

非粘性均匀沙群体沉降运动沉速公式的研究

张耀哲

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] 从相对运动的观点出发, 将非粘性均匀泥沙群体沉降运动概化为上升水流在悬浮颗粒层内的运动, 通过量纲分析和动平衡状态受力分析, 建立了泥沙群体沉降运动中阻力系数和雷诺数的表达式, 并分别建立了层流区和紊流区均匀沙群体沉速的理论公式, 其结构形式与目前常用的经验公式较为一致。应用实测资料对公式进行验证的结果表明, 应用该理论公式的计算值与实测值吻合程度较好。同时通过分析讨论, 提出了非均匀沙群体沉降速度问题的解决途径。

[关键词] 非粘性均匀沙; 群体沉降; 沉降速度; 阻力系数

[中图分类号] TV 142⁺. 1

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2006)04-0117-04

对泥沙沉速问题的研究成果可谓浩如烟海。从17世纪中叶马里奥特提出的液体阻力对物体沉降速度产生影响这一基本概念, 到纳维和司托克斯于19世纪中叶提出的粘性不可压缩流体运动微分方程, 及其进一步得到的著名的司托克斯球体沉速公式, 再到后来沙玉清、张瑞瑾等对泥沙沉降一般规律的较为系统的研究, 人们对泥沙沉降问题的研究经历了由定性到定量的飞跃, 对泥沙沉降现象的研究也由单颗沉降的研究发展到对高浓度浑水中泥沙群体沉降问题的研究^[1-4]。现有泥沙群体沉速公式多为经验表达式, 其对沉速与各物理量间的关系以及群体沉降运动的阻力规律表达不明确, 这是该问题研究的不足之处。所有沉降现象的研究目标都是建立沉速的准确表达式, 在此过程中沉降运动阻力系数表达式的建立成为解决问题的瓶颈。根据有关泥沙沉降的大量研究成果^[1, 3-6], 泥沙在静水中沉降所遵循的一般规律可归纳为: 随着水体含沙量的增加, 沉降现象依次为单颗沉降、絮凝沉降、群体沉降直到密实沉降。在群体沉降区内, 每一次沉降过程均随时间的增加先后经历匀速沉降段、过渡段和压缩沉降段。就生产实际中所能遇到的高含沙水流问题而言, 位于群体沉降区的高浓度含沙水体较为常见。为此, 本文主要针对非粘性均匀沙在群体沉降区段的沉降运动现象进行研究论述。

1 泥沙群体沉降的一般规律

随着浓度的增加, 含沙水体的沉降现象和机理

有质的区别, 单颗沉降、絮凝沉降、群体沉降及密实沉降各区段间存在相应的临界浓度。试验研究^[1, 3]表明, 以非粘性颗粒泥沙为主的含沙水体, 其发生群体沉降的体积含沙量浓度范围大致为 $S_v = 0.06 \sim 0.27$ 。其沉降的一般现象为: 当浓度逐渐增加时, 沉降筒内先出现浑水交界面, 与此同时浑水体内部形成絮网结构体, 当界面开始沉降时, 界面下以等浓度层为整体向下沉降, 由于沉降容器深度有限, 因此经过某一时段后, 等浓度层以下容器底部的絮网结构体发生破坏, 絮网结构体间孔隙变小, 孔隙水不断排出, 随时间的推移等浓度层最终消失, 完全进入压缩沉降段。匀速沉降段与压缩沉降段之间过渡段存在的时间长短与初始浓度成反比关系。

2 群体沉速公式的建立

2.1 群体沉降现象的物理描述

众多的试验观测^[1, 3, 5-8]表明, 群体沉降最普遍的现象是界面一经形成即以等浓度层下沉, 仔细观察沉降筒边壁极易发现, 絮网结构体下沉的过程中有水体通过沙粒间的孔隙上行, 由于多数含沙水体中都有极细的浮浊物, 因此孔隙中上升水体的流线 and 轨迹也清晰可见。受此启发, 引入相对运动的观点, 认为泥沙在水中群体下沉的运动可以看作是絮网结构体不动而水流向上运动。根据上升液流在悬浮颗粒层内运动的有关理论, 上升液流中粒状材料的悬浮开始于液流速度大于某一临界值之后, 大于该临界值的每一个上升速度必与某一固定的单位液

