

泥 沙 研 究

第 一 卷 第 二 期

泥 沙 研 究 工 作 組 編 輯

1 9 5 6

水 利 出 版 社 出 版

泥 沙 研 究

第一卷 第二期

1956年12月

目 錄

泥沙运动的基本規律	沙玉清著 (1)
(一) 物体的沉速	
(二) 开动流速	
(三) 挟沙量	
根据懸移質積点測量決定輸沙率时所引起的誤差問題	錢 寧 著 (55) 万 兆 蕙
懸移質力学的試驗	美國 H. 勞 斯 著 (65)
河流內懸移質与河床物質的关系	美國 E. W. 萊茵及 A. A. 凱林斯基著 (72)
明渠水流阻力的可加性	美國 H. A. 爱因斯坦及 R. B. 班克斯著 (76)
混濁度的不連續概念	苏联 M. A. 費里堪諾夫著 (84)
懸移質輸沙率与河流水流情形、地勢、 土壤及土地使用情况的关系	美國 H. W. 安德森著 (87)
河床受冲刷时天然鋪面的形成	苏联 B. C. 克諾罗茲 著 (100)
水庫中泥沙控制的新方法	H. 寶格諾阿 著 (104)
含有大量底砂的山区河道的取水樞紐	苏联 H. Ф. 达涅里亞 著 (112)
重要泥沙文献目錄 (第二輯)	(119)

泥沙运动的基本规律

沙玉清

泥沙运动的规律性，可以根据运动的形式，分作三个规律：

(1) 水是静止的，泥沙由于本身的重量，向下作沉降运动的速度规律，叫做“沉速规律”。

(2) 静止的泥沙，受了周围水流运动的影响，从静止的状态，转变为运动状态的临界流速的规律，叫做“开动流速规律”。

(3) 水是运动的，沙也是运动的；某一定型水流，对于某一定型泥沙，能够挟运多少的数量的规律，叫做“挟沙量规律”。

由于运动的形式，是从简单的，低级的，发展到复杂的，高级的；所以在高级形式的运动规律中，常包含着低级的规律；也就是在挟沙量规律中，包含着开动流速的规律，开动流速中又包含着沉速的规律。

这三个规律，是一般性的基本规律，不仅反映着泥沙和水的运动关系，并且适用于其他固体颗粒和液体的运动关系。

这三个规律，由于问题的提出和解决的过程，在一定的程度上，是各有各的独立性的，分作三个单篇报告，是比较适宜的。

这三篇报告，先后得到了唐念慈、梁治明、陈椿庭、徐志英、李昌华、柴挺生、孙庚昌、于大宇等，许多同志的热心帮助，南京水利实验处、西北水工试验所、西北农学院，领导上的关切和支持；使这一繁重、细致、需要极大耐心的计算工作，逐步完成，作者表示衷心地感谢。

作者志 1956年10月1日

(一) 物体的沉速

一、引言

物体在静止的流体中，沉降速度的规律性，为近代流体力学基本问题之一。本规律应用的范围，极为广泛；例如化学工业，航空、地质、气象等技术中，常须用这一规律，进行计算；对于解决水工技术中泥沙问题，关系更为密切。

目前技术上对于物体的沉速问题，在颗粒极微细部分，常用司篤克斯定律⁽¹⁾计算；颗粒较大部分，则用牛顿定律⁽²⁾计算；并无困难。惟对于中等颗粒，因介于两种定律之间，属转变阶段，因素复杂，分析不易；计算时仅能检查原始的实验曲线，试探推算，手续繁复；必须有正确简便的公式，提供生产上的直接应用。

本文首述沉速的基本概念和运动规律，继在一般变数之外，引入两个无因次的判数（沉速判数与粒径判数），定出介流区球体沉速的经验公式；然后据此导出非球体沉速规律的一般公式。最后，提

出有关泥沙沉速的计算方法。

二、球体的沉速

物体在静止的流体中，由于它本身的重量，向下沉降，或上浮，达到等速运动的时候，它的速度叫做“沉速” ω 。物体在流体中下沉时的作用力，就等于物体在流体内的有效重量 W 。即

$$W = V(\rho_s - \rho)g = V(\gamma_s - \gamma) \quad (1)$$

式中： V = 物体的容积(cm^3)

$$\rho_s = \text{物体的密度} \left(\frac{\text{gr} \cdot \text{s}^2}{\text{cm}^4} \right)$$

$$\rho = \text{流体的密度} \left(\frac{\text{gr} \cdot \text{s}^2}{\text{cm}^4} \right)$$

$$\gamma_s = \text{物体的自重} (\text{gr}/\text{cm}^3)$$

$$\gamma = \text{流体的自重} (\text{gr}/\text{cm}^3)$$

$$g = \text{重力加速度} (\text{cm}/\text{s}^2)$$

设物体为一球体，其粒径为 d (cm)，则有效重量 W

$$W = V(\gamma_s - \gamma) = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2} \right)^3 (\gamma_s - \gamma) \quad (2)$$

物体运动达最终速度时，则成等速运动，这时物体的有效重量，应与流体对物体所生的阻力 R 相等，而呈平衡状态，即

$$W = R \quad (3)$$

按牛顿定律，流体对颗粒较大的运动物体，所生的阻力 R ，如下式：

$$R = C_d \gamma F \frac{\omega^2}{2g} \quad (4)$$

式中： R = 阻力(gr)

C_d = 阻力系数

F = 物体垂直于运动方向的面积(cm^2)

ω = 物体的沉速(cm/s)

因球体的作用面积 $F = \frac{\pi}{4} d^2$ ，则

$$R = C_d \gamma \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \frac{\omega^2}{2g} \quad (5)$$

在等速运动时，作用力与阻力相等， $W = R$ ，则得阻力系数

$$C_d = \frac{4}{3} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) g \frac{d}{\omega^2} \quad (6)$$

球体沉速的阻力系数 C_d 经爱伦、李伯斯特、维斯堡等家⁽³⁾的详细试验，发现为雷诺判数 Re 的函数，即 $C_d = f(R_e)$ 。雷诺判数 $R_e = \frac{\omega d}{\nu}$ ， ν 为流体的动滞性率(cm^2/s)见第1图。

