

长江口天然水流中细颗粒泥沙的絮凝作用*

阮文杰

(杭州大学河口港湾研究室, 杭州 310028)

收稿日期 1990年4月20日

关键词 长江口, 细颗粒泥沙, 絮凝作用

提要 本文根据1978年水文测验资料, 分析了长江口水流对细颗粒泥沙絮凝的影响。从中得出: (1) 絮凝使长江口泥沙的竖向运动规律发生改变, 出现竖向分层流。(2) 存在一絮凝临界流速, 只有当流速小于该值时, 絮凝泥沙的竖向运动规律才得以体现。(3) 在小于絮凝临界流速的水流中, 垂线不同高程处的絮凝条件受水流切应力制约。

细颗粒泥沙絮凝落淤是造成长江口拦门沙堆积和航道淤浅的主要原因之一。

本文以长江口中等潮差、往复流、咸淡水缓混合、含沙量小于10g/L为分析前提, 探索絮凝的规律。

I. 泥沙竖向运动的两种模式

通过泥沙竖向运动规律的分析来推断絮凝作用, 是研究天然水流中泥沙絮凝的有效途径。图1是长江口不同河段中泥沙竖向运动过程中垂线含沙量的变化情况, 其中模式I为盐水入侵以上河段, 模式II为盐水入侵河段。从图中可知: (1) 模式I在悬浮和淤积过程中垂线含沙量分布始终是上小下大的连续曲线。而模式II有相当一部分时刻垂线含沙量分布不连续, 表现为上部含沙量小而均匀, 下部含沙量较大且随流速同步变化, 其间有明显的转折, 出现竖向“分层流”现象, 分层的高度大多在0.6H'附近。(2) 模式I悬浮和淤积过程含沙量垂线分布为凹面向上的曲线, 而模式II在0.6H'以上接近垂直, 0.6H'以下多呈凹面向下的曲线。上述两方面差别说明两模式

表 水流、泥沙参数

Tab. Parameter of sediment and water flow

模式	站号	粒径 (mm)		垂线平均			涨潮/落潮	
		悬沙 d_{50}	床沙 d_{50}	\bar{v}	\bar{c}	\bar{s}	V_{max}	T
I	北港纵1	0.019	0.035	1.38	0.69	0.05	0.54	0.51
II	南槽纵25	0.023	0.047	1.16	0.71	14.6	1.28	1.37