· [收稿日期] 2005-08-10

[基金项目] 西北农林科技大学重点科研项目

[作者简介] 张耀哲(1963-), 男, 陕西凤翔人, 高级工程师, 硕士, 主要从事治河技术、枢纽泥沙等研究。

流体积中的颗粒浓度相适应,在此情况下整个颗粒层处于动平衡状态。对于所讨论的泥沙群体沉降区中的匀速沉降段,群体沉速(界面沉速)是一定的,可将其视为上升水流在悬浮颗粒层内运动且上升水流速度已大于其临界速度的某一个动平衡状态,相应的颗粒层断面平均水流速度 V_1 就等于泥沙群体沉速 ω (界面沉速)。

2.2 泥沙群体沉降运动中阻力系数和雷诺数的表达式

明兹和舒尔别特的研究认为^[9],液体在多孔介质中运动时,主要影响因素有 P/L (单位厚度内的压差)、 ρ_1 (液体的密度)、 μ (流体的粘性系数)、 l (流体的水流特征长度)、 V_2 (流体的特征速度)。选取 V_2 , ρ_1 , l 作为基本量,用量纲分析法可得:

$$\frac{P}{L} \cdot l/V_2^2 \cdot \rho_1 = f(\mu/\rho_1 \cdot V_2 \cdot l) \quad (1)$$

式中, $\frac{P}{L} \cdot l/V_2^2 \cdot \rho_1$ 为阻力系数 C_d , $\mu/\rho_1 \cdot V_2 \cdot l$ 为雷诺数 Re 的倒数。明兹等^[9]进一步分析后确定了流体水流特征长度 l 的表达式为:

$$l = m/W \quad (2)$$

式中, m 为粒状材料的孔隙度; W 为单位体积中颗粒的总表面积。流体的特征速度 V_2 可用颗粒孔隙中水流的速度表示为:

$$V_2 = V_1/m \quad (3)$$

式中, V_1 为相应颗粒层断面的平均水流速度,其与泥沙群体沉速 ω (界面沉速)相等。若以 d 为颗粒直径,则单位体积内颗粒的总表面积可表示为:

$$W = \frac{6(1-m)}{d} \quad (4)$$

将(2)、(3)、(4)式代入(1)式,可分别得到上升液体在悬浮介质中运动时的水流雷诺数和阻力系数的表达式为:

$$Re = \rho_1 V_1 d / 6\mu(1-m) \quad (5)$$

$$C_d = \frac{P}{L} m^3 d / 6\rho_1 V_1^2 (1-m) \quad (6)$$

再按相对运动的观点,(5)、(6)式同样为泥沙群体沉降运动中雷诺数和阻力系数的表达式。对处于群体沉降区匀速沉降段的等浓度层,由于其为动平衡状态,故向上的水流压力与该断面颗粒层的有效重力相等。取一等浓度层厚度为 L ,并令沉降筒的横断面积为 F ,厚为 L 的等浓度层上下压差为 P ,则有效重力为:

$$G = (\rho_2 - \rho_1)g(1-m)FL \quad (7)$$

式中, ρ_2 和 ρ_1 分别为沙粒和水的密度。上升水流作

用于等浓度层的向上压力为:

$$G' = FP \quad (8)$$

由于有 $G = G'$;则有:

$$\frac{P}{L} = (\rho_2 - \rho_1)g(1-m) \quad (9)$$

引入体积含沙量的概念后,有:

$$m = 1 - S_v \quad (10)$$

式中, S_v 为体积含沙量。如前所述, $\omega = V_1$,将此条件连同(9)、(10)式代入(5)、(6)式,则可得到泥沙在群体沉降区的匀速沉降段进行沉降运动时的阻力系数和雷诺数的表达式为:

$$Re = \rho_1 \omega d / 6\mu S_v \quad (11)$$

$$C_d = (\rho_2 - \rho_1)(1 - S_v)^3 g d / 6\rho_1 \omega^2 \quad (12)$$

2.3 泥沙群体沉降运动时的沉速公式

沙玉清^[4]的试验研究表明,对于不同的流区,阻力系数和雷诺数的关系有着不同的规律。在层流区, $Re < 2 \times 10^{-1}$, $C_d = 24/Re$;在紊流区 $Re > 10^3$, $C_d \approx 0.43$;在介流区 $0.2 < Re < 10^3$,阻力系数随雷诺数的增大而增加,目前尚无确切的量化关系。对处于群体沉降区的含沙水体,尽管直观的物理现象是泥沙群体下沉,但毕竟 $m > S_v$,沙粒间的孔隙体积大于沙粒体积,故可认为其同样遵循球体单颗下沉时流区的划分标准。这样在层流区引入 $C_d = 24/Re$ 后,群体沉速公式可表示为:

$$\omega = \frac{gd^2(\rho_2 - \rho_1)(1 - S_v)^3}{864\mu S_v} \quad (13)$$

若引入层流区司托克斯球体沉速公式,则有:

$$\omega = \frac{1}{18} \cdot \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \cdot g \cdot \frac{d^2}{\nu} \quad (14)$$

式中, ω 为该粒径泥沙的单颗沉速, γ 为水的比重, γ_s 为沙的比重, ν 为水的运动粘滞系数。则式(13)和式(14)可写为以下形式:

$$\frac{\omega}{\omega_s} = \frac{(1 - S_v)^3}{48S_v} \quad (15)$$

同样,引入紊流区 $C_d \approx 0.43$ 的条件,由(12)式可得紊流区的群体沉速公式为:

$$\omega = \sqrt{\frac{(\rho_2 - \rho_1)gd(1 - S_v)^3}{258\rho_1}} \quad (16)$$

式(13)、(15)及(16)即为新建立的不计沙粒形状影响时的均匀沙群体沉降区沉速公式。

3 泥沙群体沉速公式的讨论与验证

3.1 同类公式的对比与讨论

现有的泥沙群体沉速公式大致可分为两种类型,一种是以决定群体沉速的各主要影响因子为变

量、直接给出群体沉速的数学表达式, 本文的(13)式即为这种形式; 郑邦民等^[10]在研究流体力学粘性流中圆球绕流规律的基础上, 从流体力学原理出发, 用数值模拟非均匀沙随机分布对流场的影响, 推导得出了固体颗粒群体沉速的理论解, 它可反映泥沙浓度与组成对群体沉速的影响, 也为这种形式。另一种较为多见的是以群体沉速与泥沙单颗沉速的相对值为量值, 建立其与主要影响因子的关系, 从而得到群体沉速表达式。由于沉降运动阻力系数的表达式未能很好解决, 因此以前所能见到的泥沙群体沉速公式绝大多数是以 ω/ω_0 这一相对值的形式出现, 且基本上以经验公式为主。张兴荣^[5]曾通过引入泥沙群体沉降过程中宾汉极限切应力及沉降筒直径等因素, 建立了可表示泥沙群体沉降中宾汉体阻力系数的表达式, 并据此得到了直接计算群体沉速的公式, 但是该公式过于复杂, 且由于其将沉降筒直径作为变量因子考虑, 因而其适用性值得进一步讨论。

本文所给出的泥沙群体沉速公式((13)式)及阻

力系数和雷诺数的表达式((11), (12)式), 具有明确的物理概念和理论基础, 将(13)式的结构形式变为(15)式后, 可发现其与钱宁等^[1]总结得到的均匀沙群体沉速经验公式($\omega/\omega_0 = (1 - S_v)^n$)有着较为相似的结构形式, 只是钱宁公式中的指数 n 为沙粒雷诺数的函数, 在使用时需查表计算。(13)式的优点在于其建立在理论分析基础之上, 能够量化表达泥沙群体沉降运动的基本规律; 其不足在于为使理论分析问题简化, 忽略了生产实际中泥沙颗粒形状和沙粒不均匀性的影响。