根据阻力系数 C_d 的变化情况，对于球体运动的基本性质，可以分作三个区域：

1. 滞流区：(图1 AB) 雷诺判数 R_e 的范围，应小于 2×10^{-1} ($R_e < 0.2$)，阻力主要由于液体对物体表面的粘滞力所产生。经实验证明，司篤克斯定律，可以完全适用。即：

$$\omega = \frac{g}{18} \frac{1}{\nu} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) d^2 \quad (7)$$

或

$$C_d = \frac{24}{R_e} \quad (8)$$

2. 紊流区：(图1 CD) 雷诺判数 R_e 约在 10^3 至 2.5×10^5 之间，阻力主要由于流体对物体的压力

所产生。阻力系数 C_d ，约为一常数 $C_d \approx 0.43$ 牛顿定律可以适用，即：

$$\omega = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{g}{C_d} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) d} \quad (9)$$

3. 介流区：(图 1 BC) 雷诺判数 Re 约在 0.2 至 10^3 之间，阻力的一部分，由于粘滞力；另一部分由于压力，是介于两种规律的过渡阶段，也就是从司篤克斯定律，转变到牛顿定律的过渡阶段。我们要用力学的解析法，定出理论方程式，是很困难的；一般只能根据实验资料，定出适当的经验公式。

三、介流区球体沉速的经验公式

根据各家实验资料 (图 1)，我们可以看出，介流区球体的阻力系数 C_d ，为雷诺判数 Re 的函数，即 $C_d = f(Re)$ 。并可用指数式表示：

$$C_d = \frac{A}{Re^m} \quad (10)$$

式中： $A = 24 \rightarrow 0.43 = f(Re)$

$m = 1 \rightarrow 0 = f(Re)$

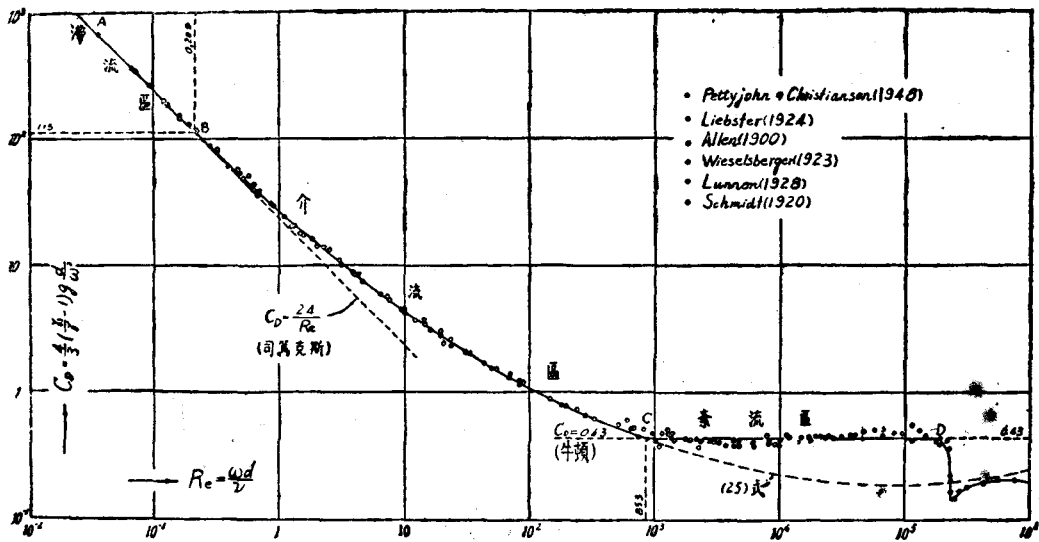


图 1.

1900年，爱伦⁽⁴⁾首先发表介流区球体的经验公式：

$$\omega = \left(\frac{4}{3} \frac{g}{a} \right)^{2/3} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)^{2/3} \frac{d}{\nu^{1/3}} \quad (11)$$

式中， a = 常数 ≈ 10

(11) 式，可化为

$$C_d = \frac{a}{Re^{1/2}} = \frac{10}{Re^{1/2}} \quad (12)$$

(12) 式与 (10) 式对比，则 $A = 10$ ， $m = 1/2$ 。

爱伦将指数式 (10) 中的 A 与 m ，作为常数，在运算上比较方便，但不能全面地符合实际情况，是其缺点。

1955年茲勒洛夫⁽⁵⁾發表沉速的一般公式:

$$\omega = \sqrt{\frac{n \pi d^{3-n} (\gamma_s - \gamma) g}{6 K_n \nu^{2-n} \gamma}} \quad (13)$$

式中: $n = f(R_0)$

$K_n = f(R_0)$

(13)式可化為

$$C_d = \frac{8}{\pi} \frac{K_n}{R_0^{2-n}} \quad (14)$$

(14)式与(10)对比, 則

$$A = \frac{8 K_n}{\pi} = f(R_0)$$

$$m = 2 - n = f(R_0)$$

在我們实际生產中, 对沉速規律的运用, 常須由已知物体的粒徑 d , 求出沉速 ω , 或由已知的沉速 ω , 求出粒徑 d , 而雷諾判数 $R_0 = f(\omega, d)$, 故 R_0 是一变量; 今 A 、 m (或 K 、 n) 又都是 R_0 的函数, 那末, A 同 m (或 K 同 n) 都是不定解。因此, 我們無法确定 A 与 m (或 K 与 n) 的数值, 也就是我們不能直接用(13)式, 求出 ω 或 d 來。

茲勒洛夫公式, 虽較爱倫公式, 正确些, 全面些, 但在实际运算上的困难, 仍未能解决。

要克服这个困难, 就必須改变已往 C_d 与 R_0 間函数表示的方法; 另行引入两个新的参变判数, 这两个新的判数, 一个只单独含有未知数粒徑 d , 另一个只单独含有未知数沉速 ω ; 同时, 为了要符合水力相似性的要求, 这两个新的判数, 又必須都是雷諾判数 R_0 的函数。这样, 我們再找出这两个新的判数間的函数关系, 运算上的困难, 才能从基本上獲得合理解决。

