

粒径计颗粒级配分析的泥沙群团沉降规律

苏杭丽 卢永生

(河海大学电气工程学院 南京 210098)

摘 要 提出了泥沙群团分层沉降理论,确定了粒径计沉降速度与分层沉降速度和自然沉降速度的关系,得到了粗泥沙粒径相关以及细泥沙百分相关的关系,从理论上解决了粒径计相关计算的问题,使得粒径计颗分理论得以完善.

关键词 粒径计 群团沉降 粒径相关 百分相关

中图号 TV142.1

1 问题的提出

50 年代中期,我国从苏联引进粒径计,用于 $0.5 \sim 0.005 \text{ mm}$ 范围的泥沙颗粒分析.几乎同时,美国在研究和定型一种称为可视累积管法即 VA 管法^[1],它与粒径计法不同之处在于加沙方法.粒径计用泥沙群团加沙,VA 管采用浑匀水柱加沙.

40 多年来,粒径计的应用为我国水利部门积累了大量的测试资料,同时,由于粒径计测试结果系统偏粗,为河流泥沙颗分留下了一个历史问题.因此从 60 年代初期,国内便展开了粒径计方法的改进和测试成果改正的研究工作,并一直延续到 90 年代.

在改正方法上,对 $0.05 \sim 0.5 \text{ mm}$ 的粗泥沙段采用粒径相关方法,这一点已取得共识.而全泥沙($0.005 \sim 0.5 \text{ mm}$)的改正方法未取得共识,目前提出的方法有:百分相关、粒径相关、速度相关、阻力系统相关等方法.

本文的意图是在现有丰富实验资料的基础上,总结出粒径计颗粒级配分析中尚未清楚的却是关键性的影响因素——泥沙群团沉降,从理论角度阐明粒径计工作原理、偏粗原因及改正方法,以作为目前实验相关方法的一种补充.

2 粒径计颗粒级配分析规律

关于泥沙群团沉降的概念,在钱宁教授的著作中^[2]已经提出,但没有深入一步的定量研究.而恰恰“泥沙群团沉降”被查明是粒径计颗分沉速偏大、粒径偏粗的原因.因此,对于粒径计颗分的计算或对粒径计资料的改正的研究,都必须首先把粒径计分析中泥沙群团沉降这一过程研究清楚.

据文献[2]的定义,无数大小不同、形状不同乃至矿物成分不同的泥沙颗粒混合而不胶结而成的群团,称为泥沙群团.

2.1 泥沙群团分层沉降

泥沙群团在清水中沉降,其图像如同喷发的火箭(图 1),是一个变质量问题,但是它必须满足动量和能量方程.在沉降过程中的某时刻,经过时段 dt ,群团质量 m 减小 dm ,它的沉降速度 w 加微分速 dw ,微分时段内沉降距离 dz ,于是有下式成立:

$$\frac{dm}{m} = -\frac{dw}{w} + \frac{dw \cdot dm}{w \cdot m} = -\frac{dw}{w} \quad (1)$$

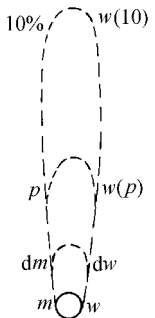


图 1 泥沙群团沉降示意图

Fig.1 Silt group sedimentation

收稿日期:1997-06-24

第一作者简介:苏杭丽,女,博士研究生,港口航道及海岸工程专业,主要从事港口海洋测试技术及计算机应用研究.

* 水利水电基金资助项目(86058165)的部分研究成果.

$$\frac{dm}{m} = - a dz$$

(2)

式中： a ——系数，式(1)由动量守恒定律而来，式(2)由能量守恒定律而来，两者相互独立。

2.2 泥沙群团分层沉降速度 $w(p)$

式(1)进行积分，便得到

$$w(p) = w_{00} \left(\frac{w_{\max}}{w_{00}} \right)^p \quad p = \frac{\ln[w(p)/w_{00}]}{\ln(w_{\max}/w_{00})}$$

(3)

