

## 沿岸输沙率的计算

赵子丹

(天津大学)

近岸区的泥沙,受到波浪运动的掀动作用及沿岸流的输送作用,造成泥沙的纵向运动。衡量泥沙纵向运动强度的量度是沿岸输沙率,通常所说的沿岸输沙率是指在单位时间内通过某垂直于岸线的整个横断面的总的泥沙量(包括悬沙部分和底沙部分),其中时间单位为秒、小时、日、月或年,而泥沙的数量,可用重量或浮重表示,亦可用体积表示。

估计沿岸输沙率的方法,最早是由分析风速资料出发的,由于波浪的尺度和风速、吹程、风的延时之间的关系非常复杂,而直接影响沿岸输沙率的动力因素则是波浪,因此,按上述途径找得的关系式,具有极大的地区局限性。多年来确定沿岸输沙率的计算公式的另一途径是直接由波能流出发,找出沿岸波能流的数量与沿岸输沙率的经验关系,即:

(1) 当泥沙量以浮重计量时

$$I_e = K_w P_{es} \quad (1)$$

(2) 当泥沙量以体积计量时

$$S_e = K_v P_{es} \quad (2)$$

式中的 $I_e$ 、 $K_w$ 为泥沙量以浮重计量时的沿岸输沙率及相应的经验系数, $S_e$ 和 $K_v$ 为泥沙量以体积计量时的沿岸输沙率及相应的经验系数。系数 $K_w$ 和 $K_v$ 由实测资料定出, $I_e$ 与 $S_e$ 之间存在着下述的关系

$$I_e = (P_s - P) g a' S_e \quad (3)$$

式中的 $P_s$ 和 $P$ 分别为泥沙及水的密度, $g$ 为重力加速度, $a'$ 为沙的空隙率(通常约为0.6)。

因为在公式(1)中的 $I_e$ 和 $P_{es}$ 具有相同的量纲,故系数 $K_w$ 为无量纲的量,数值 $K_w$ 不会随着 $I_e$ 及 $P_{es}$ 所取单位的变化而变化。公式(1)结构的合理性,可由Bagnold, R. A(1963)的输沙模型得到直接的证明,所以

Komar, P. D. (1970)等主张采用这种写法。但在工程实践中多采用公式(2)的写法,这是因为 $S_e$ 和 $P_{es}$ 具有不同的量纲,故系数 $K_v$ 是有量纲的;而 $K_v$ 的具体数值,将随 $S_e$ 和 $P_{es}$ 所用单位的变化而变化。

### 一、能流因子 $P_{es}$

能流因子 $P_{es}$ 的物理涵义,为在沿岸方向取单位间距(例如1米沿线)的二个波浪矩形边之间能流的沿岸分量。因为 $P_{es}$ 为单位距离、单位时间的能量,故称为沿岸能流。在能量法背后的基本假设是:沿岸输沙率( $I_e$ 或 $S_e$ )取决于在击岸区的外端(即波浪破碎处)所算得的 $P_{es}$ ,按照Das, M. M. (1972)的写法

$$P_{es} = \frac{E_0}{2} N K_R^2 \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad (4)$$

式中的 $N$ 为在单位时间里的波数, $K_R$ 为波浪的折射系数, $\alpha_b$ 为波浪的破碎角, $E_0$ 为:

$$E_0 = \frac{1}{8} r H_0^2 L_0 \quad (5)$$

$r$ 为海水的单位容重, $H_0$ 和 $L_0$ 为深水波的波高和波长。

以上是针对规则波的情况而分析的,现场的波浪为不规则波。考虑到波浪的能量与波高的二次方成正比,因此,根据能量相等的原理可知,在计算沿岸输沙率时,应采用均方根波高。

### 二、对以往确定 $K_v$ 值方法的看法

大部分文献中所推荐的系数 $K_v$ 是这样确定的:一方面,根据特定的波浪条件,算出相应的 $P_{es}$ 值;另一方面,记下在上述特定条件下的 $S_e$ 值,再根据公式(2)反求出 $K_v$ 值。因此,每一组数据,就有一个 $P_{es}$ 值、一个 $S_e$

