

细颗粒煤粉的密实过程及其对起动流速的影响^{*}

高亚军 刘长辉 郑巧红

(南京水利科学研究院 南京 210024) (淮海大学水利水电工程学院 南京 210098)

摘 要 在实体泥沙模型试验中,煤粉是常用模型沙.它在长系列实体泥沙模型试验中,与细颗粒泥沙运动特性有误差.通过水槽试验,研究了细颗粒煤粉干容重随淤积历时的变化,探讨了其密实机理及对起动流速的影响.试验结果表明煤粉的沉积密实程度对起动流速有一定程度的影响.

关键词 细颗粒煤粉;淤积历时;密实;干容重;起动流速

中图号 TV149

泥沙起动规律是河流动力学中的基本问题之一,在研究冲积性河流细颗粒泥沙的起动问题时,需要区别两种不同的情况.一种是在河床冲淤过程中,自然沉积下来、新淤不久、尚未完全密实的泥沙;另一种是沉实之后的泥沙.模型沙在自然沉积下来至完全密实过程中干容重及起动流速的变化,目前研究得尚不多.对于长系列模型试验来说,密实过程中能否保持泥沙运动相似性是至关重要的.

泥沙密实作用影响泥沙起动流速,进而影响河床演变.沙样性质不同,其密实过程将有所不同,对起动流速的影响程度也不同.本文以长系列实体泥沙模型试验中常用的细颗粒煤粉模型沙为试验沙样,研究其密实过程,进而探讨细颗粒煤粉起动流速与密实程度之间的关系.

1 煤粉模型沙的沉降特性及密实过程

泥沙的沉降规律是泥沙运动的基本特性之一,在泥沙起动试验之前,进行一些沉降规律的研究很有必要.经测定煤粉的密度为 1.33 g/cm^3 ,经过模型沉沙池的一级粗选以后,再经过水槽进行二级精选,沙样级配明显均匀化.选取的两组沙样中值粒径为 0.02 mm 、 0.06 mm .由图 1 可知,模型沙的级配比较均匀,试验中可作为均匀沙看待,从而有利于起动标准的控制及提高试验准确性.

细颗粒泥沙在含沙水体浑液中的沉降,受含沙浓度的影响,细颗粒泥沙与单颗粒泥沙沉降过程不同.细颗粒煤粉在高含沙浓度下表现为群体沉降,形成一种空间网架结构,即搅拌均匀后不久形成一个清浑水的分界面,沉降过程中分界面下降,实质上也就是整个空间网架结构的脱水^[1].细颗粒泥沙的群体沉降速度,随历时的增长,逐渐减小.群体沉降停止后,沉降进入群体沉降制约状态.此后,开始另一种沉降过程,即密实过程.随着历时的增长,淤积体内进一步脱水,泥沙逐渐密实,密实时间有长有短,有的几天达到完全密实,泥沙颗粒结构进入密实稳定状态;有的需长达几个月的时间,才趋于密实稳定.黄建维对天然泥沙的研究发现,细颗粒泥沙从群体沉降状态至淤积体的密实过程中,存在一个临界浓度,这种沉降状态、临界浓度大小与泥沙的性质、粒径大小等因素有关^[2].沉降试验在高 60 cm 、直径 25 cm 的圆筒中进行.粒径较粗的沙样较早进入群体沉降制约状态,而粒径较细的沙样进入群体沉降制约状态的历时较长;