按阻力系数 $C_d = \frac{4}{3} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) g \frac{d}{\omega^2}$, 設于分子、分母, 各乘以 $\omega \nu$, 則

$$C_d = \frac{4}{3} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) g \frac{d}{\omega^2} \times \frac{\omega \nu}{\omega \nu} = \frac{4}{3} \frac{\frac{\omega d}{\nu}}{\left(\frac{g^{1/3} \nu^{1/3} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)^{1/3}}{\omega} \right)^3} \quad (15)$$

$$S_a = \frac{\omega}{g^{1/3} \nu^{1/3} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)^{1/3}} \quad (16)$$

代入(10)式, 則得阻力系数 C_d ,

$$C_d = \frac{4}{3} \frac{R_0}{S_a^3} \quad (17)$$

S_a 为一無因次的純数, 是一个新的判数, 其中只包含沉速 ω , 可以叫作“沉速判数”。或

$$S_a = \left(\frac{4}{3} \right)^{1/3} \left(\frac{R_0}{C_d} \right)^{1/3} \quad (18)$$

其次, 我們把雷諾判数 R_0 , 除以沉速判数 S_a , 使消去 ω , 即

$$\frac{R_0}{S_a} = \frac{\frac{\omega d}{\nu}}{\frac{g^{1/3} \nu^{1/3} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)^{1/3}}{\omega}} = \frac{g^{1/3} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)^{1/3}}{\nu^{2/3}} d \quad (19)$$

命

$$\Phi = \frac{g^{1/3} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)^{1/3} d}{\nu^{2/3}} \quad (20)$$

Φ 为另一个無因次的新的判数, 其中包含粒径 d , 可以叫作“粒径判数”。

$$\Phi = \frac{R_o}{S_a} \quad (21)$$

我們比較的研究了各家的实验資料, 其中以彼得約翰与克力斯太森⁽⁶⁾的資料, 对于实验的方法, 和精确的程度, 要求最高。因此, 我們就选用了彼得約翰与克力斯太森的实验資料, 把球体介流区的粒径判数 Φ , 与沉速判数 S_a 的关系, 繪于对数坐标紙上, 得圖 2。

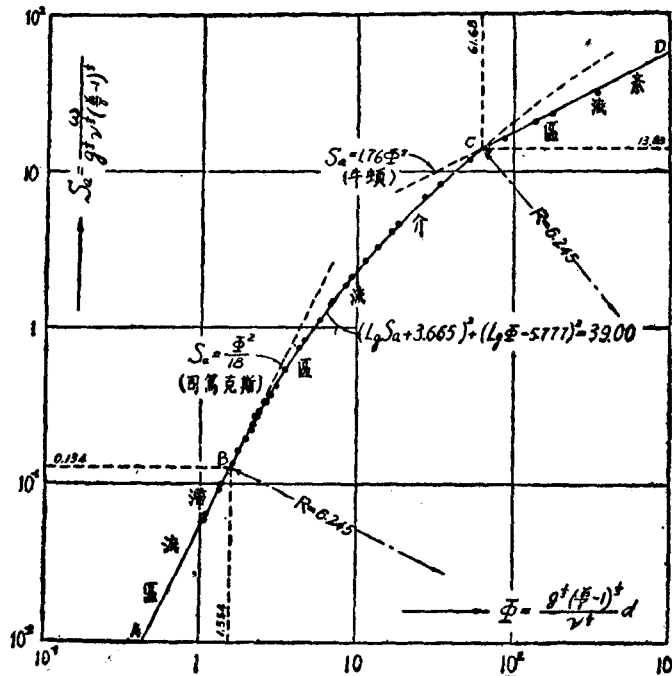


圖 2.

1. 圖 2 中 AB 段, 属于滯流区, 適用司篤克斯定律, 即

$$S_a = \frac{\Phi^2}{18} \quad (22)$$

2. 圖 2 中 CD 段, 属于紊流区, 適用牛頓定律, 即

$$S_a = \sqrt{\frac{4}{3C_d}} \Phi \quad (23)$$

因 $C_d \approx 0.43$, 則

$$S_a \approx 1.76 \sqrt{\Phi} \quad (24)$$

3. 圖 2 中 BC 段, 属于介流区, 我們發現这段曲綫適成一圓弧, 一端与司篤克斯定律相切于 B 点, 另一端与牛頓定律相交于 C 点。因在对数坐标紙上的圓方程式, 一般为

$$(\log S_a - a)^2 + (\log \Phi - b)^2 = R^2$$

式中, a, b = 常数

R = 半徑

我們用最小二乘法, 正确的决定了 a, b, R 值,

$$a = -3.66513$$

$$b = 5.77728$$

$$R = 6.24510$$

故得出介流区沉速公式如下:

$$(\log S_a + 3.66513)^2 + (\log \Phi - 5.77728)^2 = 6.24510^2 = 39.00127 \quad (25)$$

今以 $(\log S_a + 3.665)^2$ 作縱軸, $(\log \Phi - 5.777)^2$ 作橫軸, 各家实验点据, 都能密集于一直綫上, 这就足以验证本公式的完全正确性。見圖 3

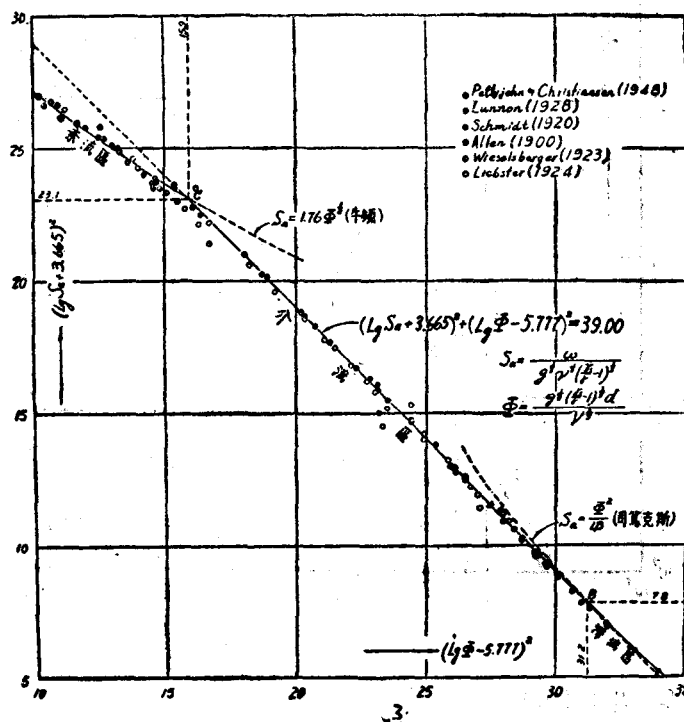


圖 3.