值和一个  $K_v$  值。根据所求得的一系列的  $K_v$  值, 进行统计平均, 并取其平均值作为统一使用的数值。或者, 采用双对数坐标作图, 以水平坐标表示  $P_{es}$  值, 以垂直坐标表示  $S_e$  值; 这样每一组数据就定出一个点子, 最后, 作出一条直线, 其斜率即  $K_v$  值(分析者按这种方法作线时, 有的并没有考虑前述的统计平均, 而带有主观的倾向性看法在进行作线)。可以认为, 不同学者建议的公式的差别, 主要在其选取的  $K_v$  的数值的不同。造成  $K_v$  值不同的一个主要原因, 是数据点的选择的不同。例如美国早年通用的 TR4-1966 公式, 用 9 个现场数据、150 个实验室数据定线, 得出统一的  $K_v$  值。因为根据各组实验室数据反求得的相应  $K_v$  值, 普遍地小于由现场资料求得的  $K_v$  值, 故根据上述 159 个数据求得的平均化了的  $K_v$  值就比较小。近年来的资料, 例如 SPM-1973 公式, 则采用 23 个现场数据定线, 不用实验室数据, 从而提高了  $K_v$  值。由于模型沙问题尚未完满解决, 在实验室里复演的情况, 往往不太符合实际, 因此, SPM-1973 公式在定线时排除实验室数据的做法是正确的。详细分析任何一位作者所提供的  $P_{es}$  与  $S_e$  的关系图都能看出, 图上所绘的数据点与所定线之间的偏离程度是惊人的。看来这有二个原因: 一是现场数据的不稳定性, 这只能采用数理统计的办法, 用数理统计上的最当值来代替随机值, 从而达到排除随机偏差的目的。二是可能还有比较重要的内在规律性未被考虑, 从而造成表现上的混乱。就后一因素而论, 有理由怀疑  $K_v$  值为常数的假定之是否正确。波能法的沿岸输沙模型, 已由 Bagnold, R. A. 的输沙机理从理论上得到证明, 它并不认为数值  $K_v$  在任何条件下均为常数。根据河流中的泥沙的输送 (Bagnold, R. A., 1966) 可以看出, 仅仅在输沙条件充分发展时 (在河流供给水流下, 大片泥沙发生运动), 以浮重计算的输沙率, 才正比于具有一个比例因子的流水的有效功; 在较低的速度水流区域, 输沙条件并不充分, 沙质底床成沙纹, 输送泥沙的有效功较小, 此时其比例性

系数较小, 不再为常数。在对岸滩泥沙的输送的研究中, 亦可望出现类似的情况。因此, 在确定沿岸输沙率的  $K_v$  值时, 需要把输沙率和波浪条件联系起来。

在对波浪条件的分析中, 应区分波浪在浅滩上破碎的类型。目前看来, 根据波高、周期和岸滩坡度的不同, 有崩波、卷波、塌波、滚波四种破碎波型, 它们之间的运动学、动力学特征是不同的。在一个海湾内, 在岸滩坡度和波浪周期保持不变的情况下, 由于沿岸各点的荫蔽程度及波高不同, 可产生不同的破碎形态。但已有的沿岸输沙资料对波浪条件都没有这样细致的区分, 故从分析已有的资料入手来建立沿岸输沙率的计算公式时, 是无法具体地考虑波浪的破碎形态的。因此, 把波浪条件 (这里指的是波浪的强弱, 即  $P_{es}$  的数值的大小, 或指波浪的陡度等) 与泥沙的力学特征联系起来, 去分析  $K_v$  值的变化规律, 是目前可行的办法。例如, 法国的夏都实验室在确定系数  $K_v$  时, 就考虑了泥沙粒径及深水波波陡的影响; 我国海港水文规范所推荐的公式, 也引用了这一成果。应该认为, 在确定  $K_v$  值时, 把波浪的条件和泥沙的力学特征联系起来的想法是可取的; 但在模型沙问题尚未完满解决的情况下, 就把实验室的成果引入现场条件的计算中的这种处理则是缺乏依据的。因为, 计算结果业已表明, 由实验室资料求得的  $K_v$  值, 普遍低于由现场资料求得的  $K_v$  值。分析夏都实验室的公式还可发现, 只要现场和实验室的深水波波陡及泥沙粒径相同, 则现场的  $K_v$  值便和实验室的  $K_v$  值相等, 但这一结论却为实践所否定。因此, 笔者认为, 在目前条件下分析  $K_v$  值的变化规律时, 只能用现场数据, 不用实验室数据。