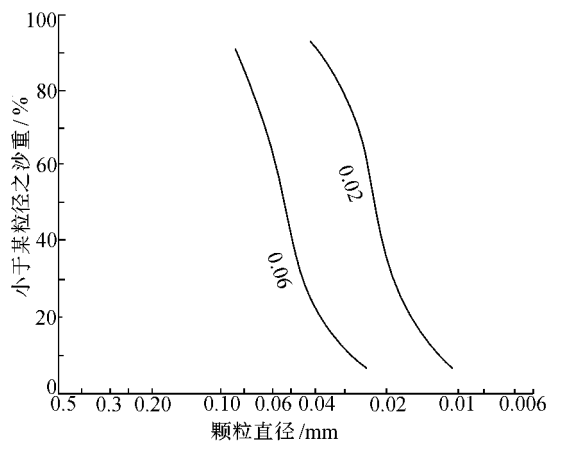


图 1 模型沙级配曲线
Fig.1 Gradation of model sediment

收稿日期:1998-05-29
第一作者简介:高亚军,男,工程师,河流动力学专业.
^{*} 国家自然科学基金委员会与中国长江三峡工程开发总公司联合资助项目(59493600-1-3)的部分研究成果.

在同一含沙浓度下,粒径越细,进入群体沉降制约状态的历时也越长.沉降脱水过程一直延续了 90 d,由沉降筒内观察可知,淤积面的沉降,粒径为 0.02 mm 和 0.06 mm 的煤粉淤积体进入群体沉降制约状态的历时分别为 7.2 h 和 2 h 左右,达到密实稳定的历时分别为 15 d 和 3 d 左右.

淤积体处于密实过程中其表层干容重随历时的变化如图 2 所示.采用环刀取样法,即用高 1 cm、直径为 2 cm 的铜环取表层淤积体,烘干后称重得到干容重,一次采三个样取平均值,一个历时取一次样,取样后重新搅沙沉降.由图 2 可见,同一粒径下历时干容重随历时的增长而增大,直至密实稳定.相同历时下,历时干容重随粒径的增大而增大. $d_{50}=0.02\text{ mm}$ 的淤积体,试验总历时 60 d,15 d 左右干容重基本保持不变,平均干容重为 5.0 kN/m^3 ,各个历时的干容重基本上在平均干容重左右.而 $d_{50}=0.06\text{ mm}$ 的淤积体,试验总历时 60 d,其在 3 d 以后干容重就基本保持不变,平均干容重为 5.36 kN/m^3 ,各个历时的干容重基本上也在平均干容重左右.同样在水槽中的干容重为每次试验结束后取样所得.由图 2,3 可见,煤粉干容重随历时的变化规律无论是在动水后还是静水中两者均相同.相同粒径下,历时干容重随历时的增长而增大.相同历时下,历时干容重随粒径的增大而增大.由试验可知,煤粉模型沙的静水和动水干容重大小和变化基本一致,达到稳定的历时也基本相同,说明静水和动水的沉积密实过程基本一致,不同粒径煤粉的干容重变化范围见表 1.

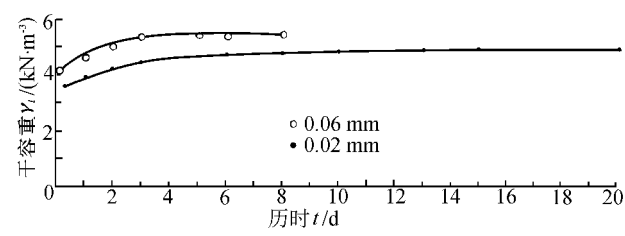


图 2 煤粉在静水密实过程中干容重随历时的变化
Fig.2 Dry unit weight of powdered coal versus sedimentation silting duration in the condition of still water

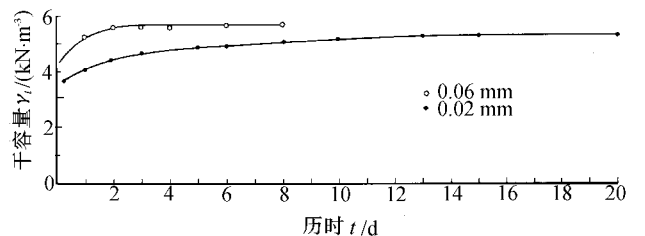


图 3 煤粉在水槽动水作用下干容重随历时的变化
Fig.3 Dry unit weight of powdered coal versus silting duration in moving water