圓弧形經驗公式的优点, 可由已知的 Φ , 求出 S_a , 或倒由已知的 S_a , 求出 Φ 。运算上完全相同, 即

$$S_a = \text{anti log} [\sqrt{39.00 - (\log \Phi - 5.777)^2} - 3.665] \quad (26)$$

$$\Phi = \text{anti log} [\sqrt{39.00 - (\log S_a + 3.665)^2} + 5.777] \quad (27)$$

从第 (22) 式与第 (25) 式, 解得相切点 B , 从第 (23) 式与第 (25) 式解得相交点 C , 因此, 我們就可以正确的决定, 各区規律, 適用的范围, 如表 1

表 1

	滞 流 区	介 流 区	紊 流 区
S_a	<0.1342	$0.1342—13.83$	>13.83
Φ	<1.554	$1.554—61.68$	>61.68
R_0	<0.2085	$0.2085—853.0$	>853.0
C_d	>115.0	$115.0—0.43$	0.43

根据 (25) 式, 我们可以算出介流区球体粒径指数 Φ , 与沉速指数 S_a 的关系, 列为表 2

表 2

Φ	S_a	Φ	S_a	Φ	S_a	Φ	S_a
1.55	0.134	4.1	0.701	9.2	2.06	26.0	6.37
1.60	0.142	4.2	0.728	9.4	2.11	27.0	6.60
1.65	0.150	4.3	0.752	9.6	2.17	28.0	6.83
1.70	0.160	4.4	0.780	9.8	2.23	29.0	7.08
1.75	0.169	4.5	0.806	10.0	2.28	30.0	7.30
1.80	0.179	4.6	0.830	10.5	2.42	31.0	7.52
1.85	0.188	4.7	0.856	11.0	2.55	32.0	7.78
1.90	0.198	4.8	0.882	11.5	2.70	33.0	8.00
1.95	0.207	4.9	0.908	12.0	2.83	34.0	8.21
2.0	0.217	5.0	0.933	12.5	2.97	35.0	8.45
2.1	0.237	5.2	0.985	13.0	3.08	36.0	8.66
2.2	0.258	5.4	1.04	13.5	3.22	37.0	8.87
2.3	0.279	5.6	1.09	14.0	3.35	38.0	9.10
2.4	0.300	5.8	1.14	14.5	3.48	39.0	9.31
2.5	0.321	6.0	1.20	15.0	3.61	40.0	9.53
2.6	0.342	6.2	1.25	15.5	3.75	41.0	9.75
2.7	0.365	6.4	1.31	16.0	3.87	42.0	9.93
2.8	0.388	6.6	1.36	16.5	4.00	43.9	10.2
2.9	0.411	6.8	1.42	17.0	4.12	44.0	10.4
3.0	0.434	7.0	1.47	17.5	4.25	45.0	10.6
3.1	0.457	7.2	1.53	18.0	4.39	46.0	10.8
3.2	0.480	7.4	1.58	18.5	4.50	47.0	11.0
3.3	0.506	7.6	1.63	19.0	4.65	48.0	11.2
3.4	0.530	7.8	1.68	19.5	4.77	49.0	11.4
3.5	0.556	8.0	1.74	20.0	4.89	50.0	11.6
3.6	0.578	8.2	1.80	21.0	5.16	52.0	12.0
3.7	0.604	8.4	1.85	22.0	5.40	54.0	12.4
3.8	0.628	8.6	1.90	23.0	5.65	56.0	12.8
3.9	0.652	8.8	1.95	24.0	5.90	58.0	13.2
4.0	0.675	9.0	2.01	25.0	6.12	61.7	13.8

四、非球体沉速公式

自然界物质的结晶, 以及人造的各种制成品, 有的呈一定有规则的形态, 有的是没有规则的, 都

可以叫作“非球体”。非球体沒有一定的直径，普通可用与該物体同容積 V 的球体的直径表示之，叫作“等容粒径”或“平均直径”。即 $d = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}$ 。式中 V = 物体的容積。非球体顆粒的形态，变化复雜，我們可以用“球度系数” ψ 來表示它接近球形的程度，球度系数 ψ

$$\psi = \frac{F_0}{F} \quad (28)$$

式中： F_0 = 与物体同容積球体的表面積

F = 物体的表面積

設某非球体的粒径判数 Φ 与球体的粒径判数 Φ_0 相等，即 $\Phi = \Phi_0$ ，則該非球体的沉速判数 S_a ，与該球体的沉速判数 S_{a0} 的比率，可以叫作“沉速比率” K ，

$$K = \frac{S_a}{S_{a0}} \quad (29)$$

对于各种不同形态物体的沉速比率 K ，可經有系統的實驗測定之。

現在我們再利用彼得約翰与克力斯太森⁽⁶⁾ 对于等軸对称体的實驗資料，求出沉速比率 K 与粒径判数 Φ 的关系，如圖 4，我們可以看出各类型物体，在各流区内沉速比率 K 的变化特点。