式中： $w_{\max}$ 、 w_{00} ——最大及最小沉速； p ——累计百分比，即分层下来的沙量占总沙量的百分比。 $w(p)$ 与被剥落的次序有关，最先剥落的速度小，最后剥落的速度大。泥沙群团分层沉降速度 $w(p)$ 的对数值与 p 值成直线关系。 $w(p)$ 概念是本文中的一个核心概念。

2.3 粒径计接杯速度 w_n

w_n 定义为泥沙沉降距离除以接杯时间 t_n ，它表示某粒径组泥沙沉降的宏观速度。根据泥沙群团沉速对粒径计沉降过程的影响长短，粒径计分为粗泥沙粒径计和全泥沙粒径计两种。

a. 粗泥沙粒径计：群团沉降过程经历全过程，其接杯速度 $w_{n\text{粗}}$ 由式(4)确定。粗泥沙粒径计特点是分层沉降不影响最小沉速(图2)。

$$w_{n\text{粗}} = w_0 \left[1 + \frac{w_0 - w(p)}{w_{\max}} \right]$$

(4)

式中： w_0 ——分层沉降最小沉速。

b. 全泥沙粒径计：群团沉降过程经历半过程，适用于 0.005 ~ 0.5 mm，其接杯速度为

$$w_{n\text{全}} = w_0 \left[1 + \frac{1}{1 + \beta} \frac{w_0 - w(p)}{w_{\max}} \right]$$

(5)

其中

$$\beta = t_m / t_M$$

式中： t_M ——泥沙团完全瓦解的时间； t_m ——群团瓦解至最大粒径到底的时间。全泥沙粒径计的特点是沙样最大粒径沉速、分层沉降最大速度和最大接杯速度都相等于 w_m (w_m 即分层沉降最大沉速)。其图形和图 2 相反，三线交点在上，底部开叉。

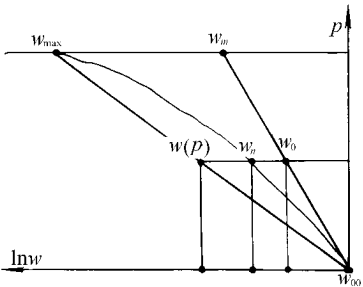


图 2 粒径计级配曲线
Fig.2 Graduation curves of size analysis

3 粗泥沙粒径计粒径相关的理论

3.1 粗泥沙(0.05 ~ 0.5 mm)粒径相关

粒径计粒径相关定义为：相同级配百分比下，粒径计的粒径值与原级配相对应粒径值的关系，即 $D_n \sim D_0$ 关系。据式(4)并认为速度和粒径关系接近平方律，于是有

$$D_n = - k D_0 \left[1 + k^2 \frac{D_m^2}{D_{\max}^2} \left(\frac{D_m}{D_0} \right)^{p-1} - \left(\frac{D_{\max}^2}{D_0^2} \right)^{p-1} \right]^{1/2} \quad D_0 = D_{00} \left(\frac{D_m}{D_{00}} \right)^p$$

(6)

式中： D_m ——原级配沙样最大粒径； D_{00} ——最小粒径。

据研究^{*}， k 为 1.15，一般地 D_{00} 为 50 μm ， $D_{\max} = D_m + 100 \mu\text{m}$ ，据给定的不同的 D_m ，便可以据式(6)分别以 w_m 为 100 μm 、200 μm 、300 μm 、400 μm 、500 μm 、600 μm 进行计算，所得的 6 组理论计算值绘在图 3 上。

为了检验式(6)的正确性，笔者比较了有关文献资料^{**}，取其中的一些平均值作为实验资料，绘在图 3 上与本文理论计算值相比较。

3.2 全泥沙粒径计的粒径相关

全泥沙定义为粒径 0.005 ~ 0.5 mm 的沙样，相当于过去粒径计的使用范围，它的特点是粒径范围从极细到粗都有。据式(5)得

* 熊贵枢等. 几种泥沙粒径分析成果的转换研究. 黄河水利委员会水文局, 1994. 1
** 向治安, 李克勤, 孙敦文等. 粒径计级配成果改正方法实验研究. 长江水利委员会水文局, 1994. 7