表 1 不同粒径煤粉的干容重变化范围		
Table 1 Variation range of dry unit weight of fine powdered coal of different diameters		
粒 径/mm	$d_{50}=0.02$	$d_{50}=0.06$
干容重变化范围/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	3.63 ~ 5.20	4.17 ~ 5.54

上述分析表明,煤粉模型沙表层干容重与沙样的粒径和沉积历时有关.粒径越粗,历时越长,干容重越大;当淤积体沉积一定时间后干容重达到密实稳定.因此,历时干容重可表示成如下形式

$$\gamma_t = \gamma_{\text{稳}} - k \times \log\left(\frac{t_{\text{稳}}}{t' + t_0}\right) \tag{1}$$

式中: k ——系数; γ_t ——历时的干容重, kN/m^3 ; $\gamma_{\text{稳}}$ ——淤积体达到密实稳定时的干容重, kN/m^3 , $\gamma_{\text{稳}} = f(d)$, d_{50} ——中值粒径, cm; $t = t' + t_0$, t' ——淤积历时, d; $t_{\text{稳}}$ ——淤积体达到密实稳定时的历时, d, $t_{\text{稳}} = f(d_{50})$; t_0 ——模型沙沉降进入沉降制约状态的时间,对粒径为 0.02 mm 的煤粉,取 $t_0 = 0.3 d_{50}$,对粒径 0.06 mm 的煤粉,取 $t_0 = 0.0833 d_{50}$.不同模型沙其沉积密实过程不同,因此,当煤粉粒径在 0.02 ~ 0.06 mm 内,受动水作用,其干容重变化可用经验公式表示为

$$\gamma_t = (5.03 + 85.75 d_{50}) - 1.03 \log \frac{18.5 - 2750 d_{50}}{t' + t_0} \tag{2}$$

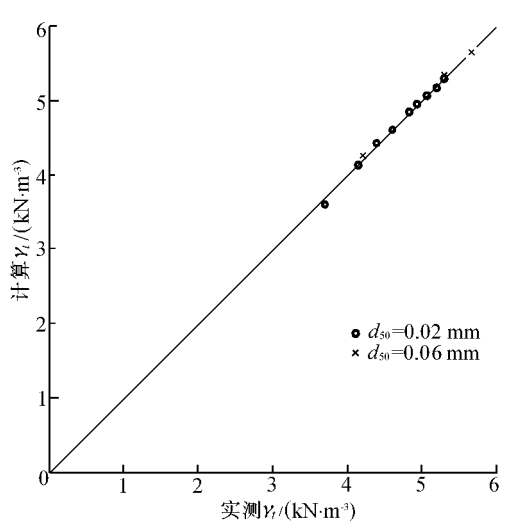


图 4 煤粉模型沙干容重计算值与实测值的对比
Fig.4 Comparison of calculated and observed values of dry unit weight of model sediment

公式计算值与实测值之对比,如图 4 所示,从图可见,两者基本吻合.

2 煤粉模型沙密实对起动流速的影响

长 11 m、宽 0.4 m、高 0.2 m 的变坡水槽,试验前水槽经过率定,宽深比 B/H 大于 5,可确保中间部位的水流不受边壁影响^[3].

对于细颗粒泥沙,人为铺在水槽中很难平整、均匀,特别是干容重随历时增长的关系很难测定,这与模型试验不相符,因此采用自然沉降法.在水槽中间用木板隔离出一段 4 m 左右长度,木板外两头充满清水,中间段放入沙样,沙样厚度为 5 cm 然后中间也放水至与板外水面相平,接着把中间沙样充分搅动均匀,使中间沙样配制成高含沙浓度下作群体沉降运动.不同粒径到达群体沉降制约状态的历时不同,根据前面静水沉降确定的临界历时和水槽边观察的沉降历时,确定淤积体进入群体沉降制约状态的历时,最后,去掉木板,稳定一段时间以后开始试验.