注: 上述数据均为接近悬浮平衡时刻的实测值

\bar{v} ——流速 (m/s) \bar{c} ——含沙量 (g/L); \bar{s} ——盐度 T ——时间

* 国家自然科学基金资助项目。文中所用水文资料为上海航道局测。张志忠副教授对本文提出宝贵意见, 特致谢意。

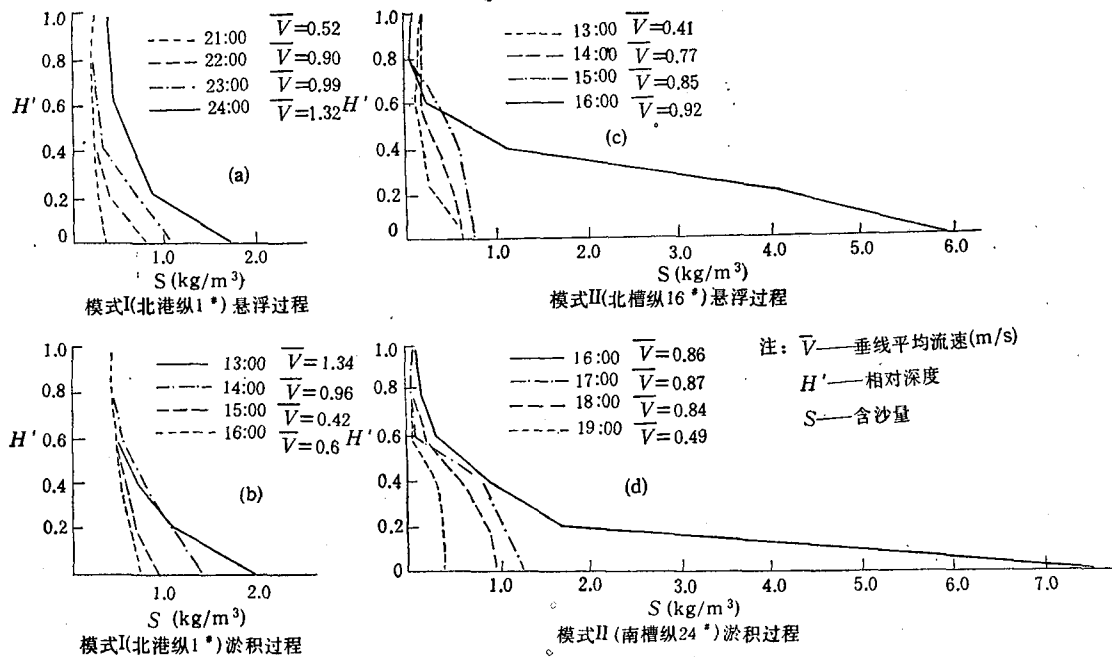


图1 模式 I, II 悬浮与淤积过程垂线含沙量的变化

Fig. 1 Vertical concentrated distribution in process of silting and suspending for model I, II.

泥沙竖向运动规律是不一致的。分析影响泥沙运动诸因素(表1),虽然两模式在悬沙、底沙粒径级配、流速及其分布上存有一定差别,但仅是同一量级范围内数量上的差异,不足以引起泥沙竖向运动规律改变。而两模式盐度的差别,却是产生不同运动规律的主要原因。因为模式 I 水流中几乎不含盐,因此垂线含沙量变化符合单颗粒泥沙运动规律。而模式 II 水流中的盐度已足以使泥沙絮凝,絮凝的结果改变了泥沙原有性质,因此才有可能出现不同的运动规律。

II. 絮凝对泥沙竖向运动的影响

II. 1. 絮凝使泥沙悬浮高度减小。泥沙絮凝后首先使颗粒尺寸增大,因而重力影响亦相应增大,悬浮能力就减小。其次,由于絮凝过程结合了大量水分,使絮团的体积浓度大大增加。这样,紊动从床面向上猝发过程中,由于阻力增加而引起卡门常数、扩散系数、漩涡尺度等紊动指标的减小,而絮凝体尺寸的增大又需更大的漩涡才能支持运动。以上两因素是造成泥沙絮凝后悬浮能力降低以致影响悬浮高度的根本原因。而絮凝泥沙在运动过程中因悬浮能力降低而出现的分层流现象,已被室内试验证实^[1]。对于长江口天然水流中泥沙絮凝前后悬浮高度的变化,本文借助于以往室内试验所得的指标,用恒定流扩散方程对模式 I 的情况作一分析(模式 I 的潮流速和垂线含沙量在涨急附近与扩散方程的假设基本相符)。计算表明,未絮凝时悬浮指标 $Z = 0.262$ ($Z = \frac{W}{ku_*}$),絮凝后 $Z = 1.15 \sim 2.30$ 。按照悬浮指标与垂线含沙量相对分布关系,当 $Z > 1$ 后悬浮高度即开始降低^[2]。因此,对于长江口这样的泥沙和动力条件,絮凝后悬浮高度的减小是符合泥沙运动规律的。

II. 2. 絮凝落淤后使悬沙粒度级配改变。模式 I 和模式 II 均为细颗粒含量较高的非均匀沙,由于模式 I 以单颗粒的形式下沉,流速减小首先下沉的是粗颗粒,因而随着流速减小垂线上粒度逐渐变细。例如兆港 21# 测站,至淤积终止时大于 0.01mm 百分含量下降 14.5%。模式 II 由于

絮凝作用,细颗粒集聚成絮团下沉,而絮团沉速远大于单颗粒,于是垂线上细颗粒含量明显减少,例如南槽纵 24# 测站,至淤积终止时小于 0.01mm 百分含量下降 20%。

II.3 絮凝使垂线浓度梯度发生变化。泥沙悬浮能力的强弱直接影响垂线浓度分布。模式 I 垂线含沙浓度分布成凹面向上的曲线是可用扩散理论解释的。对于模式 II,垂线浓度梯度则受絮凝和扩散两因素所制约。众所周知,落淤至床面的絮凝泥沙,由于粒间连结力的作用使其再悬浮能力远较散粒泥沙差。当这种连结力被克服时,水流的悬浮能力已足以使被分散的泥沙大量悬浮,此时床面附近含沙浓度分布是比较均匀的。若悬物至一定高度后具备了絮凝条件,则由于颗粒尺寸的增大而引起悬浮能力的减弱,于是含沙浓度分布就发生改变。絮凝体在向上运动过程中因继续发生碰撞絮凝而使体积不断增大,其结果迫使悬浮能力进一步减弱,含沙浓度就沿高程急剧减小,于是就出现凹面向下的分布曲线。淤积过程的絮凝情况与悬浮过程类同,同时也出现凹面向下的分布曲线。