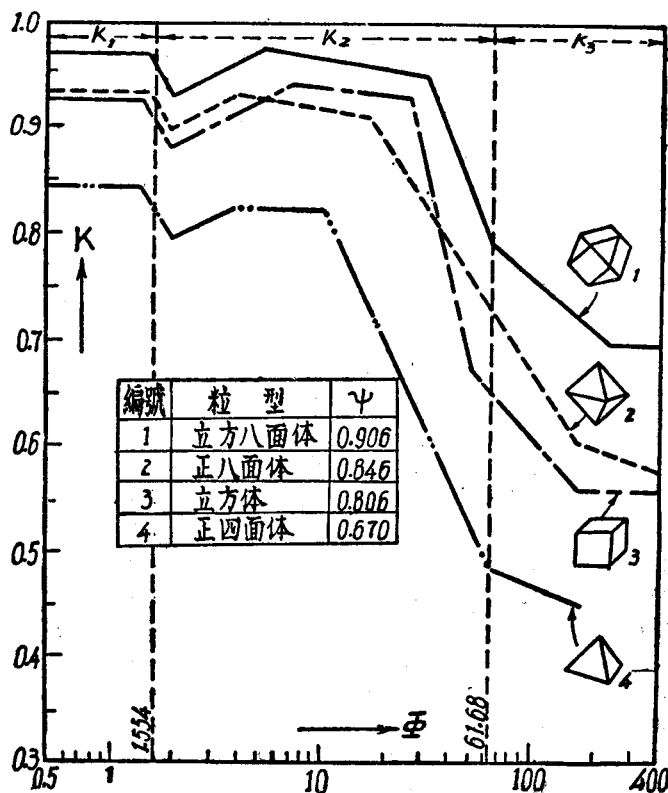


圖 4.

1. 滯流区的沉速比率 K_1 ，对于某一定型物体为一常数，与球度系数 ψ 有一定的关系，見圖 5。司篤克斯定律可以修正为，

$$S_a = \frac{K_1}{18} \Phi^2 \quad (30)$$

圖5中, 不等軸对称体是利用馬克農的實驗資料⁽⁷⁾; 可見同一球度系数, 不等軸对称体的沉速比率 K_1 , 較对称者略小。

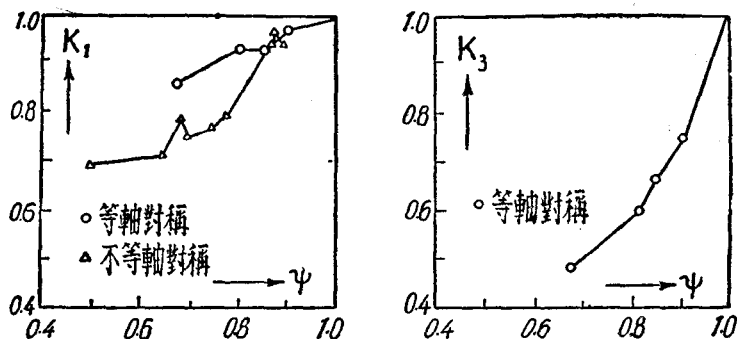


圖 5

2. 介流区的沉速比率 K_2 , 对于某一定型物体非一常数; 随着粒徑判数 Φ 的增加而减小。計算时必须根据粒徑判数 Φ , 在实验曲綫上选定相应的沉速比率 K_2 。介流区經驗公式可修正如下:

$$\left(\log \frac{S_a}{K_2} + 3.665 \right)^2 + (\log \Phi - 5.777)^2 = 39.00 \quad (31)$$

3. 紊流区的沉速比率 K_3 , 对于某一定型物体約为一常数, 牛頓定律可以修正为:

$$S_a \approx 1.76 K_3 \sqrt{\Phi} \quad (32)$$

五、泥沙沉速公式

泥沙顆粒的形狀, 極不規則, 且非对称体。大概顆粒大的比較接近球形, 小的多角, 愈細愈不規則, 一般可以分作三个类型, 見圖6。

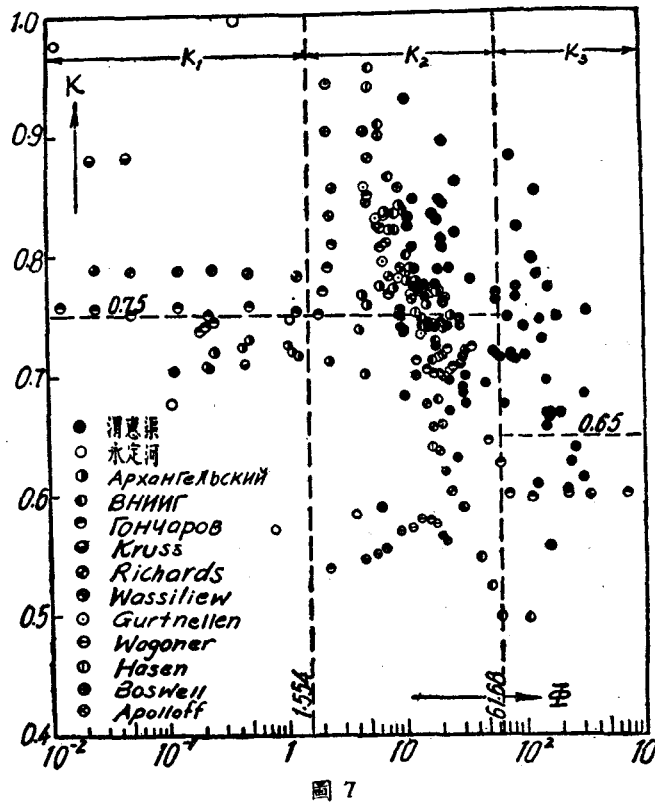


圖 6.

