小, 直接影响到絮凝体

受力的大小。上述颗粒尺寸变化引起受力的变化,也是通过相对运动得以体现的。由于絮凝体运动直接从水流漩涡中获得动能,故水流的紊动特性所引起颗粒周围流体速度的变化,直接影响絮凝体运动。对于一定尺寸的絮凝体,其周围水流速度愈大,所产生的相对运动亦愈大,这已被实验所证实(倪晋仁,1991)。描述影响相对运动的水流紊动特性如脉动流速漩涡尺度等目前尚无法测定。

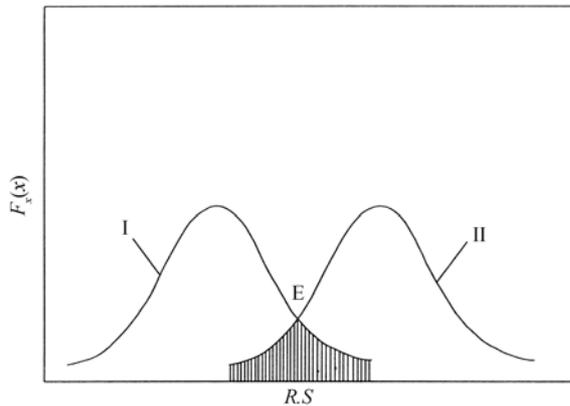


图 5 絮凝体剪切破碎概率示意图

曲线 I: 作用于絮凝体上的剪切力概率分布; 曲线 II: 絮凝体抗力概率分布

R.S: 絮凝体受力与抗力; $F_x(x)$: 随机变量分布函数

Fig. 5 Sketch map of the probability of shear/break-up of flocs

Curve I: Probability distribution of shear stress on the flocs; Curve II: Probability distribution of the anti-shear stress of flocs

R.S: The force on the flocs and the anti-shear stress of flocs; $F_x(x)$: distribution function of random variables

倪晋仁(1991)建议用时均流速及其分布或垂线平均流速来表示絮凝体受力大小,虽然这仅是从统计角度的一种相关表示法,但仍不失为一种行之有效的表示方法。本试验中作者采用流速变化来表示沉降过程中絮凝体尺寸和数量的变化,其结果表明也是切实可行的。

关于剪切破碎与絮凝尺寸之间的关系,可用絮凝体受力与强度关系进行分析。由于水流中有无数多的絮凝体,故单个絮凝体的受力和强度均为随机事件且都难以测定。从统计分析的角度看,若絮凝体的抗力和所受的外力均服从正态分布,则图 5 两概率曲线交点 E 以下的阴影部分的面积,即表示絮凝体破碎的概率(杨伟军等,1999)。若絮凝体的抗力不变,则尺寸增大引起受力的增大使曲线 II 右移,破碎概率就增大。若流速(或水流紊

动)增大引起絮凝体受力增大,曲线同样右移,破碎概率亦增大。而当絮凝体破碎后尺寸减小,由于受力的减小使曲线 II 左移,破碎概率就减小。故对某一特定的流速,总有一占主导地位的絮凝体尺寸与之对应,小于该尺寸的颗粒绝大部分不发生剪切破碎。按上述分析该主导地位的絮凝体尺寸又可随流速增大而减小。当流速增大至某一值后,即使很小尺寸的絮凝体,其形成概率也是很弱的,此时水流中单颗粒泥沙就占绝对优势,该流速即文献(阮文杰,1991)所定名的动水絮凝临界流速,在本次试验条件下约为 40cm/s。

6 结语

综上所述,细颗粒泥沙动水絮凝沉降过程存在着碰撞几率与剪切破碎几率之间,以及絮凝体抗力与所受外力之间两大关系。该两大关系制约沉降过程中絮凝体尺寸和数量的变化,导致动水絮凝沉降过程中沉降量和沉降速率与单颗粒泥沙有明显差别,因此该两关系的存在,构成了细颗粒泥沙动水絮凝沉降最基本的特性。

流速在动水絮凝沉降中的作用,除影响紊动扩散进而影响絮凝体的运动规律外,更主要的是影响上述两大关系的变化,从本文第 4、第 5 节分析可知,流速既影响碰撞絮凝又影响剪切破碎,但流速变化所引起絮凝体受力和剪切破碎作用的变化较碰撞絮凝几率变化大,这是构成不同流速条件下水流中絮凝体尺寸和数量,以及沉降速率和絮凝沉降量不同的主要原因。在恒定流速条件下,碰撞几率会随着絮凝泥沙不断下沉而减小,最终制约絮凝体生成使水流中含沙量达到稳定。