III. 絮凝临界流速

对图 1 作进一步分析可知,在长江口盐水入侵河段的一个潮周期中,并不是任何时刻都存在分层流现象。当流速增大至图 1 c, d 实线所对应的值时,含沙量曲线不但沿深度连续,而且也是凹面向上、表现出与模式 I 相同的分布规律。

若将长江口一个潮周期中流速、含沙量关系点绘成图 2 所示的曲线,即可发现模式 II 底层和 0.2H' 层的流速、含沙量曲线构成陡而直的回环。回环中悬浮分支陡直是由于当床面切应力大于颗粒粘结力后,细颗粒泥沙迅速悬扬所致。淤积分支陡直说明一旦流速小于某值后细颗粒泥沙便迅速下沉。室内试验的结果表明,迅速下沉的原因是细颗粒泥沙在该流速条件下产生絮凝所致。

以上两现象表明,在长江口天然水流中细颗粒泥沙絮凝受水流条件所制约,这与室内试验的结论是一致的。室内试验所得到的动力絮凝临界流速在长江口具体应用时尚须作如下说明:(1)按上两现象所揭示的流速对絮凝的影响,絮凝临界流速应该是泥沙在垂线上从具单颗粒运动特性变为具絮凝运动特性时的水流速度。(2)上两现象表明,即使垂线上个别点未出现絮凝也不影响泥沙竖向运动规律,只有当垂线上绝大部分位置都未出现絮凝时,泥沙的竖向运动规律才得以改变。因此,絮凝临界流速应该是垂线上泥沙受力最小位置也达到受力平衡时的垂线平均流速。在出现分层流的情况下,应该是分层流以下的垂线平均流速,因为在分流层以上无絮凝现象。(3)用

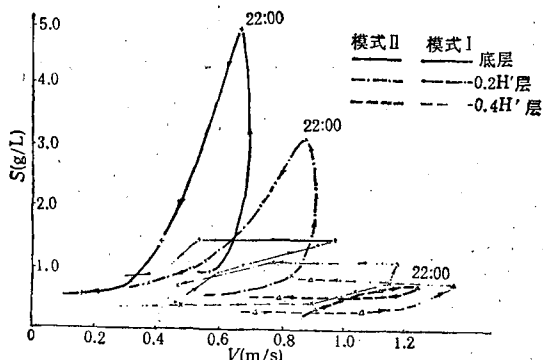


图 2 实测分层流速与含沙量的关系

Fig. 2 Relationship between current velocity and concentrations for every stratum measured

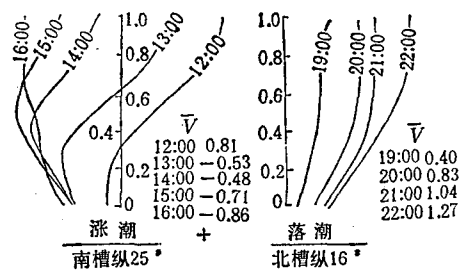


图 3 模式 II 流速梯度与垂线平均流速的关系

Fig. 3 Relationship between two average current velocity of vertical direction and grading of velocity for model II

垂线平均流速来表示絮凝体所受到的剪切力与抗剪能力之间的关系在长江口天然水流中仍然是可行的,因为在长江口涨落潮过程中对水流切应力起主导作用的流速梯度有随平均流速而变的趋势(图3),而水流切应力又是絮凝体所受到的主要外力。其它如絮凝体与水流的相对运动、絮凝体的抗剪能力与流速的关系等与室内试验所展示的现象是一致的。(4)絮凝临界流速值的确定,目前仅能在垂线含沙量分布曲线中找出连续两次观察其分布规律发生改变时,取平均的垂线平均流速作为近似估计值。如图(1)c、d中取实线和点划线所对应垂线平均流速(4点平均)的中值作为絮凝临界流速值,分别为0.76 m/s和0.79 m/s。但絮凝临界流速值亦可随粒径,含沙量,流速梯度分布等因素变化而变化,这有待于今后作更深入的研究。

IV. 垂线不同高程处的絮凝条件

按照动水絮凝原理,在泥沙和电介质性质确定之后,水流中是否有絮凝现象则取决于絮凝体的受力条件。当水流切应力大于絮凝体的抗剪强度时,絮凝体由于受剪切而破碎,因而水流中几乎无絮凝现象。当切应力小于絮凝体的抗剪强度后,水流中絮凝现象的产生取决于颗粒碰撞,而紊动水流的碰撞条件主要由紊动剪切和颗粒不均匀下沉所引起,其碰撞几率 I_{ij} 可由下式决定:

$$I_{ij} = \frac{4}{3} n_i n_j (r_i + r_j)^2 G$$

上式表明,当颗粒直径(r_i, r_j)确定之后,碰撞几率主要由流速梯度 G 和起始含沙浓度(n_i, n_j)所决定。垂线上切应力和含沙浓度的不同影响碰撞几率,以致影响垂线不同高程处的絮凝条件。水流切应力在大于絮凝体抗剪强度时对絮凝体起分散作用,在小于絮凝体的抗剪强度后又促进絮凝体的形成。