1. 圓角形: 主要是礫类, 粒徑大于2.0 (mm) 运动規律屬紊流区。
2. 尖角形: 主要是沙类, 粒徑約在0.1至2.0 (mm) 之間, 屬介流区。
3. 雜角形: 主要是泥类, 粒徑小于0.1 (mm), 屬滯流区。

可見自然界泥沙的球度系数 ψ , 有随着粒徑 d 的增大, 而逐漸增加的趋势。因此, 各流区的沉速比率 K , 相差不大。我們利用渭惠渠⁽⁸⁾、永定河⁽⁹⁾的实测資料, 阿尔杭格爾斯基⁽¹⁰⁾、列寧格勒全苏水工技術研究院技術规范⁽¹¹⁾、岡查洛夫⁽¹²⁾的統計資料; 以及瓦西里夫所收集的各家資料⁽¹³⁾; 求出各个数据的沉速比率 K , 与粒徑系数 Φ 的关系, 繪于第7圖上; 我們可以看出, 各流区的沉速比率的平均值, $K_1 \approx K_2 \approx 0.75$, $K_3 \approx 0.65$ 。这样, 我們就可以利用这些数值, 在缺乏实测資

料时, 估计自然泥沙粒径与沉速的关系, 是比较能符合实际的。



一般自然泥沙的 $\gamma_s = 2.65$ (gr/cm³), 水的 $\gamma = 1.0$ (gr/cm³), 重力加速度 $g = 980$ (cm/s²)。我们选定沉速比率 $K_1 = K_2 = 0.75$, 代入 (30)、(31) 式; $K_3 = 0.65$ 代入 (32) 式, 就可以导出三个实用公式, 如下:

1. 滞流区 ($\Phi < 1.55$) $d = 0.0001 \sim 0.01$ (cm)

$$\omega = 67.4 \frac{d^2}{\nu} \quad (33)$$

式中: ω = 沉速 (cm/s)

d = 粒径 (cm)

ν = 水的动滞性率 (cm²/s)

温度 $t = 0^\circ\text{C}$ $\nu = 0.0178$ (cm²/s)

10°C 0.0131

20°C 0.0101

30°C 0.0081

40°C 0.0066

2. 介流区 ($\Phi = 1.55 \sim 61.7$) $d = 0.01 \sim 0.2$ (cm)

$$\left(\log \frac{\omega}{\nu^{1/3}} + 2.720 \right)^2 + \left(\log \frac{d}{\nu^{2/3}} - 4.705 \right)^2 = 39 \quad (34)$$

3. 紊流区 ($\Phi > 61.7$)

$$d = 0.2 \text{ (cm)}$$

$$\omega = 45.8\sqrt{d}$$

(35)

根据上列公式,即可作出泥沙粒径与沉速的关系表(见表3)或绘成曲线(见图8),可供生产上直接应用。

表 3

泥沙粒径与沉速关系表

流区	粒径 d (mm)	沉 速 ω (mm/s)				
		$t=0^{\circ}\text{C}$	$t=10^{\circ}\text{C}$	$t=20^{\circ}\text{C}$	$t=30^{\circ}\text{C}$	$t=40^{\circ}\text{C}$
滞流区	0.001	0.000377	0.000515	0.000667	0.000838	0.00102
	0.002	0.00151	0.00206	0.00257	0.00335	0.0041
	0.005	0.00942	0.0129	0.0167	0.0210	0.0256
	0.01	0.0377	0.0514	0.0667	0.0838	0.102
	0.02	0.151	0.206	0.267	0.335	0.409
	0.05	0.942	1.29	1.67	2.10	2.56
介流区	0.1	3.70	4.97	6.12	7.35	8.55
	0.15	7.69	9.90	11.8	13.7	15.5
	0.2	12.3	15.3	17.9	20.5	23.0
	0.25	17.2	21.0	24.4	27.5	30.2
	0.3	22.3	26.7	30.8	34.4	37.6
	0.35	27.4	32.8	37.1	41.4	45.5
	0.4	32.9	38.7	43.4	48.6	52.7
	0.5	43.3	50.6	56.7	61.9	67.1
	0.6	54.3	62.6	69.2	75.0	81.0
	0.7	65.2	74.2	81.2	88.5	95.2
	0.8	75.0	85.5	93.7	102	108
	0.9	85.5	96.0	106	114	121
	1.0	95.2	107	117	125	133
	1.5	143	160	172	177	177
	2.0	190	205	205	205	205
紊流区	$d(\text{mm})$	$\omega(\text{mm/s})$	$d(\text{mm})$	$\omega(\text{mm/s})$	$d(\text{mm})$	$\omega(\text{mm/s})$
	2.5	229	7.0	383	25.0	725
	3.0	251	8.0	409	30.0	794
	3.5	271	9.0	435	35.0	856
	4.0	290	10.0	458	40.0	916
	5.0	324	15.0	561	50.0	1025
	6.0	355	20.0	648	60.0	1121