### 三、对 $K_v$ 值的变化规律的探讨

Das, M. M. (1972) 曾收集了大量的沿岸输沙率的资料, 绘在该文的图 6 中。我们把这些资料汇总成本文表 1。

按 Das, M. M. 在文中所用的资料分析

表 1

编号	资料类型	作者	数据个数	$P_s$	$D$ (毫米)
1	现场数据	Watts (1953)	4	2.70	0.40(平均)
2	现场数据	Caidwell (1956)	6	2.65	0.40(平均)
3	现场数据	Moore and Caie (1960)	1	2.65	1.00
4	现场数据	Komar (1969)	10	2.65	0.60
5	现场数据	Komar (1969)	4	2.65	0.175
6	现场数据	Thornton (1969)	14	2.65	0.20
7	现场数据	Johnson, Santa Barbaro (1952)	5	2.65	0.20
8	实验室数据	Krumbein (1944)	15	2.65	0.50
9	实验室数据	Saville (1950)	9	2.69	0.30
10	实验室数据	Shay and Johnson (1951)	94	2.69	0.30
11	实验室数据	Sauvage and Vincent (1954)	6	1.10	1.00
12	实验室数据	Sauvage and Vincent (1954)	8	1.40	1.50
13	实验室数据	Sauvage and Vincent (1954)	2	2.60	0.50
14	实验室数据	Sauvage and Fairchild (1970)	29	2.65	0.22
15	实验室数据	Price and Tomlinson (1969)	2	1.35	0.80

方法,  $P_{es}$  值是由公式 (4) 及 (5) 来计算的, 采用的单位为“英尺-磅/日/每英尺岸线”,  $S_e$  的单位为“立方码/日”。为此, 我们先把  $P_{es}$  及  $S_e$  的数值, 换算到以米制单位表示相应的数值 ( $P_{es}$  以“米-公斤/日/每米岸线”计,  $S_e$  以“立方米/日”计), 然后把每一组已转化为米制单位的数据, 根据

$$K_v = S_e / P_{es} \quad (6)$$

求得一个相应的  $K_v$  值。

我们认为,  $K_v$  值的变化规律, 是与波浪条件及泥沙条件密切相关的, 并以此值  $\eta$  来综合表示波浪条件及泥沙条件, 取

$$\eta = P_{es} / G' \quad (7)$$

式中  $P_{es}$  的单位为米-公斤/日/每米岸线。  $G'$  为颗粒在水中的浮重 (以公斤计), 显然

$$G' = (r - r_1) \frac{\pi}{6} D^3 \quad (8)$$

$r$  和  $r_1$  分别为颗粒及水体的单位容重。

我们把 Das, M. M. (1972) 一文所给的 209 组数据, 按上述方法算出各自的  $\eta$  值和  $K_v$  值, 结果表明:

1. 就现场数据的分析计算结果而言, 参数  $\eta$  与数值  $K_v$  之间似乎存在着某种经验关系。

但有以下的例外: (1) 由 Moore and Caie (1960) 的现场数据求得  $K_v = 1.13 \times 10^{-4}$ , 显著偏小 (它只有一组数据); (2) 由 Thornton (1969) 的现场数据求得的  $K_v$  值更小 (因为 Thornton 测定的沿岸输沙率只包括底沙部分, 故在我们的分析中, 这一部分的数据不能采用); (3) 由 Johnson, Santa Barbaro (1952) 的现场数据求得的  $K_v$  值则显著偏大 (因为它没有考虑到  $\sin \alpha_b \cos \alpha_b < 1$ , 故在我们的分析中, 这一部分资料也予略去)。因此, 在作图时, 就略去上述三部分资料, 仅采用表 1 的第 1、2、4、5、四栏的现场资料 (这和 SPM-1973 公式所取组合是一样的, 其差别仅仅在于: SPM-1973 公式在定线时所取的 Caldwell (1956) 的数据是 5 个; 按照 Das, M. M. (1972) 资料, Caldwell (1956) 的数据是 6 个。), 其计算结果见表 2。

根据上述结果, 得以绘出  $\eta - K_v$  的关系曲线, 如图所示。考虑到表 2 第 9 行  $K_v = 1.62 \times 10^{-4}$  这一数值比该表的其它  $K_v$  值显著为小, 鉴于 SPM-1973 公式在定线时对于 Caldwell (1956) 的数据只取 5 个 (而本文的表 2 中共有 6 个) 以及 SPM-1973 公式定线时略去由 Mo-