试验水深为 3.5 cm,5.0 cm,7.0 cm,起动流速为流速仪测定的垂线平均流速,并用断面平均流速校核.每组试验重复 2 次,干容重共测定 300 多个沙样,试验结果见表 2.

表 2 煤粉模型沙密实过程中的起动流速实测值

Table 2 Measured threshold velocity of fine powdered coal during the compact process									
时间 t /d	表层干容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)		水 深/cm	起 动 流 速/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)					
	$d_{50}=0.02\text{ mm}$	$d_{50}=0.06\text{ mm}$		$d_{50}=0.02\text{ mm}$			$d_{50}=0.06\text{ mm}$		
				个别动	少量动	普遍动	个别动	少量动	普遍动
t_0	3.626	4.165	3.5	4.25	7.39	8.91	4.54	5.45	6.17
			5.0	4.85	7.54	9.70	4.75	5.95	6.91
			7.0	5.13	8.01	10.24	5.40	6.35	7.55
1	4.067	5.174	3.5	5.45	8.64	10.28	4.68	6.26	7.86
			5.0	6.00	8.80	11.32	5.03	6.78	8.25
			7.0	6.48	9.08	12.28	5.68	7.53	8.58
2	4.312	5.537	3.5	5.77	9.02	10.88	5.50	6.89	8.36
			5.0	6.05	9.71	11.60	5.79	7.20	8.98
			7.0	6.89	10.07	12.17	6.15	8.18	9.49
3	4.528	5.468	3.5	6.21	9.77	11.61	5.65	6.95	8.64
			5.0	6.46	10.23	11.79	5.62	7.14	9.00
			7.0	7.34	10.95	12.41	6.31	8.22	9.38
5	4.684	5.439	3.5	6.70	8.93	11.71	5.41	6.82	8.41
			5.0	7.16	10.15	11.95	5.78	7.13	8.83
			7.0	7.86	10.66	12.28	6.10	8.11	9.35
6	4.802	5.498	3.5	6.53	9.78	12.44	5.66	6.94	8.57
			5.0	7.03	11.05	12.89	5.82	7.32	9.05
			7.0	8.08	11.66	13.45	6.24	8.35	9.37
8	4.959	5.557	3.5	6.87	10.16	13.07	5.87	7.01	8.78
			5.0	7.66	11.22	13.74	5.92	7.26	9.08
			7.0	8.44	12.05	14.02	6.35	8.18	9.50
10	5.076		3.5	6.79	10.20	13.00			
			5.0	7.70	11.50	13.79			
			7.0	8.61	12.03	14.12			
13	5.174		3.5	6.93	10.98	13.26			
			5.0	7.97	11.70	14.39			
			7.0	8.82	12.30	14.86			
15	5.194		3.5	6.80	11.05	13.20			
			5.0	8.00	11.78	14.50			
			7.0	8.90	12.20	14.68			
20	5.155		3.5	6.85	10.69	13.15			
			5.0	7.84	11.61	14.28			
			7.0	8.77	12.37	14.90			

细颗粒模型沙的起动与天然沙的起动相似,同时受到重力作用和粘结力作用的影响,随着粒径的减小,重力作用减小,粘结力作用增大,起动流速也增大. 模型沙及天然沙在长时间的沉积过程中,淤积体逐渐密实,干容重逐渐增大,势必导致起动流速的增大. 不同模型沙由于其密实过程不同,其对起动流速的影响也不同. 细颗粒煤粉达到密实稳定的历时较长,干容重的变化较大,因此干容重的变化对起动流速的影响也较大. 中值粒径为 0.02 mm 的淤积体从 3.63 kN/m³增大到 5.20 kN/m³,相对干容重 $\gamma_t/\gamma_{稳}$ 达 0.70,细颗粒模型沙煤粉的起动流速平均增幅为 35%,因此煤粉淤积体在密实过程中干容重的变化对起动流速的影响是不容忽视的. 从水槽试验资料可知,起动流速随相对历时的增长而线性增大(见图 5),随着历时增长,干容重相应增大,起动流速也线性增大(见图 6).