3 2 层流区群体沉速公式的验证

为验证公式(13)在生产实际中的适用性, 用 $d < 0.12\text{ mm}$, $d_{50} = 0.06\text{ mm}$, $\gamma_s = 2.06\text{ g/cm}^3$ 的姚孟电厂粉煤灰以及 $d_{50} = 0.052\text{ mm}$, $\gamma_s = 2.05\text{ g/cm}^3$ 的金竹山热电厂粉煤灰沉降试验资料(作者等人1985年的试验资料)对以上各式进行验证, 结果见表1。

表1 层流区沉速实测值与计算值的比较

Table 1 Comparison between the measured sedimentation velocity and the calculated values in the laminar zone

S_v	$\rho_t/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\mu/(\times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2})$	$\omega_{\text{测}}/(\times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	Re	C_d	$\omega_{\text{算}}/(\times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	误差/% Error	备注 Remarks
0.169 9	997.72	0.957 2	1.635	0.010 0	2.232	1.530	- 6.68	姚孟电厂粉煤灰 Fly ash of Yaomeng
0.194 2	998.77	1.089 7	1.258	0.005 9	3.442	1.070	- 14.78	
0.242 7	998.74	1.084 2	0.703	0.002 7	9.151	0.715	1.76	
0.291 3	998.74	1.084 2	0.457	0.001 4	17.748	0.488	6.87	
0.339 8	998.92	1.111 6	0.295	0.000 8	34.421	0.330	11.89	
0.146 3	999.70	1.307	1.240	0.005 6	3.609	1.050	- 15.49	金竹山电厂粉煤灰 Fly ash of Jinzhushan
0.170 7	999.70	1.307	0.958	0.003 7	5.540	0.823	- 14.08	
0.195 1	999.70	1.307	0.784	0.002 7	7.564	0.659	- 16.00	
0.219 5	999.70	1.307	0.576	0.001 7	12.781	0.534	- 7.34	

表1中的9组试验结果表明, 用(13)式得到的理论计算值 $\omega_{\text{算}}$ 与实测值 $\omega_{\text{测}}$ 的误差为1.76%~16%, 考虑到试验所用沙样的不均匀性、沙粒密度的测验误差以及试验时温度变化的影响, 尤其是试验用沙样颗粒形状并非(13)式推导中所简化的标准球体, 则这一误差范围是可以接受的。验证结果表明, 以(13)式作为反映均匀沙群体沉降运动规律的理论公式是符合实际的。以实测群体沉速和其他已知变量因子按(11)、(12)式计算的阻力系数和雷诺数如表1所列, 用双对数坐标点绘其关系如图1所示。对9组资料的分析计算表明, 其雷诺数均小于 2×10^{-1} , 且有 $C_d \approx 22.4/R_e$, 与本文导出(13)式时所假定的 $C_d = 24/R_e$ 非常接近, 这说明(13)式推导过程中有关泥沙群体沉降的流区划分标准与单颗球体沉降运动相同的假设是正确的, 其差别可用前述相同的原因进