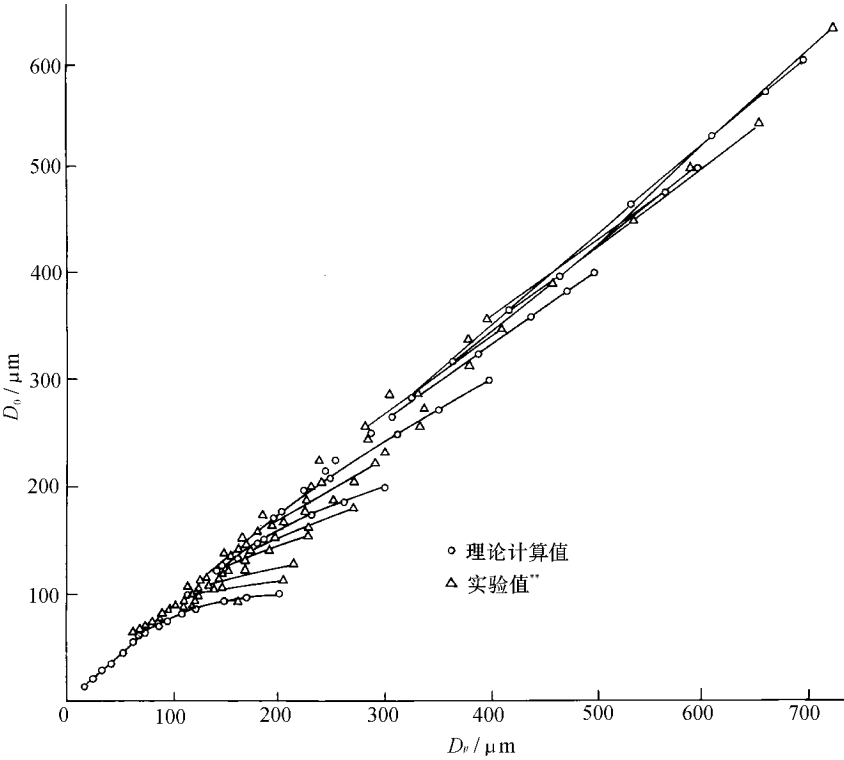


图 3 粒径计粒径相关图
Fig.3 Grain size correlation of size analysis

$$D_n = kD_0 \left\{ 1 + \frac{1}{1 + \beta} \left[\left(\frac{w_m}{w_0} \right)^{p-1} - \left(\frac{w_m}{w_0} \right)^{p-1} \right] \right\}^{1/2} \quad D_0 = D_{00} \left(\frac{D_m}{D_{00}} \right)^p \tag{7}$$

据式(7),以最小粒径为 10 μm ,最大粒径为 200 μm ,β 为 3 ,计算了一组数值 ,也绘在了图 3 上.总观图 3 ,实验结果与式(6)(7)计算的结果相符合.

4 粒径计的百分数相关原理

粒径计的百分数相关定义为 :沙样原级配累计百分数 p_0 与其同沉速的粒径计分析结果 p_n 的关系 ,这种相关适用于 0.005 ~ 0.5 mm 的粒径范围的粒径计结果的改正.设原级配曲线 $p_0 = f(w)$,所以 $w = f^{-1}(p_0)$,据相关的定义及粒径式(4)得

$$p_0 = f \left(\frac{f^{-1}(p_n)}{1 + \frac{1}{1 + \beta} \frac{w_0 - w(p)}{w_m}} \right) \tag{8}$$

如式(8)成立 ,那么原级配 $p \sim w$ 成下式关系 :

$$w = w_m p^A f(p) \quad p = \left[\frac{w}{w_m f(p)} \right]$$

则

$$p_0 = p_n + p_n(1 - p_n)A \quad A = \left[\ln \frac{w_0}{w_m} + 1 - \frac{p^A f(p)}{1 - p_n} \right] / (1 + \beta)^A \tag{9}$$

黄河水利委员会水文局曾就粒径计百分相关做过很多工作 ,发表了许多研究成果 ,其中有代表性的成果集中在图 4 上^[3].有关文献* ,** 称图 4 是依据大约 1000 个沙样实验数据绘成的.