图3表明,在长江口涨、落潮过程中,垂线流速梯度的变化基本上是床面附近大于主流区,而在主流区中又以水面附近最小。这样的流速梯度所产生的切应力,使泥沙向上运动时垂线上的絮凝条件遵循从单颗粒至小絮凝体至更大的絮团的变化规律。图(2)展示的分层流速、含沙量关系,即是这种变化规律的表现。该图中底层、0.2H'层悬浮分支是陡直的,但至0.4H'层悬浮分支不再陡直,而且比模式I相应层更缓,这表明0.4H'层的悬浮规律已经与下面两层不同。如前所述底层和0.2H'层悬浮分支陡直反映了单颗粒泥沙悬扬特性,那么从0.2H'至0.4H'层悬扬能力减小如此之多,只能是由于其间发生了絮凝作用。而一旦絮凝作用发生,水流切应力便开始促进絮凝,因此从0.4H'向上絮凝体会不断增大,直至0.6H'向上悬浮终止。以上分析仅表明垂线高度上絮凝条件的不同,至于在何高度开始出现絮凝,则应根据该处的流速、含沙量关系而定,并非均在0.2~0.4H'之间。

在分层流以上的水流中,由于絮凝体向上扩散受到限制而使该层的含沙浓度一般都小于0.3 g/L。又由于该层的流速梯度很小,因而碰撞几率亦小。上两原因使得该层絮凝作用很微弱,于是垂线上就表现出均匀的浓度分布。该现象与krone试验的结果相符^[3]。

分层流以下的淤积过程,是出现在水流切应力已不能使絮凝体破碎的情况下,因此从0.6H'至床面附近均有絮凝现象,而且絮凝体的尺寸愈往下愈大。在接近床面的近壁区,是垂线上切应力最大之处,在该处有相当一部分絮凝体被剪破。而分散颗粒着床后又因触变和固结作用,使其结构连结重新恢复,但该时絮凝体内的水分较水流中大大减少,这种较密实的絮凝体在室内试验中也已经发现。

V. 结语

本文通过泥沙竖向运动规律的分析,得出长江口絮凝泥沙在运动过程中具沉速大、悬浮能力低等一系列特征,这些特征是引起长江口泥沙运动出现分层流,以致引起口门拦门沙地区河床淤浅的重要原因之一。

本文分析了长江口水流对泥沙絮凝的影响,得出:(1)水流切应力是继颗粒表面电荷、电介质性质之后影响絮凝的又一重要因素,也是造成垂线上泥沙絮凝条件不一,影响竖向运动规律的重要因素。(2)存在一絮凝临界流速,当絮凝临界流速确定后,一个潮周期中出现絮凝的历时也可确定,这对分析、计算不同潮型、不同季节悬沙淤积强度有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 蒋如琴、范家骅,1983。含盐浑水的淤积及其二维数值计算。第二次河流泥沙国际学术讨论会论文集。水利电力出版社,118~127页。
- [2] 钱宁、万兆惠,1983。泥沙动力学。科学出版社,307~310页。
- [3] Ranjan Ariathural and Ray B krone, (赵知梅译) 1976。粘性沉积物输送的有限单元模式。ASEC 3: 323~337。

FLOCCULATION OF FINE SEDIMENT IN NATURAL WATERS FLOW OF CHANGJIANG ESTUARY

Ruan Wenjie

(The Research Division of Estuary and Harbor, Hangzhou University, 310028)

Received: April 20, 1990

Key Words: Changjiang estuary, Fine sediment, Flocculation

Abstract

Based on the data from 1978 year's hydrological survey in Changjiang Estuary, the fine sedimentary flocculation, which was affected by water flow, was analyzed in this paper. (1) the law of sedimentary velocity motion was changed by flocculation, and formed a vertical stratified flow. (2) there is a critical velocity of flocculation in the natural water flow. The law of vertical motion in sediment particles flocculaed was reflected, only current velocity is less than this velocity. (3) in the water flow where current velocity is less than critical velocity in flocculating condition at different height in vertical direction was restricted by shear stress in water flow.