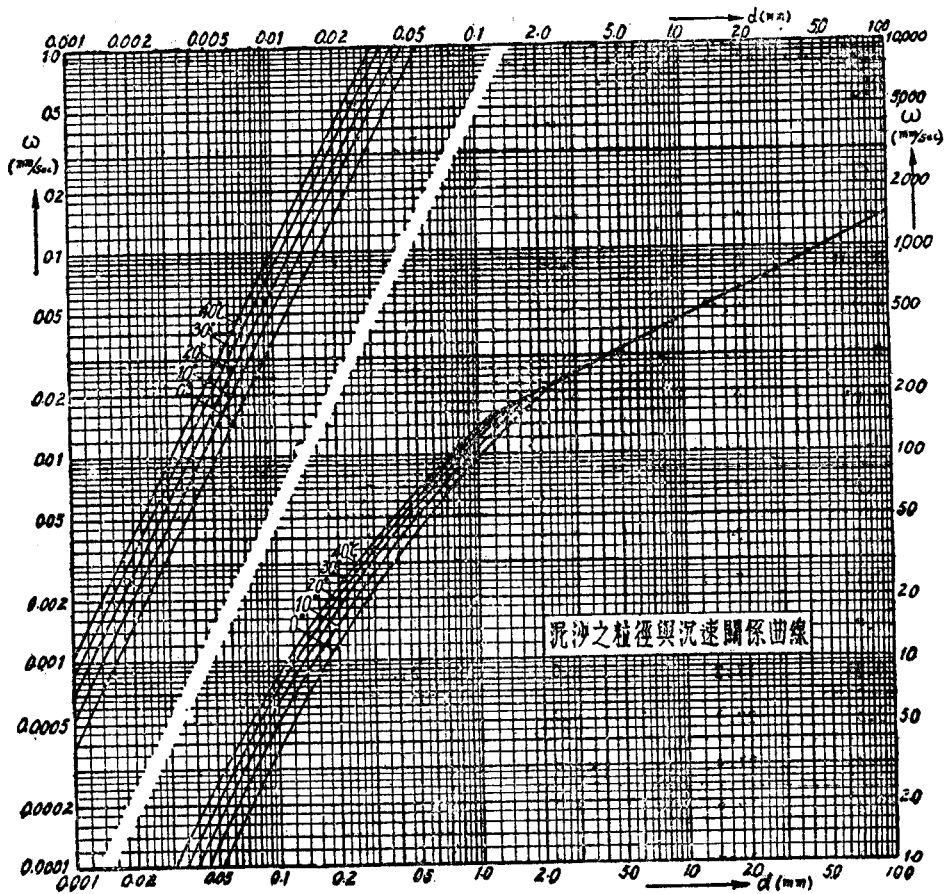


圖 8

六、結 語

球體在靜止的流体中，运动的規律，由于物体所受阻力性質的不同，可以分为三个区域，

1. 滯流区：屬於司篤克斯定律。

2. 介流区：屬於作者介流区公式：

$$(\log S_a + 3.665)^2 + (\log \Phi - 5.777)^2 = 39.00$$

式中

$$S_a = \frac{\omega}{g^{1/3} \nu^{1/3} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)^{1/3}}$$

$$\Phi = \frac{g^{1/3} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)^{1/3} d}{\nu^{2/3}}$$

3. 紊流区：屬於牛頓定律。

各区規律，適用的範圍見表 1。

非球体的运动規律，可以把球体的規律作为基礎，用沉速比率 K 加以修正。各种类型物体的沉速比率 K ，可由实验方法测定之。

各规律区域的界限, 对于某一定型的物体, 可根据该物体粒径判数 Φ (或沉速判数 S_a) 的数值判別之。

对于中等颗粒, 实测其粒径 d 与沉速 ω , 技术上是沒有困难的, 但是对于極微細的颗粒, 測定粒径 (如用顯微鏡观察) 手續繁雜费时, 一般可改測其沉速 ω , 根据颗粒的形状, 定出颗粒的球度系数 ψ , 并估計适当的沉速比率 K_1 , 用作者修正的司篤克斯公式, 間接推算粒径 d 。反之, 对于較大的粒径 d , 实测沉速困难, 則必須視其粒径 d , 定出粒径判数 Φ , 判別所屬流区, 再由球度系数 ψ , 估計沉速比率 K_2 或 K_3 , 用第 (31) 式或第 (32) 式, 計算沉速 ω 。

我國現行土壤颗粒粒径分析方法, 常用比重計沉降法測定沉速 ω , 即直接代入司篤克斯公式, 推算粒径 d 。这种方法, 是極不合理的, 因为它所定出的粒径, 不过只是与該物体颗粒, 產生同等沉速的球体的粒径。 (又称相当直径), 是一种虚拟的直径, 并没有几何量的实际意义, 这种粒径一般都是比較实际的平均直径偏小, 造成了沉降法分析的结果, 不能与篩析法分析结果 (平均直径), 互相銜接的嚴重困难。作者建議: 今后用沉降法分析土壤的颗粒, 对于司篤克斯公式的应用, 必須根据土壤的形态, 选择适当的沉速比率 K_1 , 改用作者滯流区修正公式 $S_a = \frac{K_1}{18} \Phi^2$ 進行計算。即

$$d = \sqrt{\frac{18}{K_1} \frac{\nu}{g \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)}} \omega \quad (36)$$

使整个粒径分析结果, 獲得一致。

修正的司篤克斯定律, 以粒径判数 $\Phi < 1.55$, 沉速判数 $S_a < 0.13 K_1$ ($R_e < 0.2 K_1$) 为限, 設超过此数, $62.8 > \Phi > 1.55$, 即应改用第 (27) 式計算。

对于一般自然泥沙, 在無实际資料时, 沉速比率 K , 可选用 $K_1 = K_2 = 0.75$, $K_3 = 0.65$; 分用 (33)、(34)、(35) 式估計之。

参 考 文 献

- [1] Stokes, G. G., Cambridge Trans., Vol. 9, Collected papers, Vol. III (1850)
- [2] Newton, I., Philosophia naturalis principia mathematica, London (1726)
- [3] Schiller, L., Fallversuche mit Kugeln und Scheiben, Handbuch der Experimentalphysik, Vol. IV-2, Akademische Verlagsgesellschaft, m. b. H., Leipzig. (1932)
- [4] Allen, H. S., The Motion of a sphere in a viscous fluid. Phil. Mag. (5) 50 (1900)
- [5] ЗРЕЛОВ Н. П., Обобщенная формула скорости осаждения частиц в спокойной жидкости, Труды гидравлической лаборатории (1955)
- [6] Pettyjohn, E. S., & Christiansen, E. B., Effect of particales shape on free-settling rates of Isometric particles. Chemical Engineering Progress. Feb. (1948)
- [7] McNown, J. S. & Malaika, J., Effects of particle shape on settling velocity at Low Reynolds Numbers. Trans. American Geophysical Union Vol. 31, No. 1 (1950)
- [8] 戴英本西北農學院畢業論文資料 (1941)
- [9] 永定河治本計劃 (1933)
- [10] E.A.薩馬林著“水工結構設計”莫斯科水利工程学院中國研究生合譯 179 頁 (1953)
- [11] 同[10]
- [12] В. Н. Гончаров, Основы динамики русловых потоков (1954)
- [13] Wassiliew, Charakteristik der Sinkgeschwindigkeit von Flussablagerungen. Wasserkraft und Wasserwirtschaft. 22. (1935)

(二) 开动流速

一、引 言

明渠渠床上靜止的泥沙, 受水流运动的影响, 从靜止的状态, 开始轉变为运动的状态, 可以叫做“开动”。在开动期間的臨界流速条件, 和它的規律性, 不僅理論上起着决定性的作用; 就是在实际生產中, 对于如何判別, 河渠泥沙冲積的可能性, 更具有非常重要的意义。

1786 年, 法人杜步華⁽¹⁾, 首先用实验方法, 观测泥沙运动, 和流速的关系。从此以后, 各國学者, 相繼地做了許多有价值的实验; 其中著名的有美人吉尔勃脫⁽²⁾, 奧人薩非納克⁽³⁾。