表 2

编号	作者	$P_s$	D (毫米)	$P_s$ (米-公斤/日 /每米岸线)	S <sub>0</sub> (米 <sup>3</sup> /日)	$K_0 = S_0 / P_s$	G' (公斤)	$\eta = P_{s0} / G'$	备注
1	Watts (1953)	2.70	0.40(平均)	$4.3 \times 10^4$	42	$9.77 \times 10^{-4}$	$5.7 \times 10^{-8}$	$0.755 \times 10^{12}$	
2	Watts (1953)	2.70	0.40(平均)	$8.6 \times 10^4$	57.3	$6.68 \times 10^{-4}$	$5.7 \times 10^{-8}$	$1.51 \times 10^{12}$	
3	Watts (1953)	2.70	0.40(平均)	$18.2 \times 10^4$	153	$11.9 \times 10^{-4}$	$5.7 \times 10^{-8}$	$3.19 \times 10^{12}$	
4	Watts (1953)	2.70	0.40(平均)	$22.7 \times 10^4$	222	$9.8 \times 10^{-4}$	$5.7 \times 10^{-8}$	$3.99 \times 10^{12}$	
5	Caldwell (1956)	2.65	0.40(平均)	$38.6 \times 10^4$	688	$17.8 \times 10^{-4}$	$5.55 \times 10^{-8}$	$6.95 \times 10^{12}$	
6	Caldwell (1956)	2.65	0.40(平均)	$54.5 \times 10^4$	229	$4.2 \times 10^{-4}$	$5.55 \times 10^{-8}$	$9.81 \times 10^{12}$	
7	Caldwell (1956)	2.65	0.40(平均)	$136 \times 10^4$	840	$6.16 \times 10^{-4}$	$5.55 \times 10^{-8}$	$24.5 \times 10^{12}$	
8	Caldwell (1956)	2.65	0.40(平均)	$227 \times 10^4$	1453	$6.42 \times 10^{-4}$	$5.55 \times 10^{-8}$	$40.8 \times 10^{12}$	
9	Caldwell (1956)	2.65	0.40(平均)	$276 \times 10^4$	488	$1.62 \times 10^{-4}$	$5.55 \times 10^{-8}$	$49.6 \times 10^{12}$	
10	Caldwell (1956)	2.65	0.40(平均)	$386 \times 10^4$	1530	$3.96 \times 10^{-4}$	$5.55 \times 10^{-8}$	$69.5 \times 10^{12}$	
11	Komar (1969)	2.65	0.60	$5.45 \times 10^4$	53.5	$9.8 \times 10^{-4}$	$18.7 \times 10^{-8}$	$0.291 \times 10^{12}$	作图时此组 数据删去。
12	Komar (1969)	2.65	0.60	$5.90 \times 10^4$	24.5	$4.15 \times 10^{-4}$	$18.7 \times 10^{-8}$	$0.316 \times 10^{12}$	
13	Komar (1969)	2.65	0.60	$13.6 \times 10^4$	76.5	$5.60 \times 10^{-4}$	$18.7 \times 10^{-8}$	$0.727 \times 10^{12}$	
14	Komar (1969)	2.65	0.60	$16.3 \times 10^4$	76.5	$4.70 \times 10^{-4}$	$18.7 \times 10^{-8}$	$0.872 \times 10^{12}$	
15	Komar (1969)	2.65	0.60	$15.9 \times 10^4$	176	$11.1 \times 10^{-4}$	$18.7 \times 10^{-8}$	$0.850 \times 10^{12}$	
16	Komar (1969)	2.65	0.60	$18.2 \times 10^4$	122.5	$6.73 \times 10^{-4}$	$18.7 \times 10^{-8}$	$0.970 \times 10^{12}$	
17	Komar (1969)	2.65	0.60	$27.2 \times 10^4$	239	$8.80 \times 10^{-4}$	$18.7 \times 10^{-8}$	$1.453 \times 10^{12}$	
18	Komar (1969)	2.65	0.60	$34.0 \times 10^4$	359	$10.56 \times 10^{-4}$	$18.7 \times 10^{-8}$	$1.82 \times 10^{12}$	
19	Komar (1969)	2.65	0.60	$40.8 \times 10^4$	382	$9.35 \times 10^{-4}$	$18.7 \times 10^{-8}$	$2.18 \times 10^{12}$	
20	Komar (1969)	2.65	0.60	$90.7 \times 10^4$	725	$8.0 \times 10^{-4}$	$18.7 \times 10^{-8}$	$4.83 \times 10^{12}$	
21	Komar (1969)	2.65	0.175	$13.6 \times 10^4$	114.5	$8.42 \times 10^{-4}$	$0.475 \times 10^{-8}$	$28.7 \times 10^{12}$	
22	Komar (1969)	2.65	0.175	$36.2 \times 10^4$	306	$8.48 \times 10^{-4}$	$0.475 \times 10^{-8}$	$76.3 \times 10^{12}$	
23	Komar (1969)	2.65	0.175	$81.7 \times 10^4$	390	$4.78 \times 10^{-4}$	$0.475 \times 10^{-8}$	$172 \times 10^{12}$	
24	Komar (1969)	2.65	0.175	$340 \times 10^4$	2680	$7.88 \times 10^{-4}$	$0.475 \times 10^{-8}$	$720 \times 10^{12}$	