图 4 中三条曲线是由有关文献** 提供的表示粗、中、细三种沙型相关关系的概括曲线 ,代表了全沙粒径

* 赵伯良 ,王雄世 ,刘木林.河流泥沙粒径计法分析成果改正方法的实验研究.黄河水利委员会水文局 ,1994.8
** 刘木林.粒径计资料的沙型改正法.黄河水利委员会水文局 ,1994.8

计百分相关的关系.其特点是 :三条线都起于原点 ,止于顶点 ,中部偏离最大.

笔者利用式 (9) 进行计算 ,当 $A = 0.9 \ 0.7 \ 0.6$ 时 ,可以算出三组数据 ,分别点到图上 ,可以看出三组数据完全落在三条曲线内 ,说明公式 (9) 是符合实验情况的.

5 结 论

a. 有关文献*指出 :“粒径计沉降时 ,由于初始阶段的整体沉降和过渡阶段的异重沉降 ,使得沉速偏大 ,级配偏粗 .这是泥沙群团在清水中沉降的基本规律 .”本文把这一图像归纳为泥沙群团分层沉降的模型 ,并据物理学基本定理得到泥沙群团分层沉降速度.

b. 粒径计的沉降速度 w_n 是泥沙群团分层沉降速度 $u(p)$ 及沙样自然沉降速度 w_0 的有规律的组合 ,使得粒径计沉速 w_n 大于自然沉降速度 w_0 .据泥沙群团沉速 $u(p)$ 对粒径计测试结果影响不同 ,把粒径分为粗沙粒径计(用于 $0.05 \sim 0.5 \text{ mm}$)和全沙粒径计(用于 $0.005 \sim 0.5 \text{ mm}$)两种.

c. 对粗泥沙粒径计 ,图 3 表明 ,本文式 (6)(7) 计算的结果与有关文献* 实验结果基本一致 .图 4 表明 ,本文式 (8)(9) 计算的结果与有关文献** 的结果相符 .这两个结果一致说明粒径群团分层沉降理论是抓住粒径计泥沙沉降本质的.

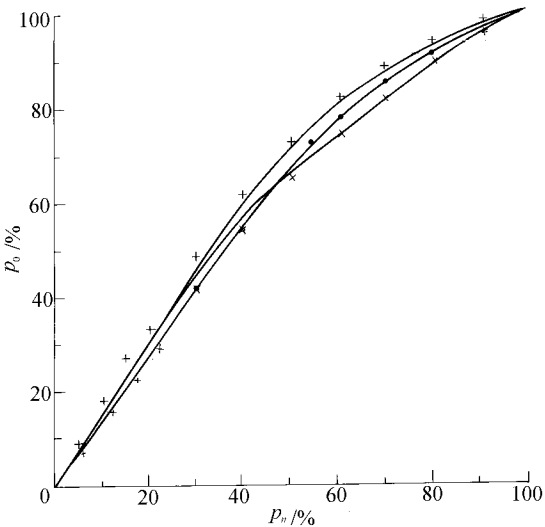


图 4 粒径计百分相关曲线
Fig.4 Percentage correlation curves of size analysis

参 考 文 献

1 Harold PGUY. Laboratory theory and methods for sediment analysis. Washington :Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey United States Government Printing Office ,1977. 30 ~ 40
2 钱宁 ,万兆惠 .泥沙运动力学 .北京 :科学出版社 ,1983. 62
3 刘木林 ,刘明月 .粒径计资料改正方法的试验 .人民黄河 ,1982 (5) 33 ~ 37

A Theory of Silt Group Settling for Particle Size Analysis
by Particle Size Apparatus

Su Hangli Lu Yongsheng

(College of Electric Engineering ,Hohai Univ . ,Nanjing 210098)

Abstract A theory of silt settling in layers of size groups is put forward. The relation between the settling velocity of the layers and the natural settling velocity is determind. Correlations between the true and measured sizes for coarse particles are set up ;and the cumulative percentage of fine particles for all particles is checked with the experimental data. A theoretical background for correction of the measured size gradation by using the Settling Tube Method for size analysis of fluvial sediment samples is provided.

Key words particle size apparatus ;silt group settling ;interrelation of particle size ;percentage interrelation

* 向治安 ,李克勤 ,孙敦文等 .粒径计级配成果改正方法实验研究 .长江水利委员会水文局 ,1994. 7
** 刘木林 .粒径计资料的沙型改正法 .黄河水利委员会水文局 ,1994. 8