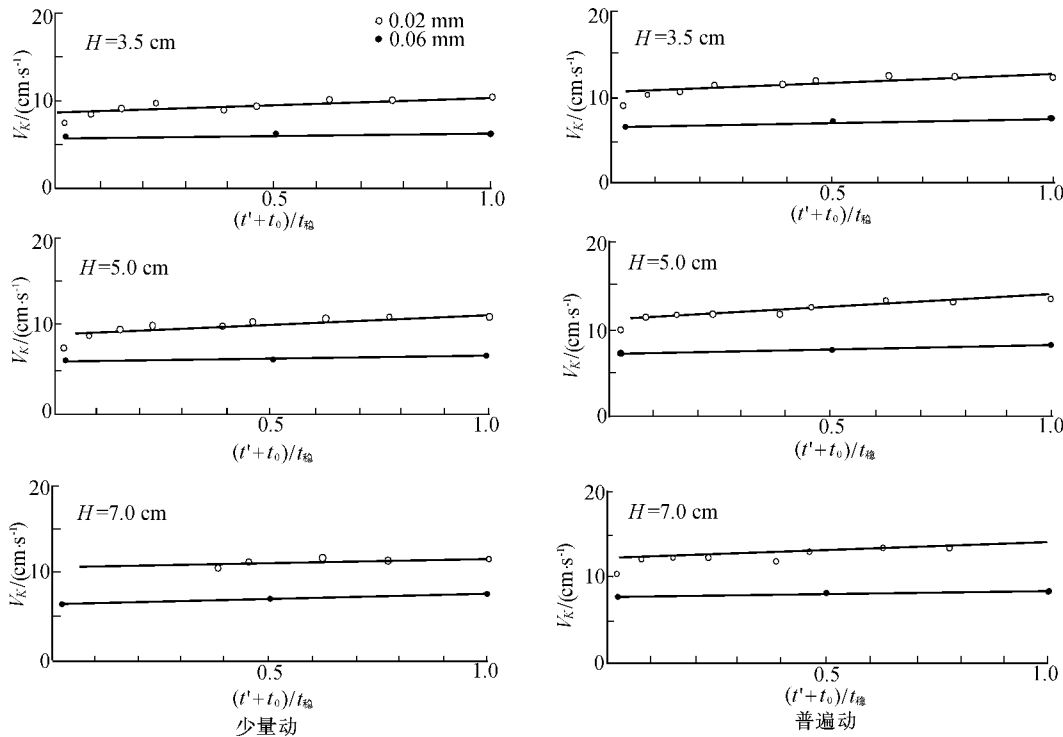


图 5 煤粉起动流速随相对历时的变化

Fig.5 Threshold velocity of fine powdered coal vs.sedimentation duration

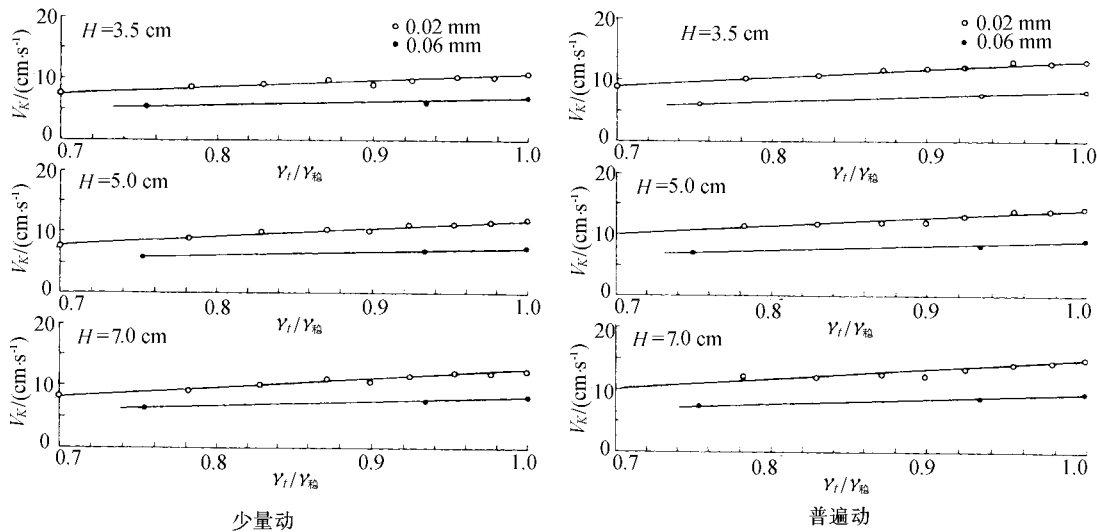


图 6 煤粉起动流速随相对干容重的变化

Fig.6 Threshold velocity of fine powdered coal vs. relative dry unit weight

综上所述,细颗粒模型沙煤粉的起动流速随着粒径的减小而增大,随着历时的增长和干容重的增大而增大,随着水深的增大而增大,这种变化规律对于不同的模型沙是相一致的,但是由于各种模型沙的性质不同,沉降密实过程中的干容重变化不同,因此造成对起动流速的影响不同.

作者在文献[3]中应用窦国仁的起动流速公式和电木粉的水槽试验资料进行了对比,两者基本相一致,得到比较满意的结果.因此本文同样采用窦国仁起动流速公式:

$$V_K = m \ln(11 \frac{H}{\Delta}) \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d + 0.19 (\frac{\gamma_t}{\gamma_{稳}})^{2.5} \frac{\epsilon_k + g H \delta}{d}}$$

(3)

式中电木粉的粘结力参数 $\epsilon_k = 0.20 \text{ cm}^3/\text{s}^2$,根据公式(3)和煤粉试验实测资料,可得到煤粉的粘结力参数 $\epsilon_k = 0.165 \text{ cm}^3/\text{s}^2$. 由图 7 可见,煤粉的粘结力参数随相对历时是不变的.由此说明了每一种沙样具有其本身的固有粘结性,而不同的沙样固有的粘结性则有所不同.

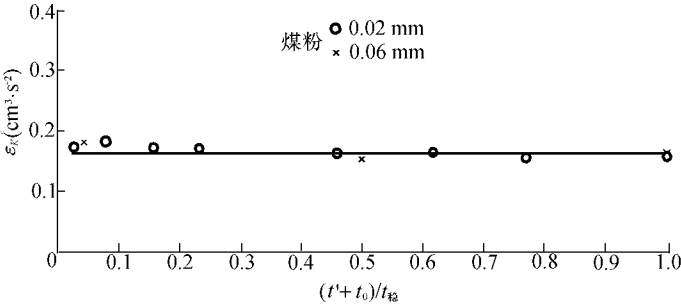


图 7 煤粉模型沙粘结力参数随相对历时的变化

Fig.7 Cohesive force coefficient of fine powdered coal vs. sedimentation duration

公式(3)的计算值与试验实测资料绘于图 8,由图可见,计算和实测起动流速基本相一致.