行解释。

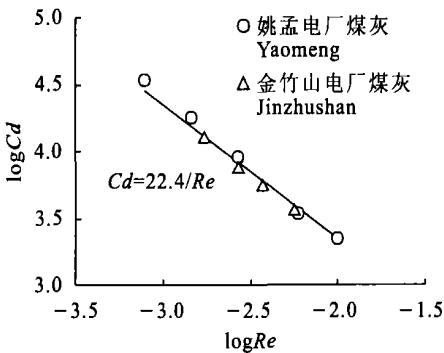


图1 实测资料阻力系数与雷诺数关系

Fig. 1 Relation between number C_d and Re from measured data

3 3 对非均匀沙的处理方法

以上各公式的建立是以均匀非粘性颗粒为对

象,公式中的液体粘性系数为相应温度时清水的粘性系数。在分析含有粘性颗粒的非均匀沙群体沉降问题时,可将运动现象概化为非均匀沙中非粘性颗粒在由粘性颗粒所组成的浑水体中进行的群体沉降运动,此时液体粘性系数可以用由粘性细颗粒所形成的浑水体的粘性系数来表示。有关粘性细颗粒泥沙对液体粘性系数的影响已有大量的研究成果^[1,7,11]。许多研究成果^[1,7,11]均表明,不论由粘性泥沙颗粒构成的浑水体是牛顿体还是宾汉体,其相对粘滞系数(代表浑水的粘滞系数与同温度时清水的粘滞系数的比值)都可由粘性颗粒所形成的浑水体的浓度来量化表示。因此对于生产实际中的非均匀沙群体沉降问题,可通过对泥沙颗粒级配的分级,先通过试验测试特定粘性颗粒所形成的浑水体之粘滞系数,进而利用以上各式确定相关物理量。

4 结 语

本文通过对泥沙群体沉降运动中一些现象的观

察,对泥沙群体沉降运动的机理和规律进行了理论研究和分析,通过将非粘性均匀泥沙群体沉降运动概化为上升水流在悬浮颗粒层内的运动,使影响泥沙群体沉速的各物理量得到明确;通过量纲分析和动平衡状态受力分析,建立了泥沙群体沉降运动中阻力系数和雷诺数的表达式;通过引入球体单颗粒沉降时的流区划分原则及其阻力系数和雷诺数之间的量化关系,建立了反映层流区和紊流区均匀沙群体沉降运动规律的理论公式。实测资料的验证结果表明,公式(11)、(12)、(13)能反映泥沙群体沉降运动的一般规律,对生产实际中泥沙群体沉降问题的研究解决有一定的指导意义。

但由于文中着重于建立能较完整反映影响泥沙群体沉降运动的各变量之间的关系,对生产实际中泥沙的不均匀性问题只给出了解决途径,对泥沙颗粒形状的影响等未做详细考虑和分析,因此公式(11)、(12)、(13)在实际运用中尚需进一步完善。

[参考文献]

- [1] 钱 宁,万兆惠 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983
- [2] 武汉水利电力学院 河流泥沙工程学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1980
- [3] 中国水利学会泥沙专业委员会 泥沙手册[M]. 北京: 环境出版社, 1988
- [4] 沙玉清 泥沙运动学引论[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996
- [5] 张兴荣 粉煤灰静水群体沉降特性研究[R]. 武汉: 武汉水利电力学院泥沙研究室, 1989
- [6] 山西省水利科学研究所 非均匀沙静水沉降试验研究(阶段报告)[R]. 山西太原: 山西省水利科学研究所, 1978
- [7] 张 浩,任增海 高含沙水流沉降规律和阻力特征[C]//河流泥沙国际学术讨论会论文集 北京: 水利电力出版社, 1980
- [8] 夏震寰,宋根培 离散颗粒和絮凝体相组合的沉降特性[C]//第二次河流泥沙国际学术讨论会论文集 北京: 水利水电出版社, 1983
- [9] 明兹,舒别尔特 粒状材料水力学[M]. 北京: 水利出版社, 1957.
- [10] 郑邦民,夏军强 固体颗粒群体沉降速度分析[J]. 泥沙研究, 2004(6): 23-27.
- [11] 褚君达 浑水的粘滞性[C]//河流泥沙国际学术讨论会论文集 北京: 水利电力出版社, 1980

Study on theoretic formula of sedimentation velocity in the sediment group settlement zone

ZHANG Yao-zhe

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi, 712100, China)

Abstract: Based on the view of relative movement, the population settlement was considered a movement of current moving up in the suspend grain layer. The expression of Reynolds number and drag coefficient are set up by analysing dimension and stress of dynamic equilibrium state. The theoretic formula on uniform sediment popular settlement movement disciplinarian in the laminar zone and turbulent zone are proposed. It is verified by using measured data, and showed that the calculated value by the theoretic formula and measured value agree fairly well. Then solutions to the uneven rate of sediment group settlement are put forward.

Key words: reynolds number; sediment group settlement; sedimentation velocity; drag coefficient