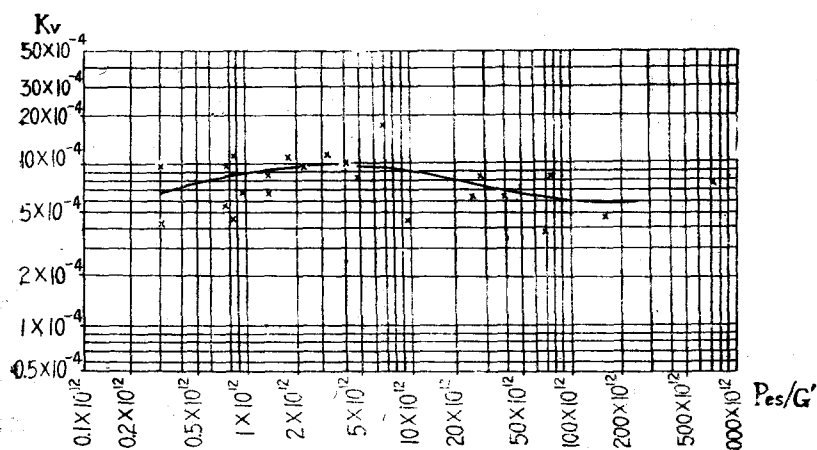


图 7— $K_v$ 的关系曲线

ore and caie (1960) 提供的那组数据 (按我们的计算,  $K_v = 1.13 \times 10^{-4}$ , 与  $K_v = 1.62 \times 10^{-4}$  相差不多), 故在定线时, 略去了表 2 第 9 行中的  $K_v = 1.62 \times 10^{-4}$  这一组数据。

2. 对于表 1 中的  $P_s = 2.60 - 2.69$  的全部实验室数据 (共 149 个数据) 的计算表明, 比值  $\eta$  要比现场情况下的数值小几个数量级, 其  $K_v$  值显著小于现场情况下的  $K_v$  值。从定性观点来看, 可认为这是因为在实验室条件下的输沙条件不如现场的充分, 这是可从 Bagnold (1966) 的输沙机理来解释的。

3. 对于表 1 中的  $P_s = 1.10 - 1.40$  的全部实验室数据, 根据计算求得的  $K_v$  值, 比  $P_s = 2.60 - 2.69$  的实验室数据的  $K_v$  值要大一个数量级。

4. 通过计算分析, 未能找到在实验室条件下的轻质砂 ( $P_s = 1.10 - 1.40$ ) 与普通砂 ( $P_s = 2.60 - 2.69$ ) 的二类  $K_v$  值变化规律之间的关系。

综上所述得以认为:

第一、在计算沿岸输沙率时, 借用本文推荐的图来确定  $K_v$  值是目前比较切实可行的办法, 据此算得的精度要比已有的方法好些。

第二、在确定  $K_v$  值时直接引用实验室经验关系的办法, 由于实验室条件与现场条件的输沙条件不同, 看来是不合适的。

顺便指出, 按本文推荐的方法, 因  $K_v$  值

与  $\eta$  有关, 故计算时应先把波高的观察记录化演到均方根波高 (各种特征波高之间的转化关系, 见海港水文规范); 按本文系统引用的波浪数据为深水波的数据, 如实测值属于浅水波的情况, 需先把它们化演到深水波的数据 (在进行上述转化时, 可应用 Wiegel, R.L., (1964) 一书的图 2、4); 至于

计算中的折射系数  $K_R$ , 可由折射图求得。

关于现场的  $K_v$  值变化规律与实验室的  $K_v$  值变化规律之间的联系, 是今后需要着重解决的问题。笔者认为, 只有在上述问题解决后, 才能把实验室的结果引用到现场去作定量估计。

### 参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国交通部, 1978. 港口工程技术规范. 人民交通出版社. 第二篇水文, 第一册海港水文。
- [2] Bagnold, R. A., 1963. The Sea 3: 507—528.
- [3] Bagnold, R. A., 1966. U. S. Geol. Survey. Washington, D. C. Prof. Paper 422-I. 37 P. P.
- [4] Das, M. M., 1972. Proceedings of The Thirteenth Coastal Engineering Conference 2: 1027—1048.
- [5] Cyril Galvin and Phillip Vitaie, 1976. Proceedings of The Coastal Engineering Conference 2: 1133—1148.
- [6] Komar, P. D. and D. L. Inman, 1970. J. Geophys. Res. 75 (30): 5914—5927.
- [7] Wiegel, R. I., 1964. Oceanographical Engineering.