苏联学者, 費里堪諾夫⁽⁴⁾、岡查洛夫⁽⁵⁾、列維⁽⁶⁾等, 对于理論方面, 作出了貢獻; 并且結合实际, 得出了公式, 在生產上起着巨大作用。

我國水利学者, 何之泰⁽⁷⁾、李賦都⁽⁸⁾、刘德潤⁽⁹⁾、張有齡⁽¹⁰⁾、俞世煜⁽¹¹⁾、姜國干⁽¹²⁾等, 先后做了許多卓越的实验, 使我們对于这一問題的本質, 得到更深刻的認識。

由于各國学者的不断研究, 累積了許多实验資料和实測資料; 因此, 我們就有这个条件, 來全面地, 从基本上解决这一問題, 找出問題的基本規律性。

本文首述泥沙开动时期的一般概念, 和影响泥沙性型的因素; 再利用了各家实验資料和实測資料, 得出一个全面的泥沙开动流速基本規律, 和实用計算公式。最后并申述了泥沙揚动流速的基本規律。

二、作用流速与平均流速的联系

渠床上泥沙, 受流水的作用, 直接作用于沙粒上的流速, 叫做“作用流速” u ; 作用流速是脉动的, 这流速对靜止的沙粒, 造成一种不連續的粘滯、冲压、頂托、吸引、扭轉等, 極复雜的作用力。这种作用力, 随着作用流速的增大, 而逐漸加强, 达到了某一定程度, 使沙粒由擺动, 抖动而离开原来位置, 向前运动, 这个臨界的作用流速, 叫做“开动作用流速” u_k 。因此, 我們可以这样作出假說: 对于某一定型泥沙 (包括粒徑大小, 形状, 組合等) 的开动作用流速 u_k 应为一定值。

由于作用流速 u 的位置, 緊切边界, 实測困难, 我們只能測定最接近于作用流速的水流底速 V_b , 來验证这一假說。1922 年薩非納克⁽³⁾, 1934 年何之泰⁽⁷⁾, 作了实验, 証明了这一假說。对于某一定型泥沙的开动底速 V_{bk} , 为一定值。間接地証明了, 开动作用流速 u_k , 亦为一定值。

在实际生產中, 对于开动流速規律的要求, 要能解决两个問題: (1) 已知了明渠的平均流速, 問渠床上某一定型泥沙, 是否运动, 或靜止; 或对于这种流速, 應該选用那种沙粒, 才能保持靜止或运动。(2) 已知了渠床的定型泥沙, 問應該选用那种平均流速, 才能使泥沙运动, 或保持靜止。因此, 我們必須把决定泥沙运动的作用流速 u , 与明渠的平均流速 V , 互相联系起來, 只有这样, 才能把实验室中的許多成果, 应用到实际生產中去。

首先, 我們可以假定作用流速 u 的位置, 緊切于明渠的床面, 而与該点的动力流速 V_* , 成比例 (注 1), 即

$$u = \alpha V_* = \alpha \sqrt{g R J} \quad (1)$$

式中, u ——作用流速 (m/s)

R ——水力半徑 (m)

J ——比降

g ——重力加速率 (m/s²)

(注 1)——动力流速的物理意义: 就是假定床面沒有摩擦力时, 床面上应有的流速。

$$V_* = \sqrt{g R J}$$

α ——系数

V_* ——动力流速 (m/s)

(1) 式中系数 α , 随床面的摩擦阻力而定; 对于某一定型泥沙, 为一定值。因此, 开动作用流速 u_k , 可用下式表示:

$$u_k = \alpha V_{*k} = \alpha \sqrt{g R_k J_k} \quad (2)$$

或

$$\sqrt{R_k J_k} = \frac{u_k}{\alpha \sqrt{g}} \quad (3)$$

这就是说, 对于某一定型泥沙, 在开动时, $\sqrt{R_k J_k}$ 为一定值。

按明渠的平均流速 V (m/s), 如下:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{1}{n} R^y \sqrt{R J} \quad (4)$$

式中: Q ——流量 (m³/s)

A ——断面积 (m²)

n ——糙率

y ——指数

设将此渠道的 RJ , 逐渐加大, 使 RJ 达到了 $R_k J_k$, 即 $RJ = R_k J_k$, 渠床上的泥沙, 即将开始运动, 这时候渠道的平均流速, 叫做“开动流速” V_k

$$V_k = \frac{1}{n} R^y \sqrt{R_k J_k} \quad (5)$$

将(3)式代入(5)式, 则得

$$V_k = \frac{u_k}{n \alpha \sqrt{g}} R^y \quad (6)$$

假如我们把当明渠水力半径等于 1 (m) ($R = 1$ m) 时的开动流速, 叫做“开动比速” V_{k1} , 则开动比速

$$V_{k1} = \frac{u_k}{n \alpha \sqrt{g}} R_1^y \quad (7)$$

式中: R_1 ——单位水力半径 = 1 (m)

将(6)式与(7)式相比, 则

$$\frac{V_k}{V_{k1}} = \frac{\frac{u_k}{n \alpha \sqrt{g}} R^y}{\frac{u_k}{n \alpha \sqrt{g}} R_1^y} = \left(\frac{R}{R_1} \right)^y \quad (8)$$

对于某一定型泥沙、 α 、 n 、 u_k 均为定值, 故得

$$V_k = V_{k1} \left(\frac{R}{R_1} \right)^y \quad (9)$$

式中: 指数 $y = \frac{1}{6} \sim \frac{1}{4}$, 平均 $y = \frac{1}{5} = 0.2$, 一般在没有实测资料时, y 可取平均值 0.2, 作估计之用。

即

$$V_k = V_{k1} \left(\frac{R}{R_1} \right)^{0.2} \quad (10)$$

上式开动比速 V_{k1} , 是水力半径 $R = R_1 = 1$ m 时的开动流速, 对于某一定型泥沙, 为一定值。开动流速 V_k 与 $R^{0.2}$ 成正比, 这个关系的正确性, 必须利用实验资料, 予以证明。我们广泛地收集了各