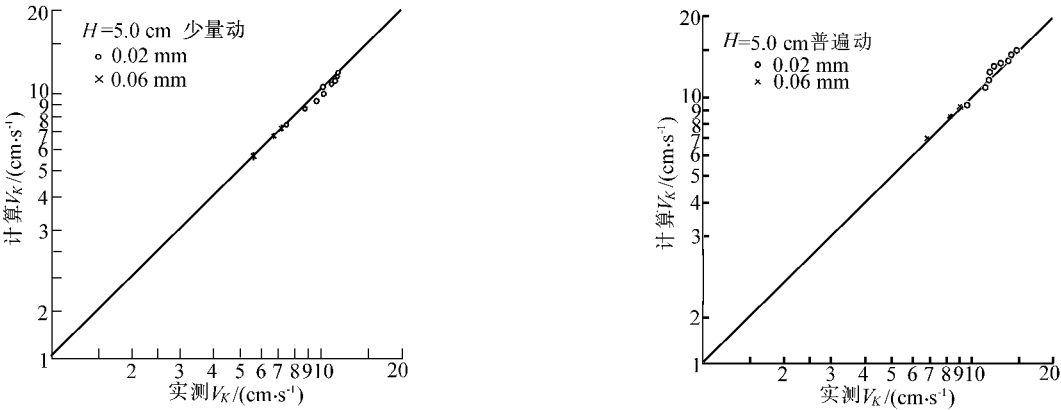


图 8 起动流速计算值与实测值对比

Fig.8 Comparison of calculated and observed values of threshold velocity

值得一提的是,模型沙在水槽中试验没有泥沙冲淤变化,而冲积性河流模型试验中,河床经常有冲刷及淤积,基本上没有表层粘结性的变化,主要是密实过程中干容重变化的影响,粘结力参数 ϵ_k 是一定的.煤粉粘结力参数 $\epsilon_k = 0.165 \text{ cm}^3/\text{s}^2$,公式(3)能较好地反映煤粉模型沙的起动流速在沉积密实过程中随干容重的变化关系.

3 结 论

通过对细颗粒模型沙煤粉的密实过程研究,明确了细颗粒模型沙的密实机理,分析了起动流速与泥沙粒径、沉积历时、淤积物干容重、水深变化的关系,给出了模型沙煤粉在沉积密实过程中的干容重计算公式.应用窦国仁起动流速公式计算的值与试验资料相符合.试验的结果可以概括为以下几个方面:

- a. 煤粉的历时干容重随着历时的增长而增大,随着粒径的增大而增大,静水状态下和水槽动水作用下

的干容重基本一致. 煤粉达到密实稳定的历时较长, 干容重变化较大.

b. 细颗粒模型沙煤粉的起动流速随着粒径的减小、沉积历时的增长、淤积物干容重的增大、水深的增大而增大. 各种模型沙由于其性质不同, 其在沉积密实过程中干容重的变化不同, 由此造成对起动流速的影响也不同, 煤粉沉积密实程度对其起动流速有一定程度的影响, 是不容忽视的.

参 考 文 献

1 张威, 胡冰, 吕汉荣等. 精煤模型沙特性试验研究. 泥沙研究, 1981(1) 65 ~ 74
2 黄建维. 粘性泥沙在静水中沉降特性的试验研究. 泥沙研究, 1981(2) 30 ~ 39
3 高亚军. 细颗粒电木粉的密实过程及其对起动流速的影响. 水利水运科学研究, 1998(1) 53 ~ 63

Compact Process of Fine Powdered Coal and
Its Influence on Threshold Velocity

Gao Yajun

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024)

Liu Changhui Zheng Qiaohong

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098)

Abstract Sediment physical modelling is a reliable method to solve sediment problems in engineering practice. In the modelling fine powdered coal is widely used. Sediment model test results on the Three Gorges project carried out by different research institutes are and it is found that these results are in agreement in property, but there are some differences in numerical value, especially in the long duration sediment physical model experiment, where problems in similarity of fine sediment motion characteristics is less studied. For analysis of the reasons why there are variations in sediment model test results, by means of flume experiment, the process of dry unit weight of fine powdered coal under water is studied, the mechanism of compact of fine powdered coal and its influence on the threshold velocity are also explored. The experiment results show that the compact degree of fine powdered coal has some influence on threshold velocity.

Key words fine powdered coal ; silting duration ; compact process ; dry unit weight ; threshold velocity