参 考 文 献

- 马青山,1988. 絮凝化学和絮凝剂. 北京: 中国环境科学出版社, 128—130
- 阮文杰,1991. 细颗粒泥沙动水絮凝的机理分析. 海洋科学, 5: 46—49
- 杨伟军, 赵传智, 1999. 土木工程结构可靠度理论与设计. 北京: 人民交通出版社, 33—40
- 沈焕庭, 潘定安, 2001. 长江口最大浑浊带. 北京: 海洋出版社, 62—89
- 张志忠, 阮文杰, 蒋国俊, 1995. 絮凝泥沙若干特性研究. 见: 曾庆华, 胡春宏, 侯力学等编. 第二届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集. 北京: 中国建材工业出版社, 172—183

- 金 鹰, 王 谅, 王义刚等, 1997. 细颗粒泥沙实验研究方法探讨. 见: 中国海洋工程学会编. 第八届全国海岸工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 403—409
- 姚胜初, 周 海, 赵龙保等, 2004. 细颗粒泥沙试验用折返式直水槽的研制. 浙江大学学报(工学版), 38(10): 1343—1349
- 赵龙保, 1995. 流动盐水中细颗粒粘性泥沙的沉降速度. 杭州大学学报(自然科学版), 22(3): 298—305
- 倪晋仁, 1991. 固液两相流基本理论及最新应用. 北京: 科学出版社, 170—183
- 黄建维, 1983. 粘性泥沙在流动盐水中沉降特性的试验研究. 第二次河流泥沙国际学术会议论文集. 北京: 水利电力出版社, 286—296
- 蒋国俊, 姚炎明, 唐子文, 2002. 长江口细颗粒泥沙絮凝沉降影响因素分析. 海洋学报, 24(4): 51—57
- Mehta Ashish J, 1986. Estuarine Cohesive Sediment Dynamics. Berlin:Springer Verlag, 66—83
- Owen M W, 1972. The effect of turbulence on the settling velocities of silt flocs. 14th Congress of the International Association for Hydraulic Research, 27—32
- Partheniades E, 1986. The present state of knowledge and needs for future research on cohesive sediment dynamics. Third International Symposium on River Sedimentation University of Mississippi, 3—25

A FLUME EXPERIMENT ON FLOCCULATION SETTLING OF FINE-GRAINED SEDIMENT IN MOVING WATER

ZHOU Hai^{1,2}, RUAN Wen-Jie³, JIANG Guo-Jun³, YAO Sheng-Chu³, ZHANG Zhi-Zhong³

(1. Transportation College of Hohai University, Nanjing, 210098; 2. Shanghai Institute of Waterways, Shanghai, 200120; 3. Institute of Harbor, Coastal and Offshore Engineering of Zhejiang University, Hangzhou, 310028)

Abstract Demanded by the waterway engineering in Changjiang (Yangtze) River estuary region, an experiment on the flocculation settling of fine-grained sediment in moving water was simulated in a flume system. The flume, 339.3m-long straight with a fixed slope was specially designed earlier. The experiment was conducted for comparison among cases of moving water in different sediment concentrations, flow speeds, and salinities for understanding the mechanisms of flocculation by grain collision and de-flocculation by shearing force of flowing water. Photoelectric observation was made at 6 horizontal positions and 6 vertical layers (at 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 1.0 of the water depth) in of the water in the flume. The test parameters were: 5kg/m³ in concentration, 26 , 25cm water depth, and the speed at 6, 16, 30 and 40cm/s. Salinity was set at 0 and 10. The sediments were collected in the estuary sized between 0—32μm, washed and cleaned.

Results show that (1) in case of identical current velocity, the average sediment concentration at vertical direction decreased exponentially along the distance of running, and the sediment settlement rate decreased with slowdown flowing. (2) the size and amount of flocs decreased with the distance at the same flow speed, whereas flocculation reduced when water running faster. At 40cm/s, no flocculation could be observed. (3) the sediment concentration boosted at 0.8—1.0 of the water depth in strong flocculation condition.

Flocculation and de-flocculation were alternated depending on the balance in possibility between grain collision/fluid shearing forces, and the floc-joining/floc-break-up forces. In the process, flow speed was proved to be a major factor.

Key words Fine-grained sediment, Flocculation, Settling in moving water, Current velocity