

# 泥沙起动条件与卵石浅滩航道整治线宽度的确定

钟 恩 清

(中山大学地理系)

**提 要:** 在简述泥沙起动条件表达式的基础上, 本文分析卵石浅滩整治与泥沙起动条件的关系。根据起动拖曳力和起动流速的概念, 分别导出了卵石浅滩航道整治宽度计算公式, 并用北江整治河段的实测资料对诸公式作了比较。结果表明, 式(16)的计算值与实际采用值有较好的一致性。

**主题词:** 泥沙起动条件 航道整治 卵石浅滩 整治线宽度

水路运输是最经济的运输方式, 因此应当大力发展内河航运。山区冲积河流上发育众多卵石浅滩, 枯水期碍航。为此, 应对卵石浅滩河段进行整治。通常是在浅滩河段修建丁坝群、顺坝或锁坝, 从而束窄河床, 增大水流输沙能力, 使河床冲深, 以期达到设计要求的航深。在整治水位确定后, 如何确定整治线宽度, 直接关系到整治工程的效果和投资。由于河道水流、泥沙运动的复杂性, 使整治线宽度的确定问题迄今还难以得到比较满意的解决。

国内外许多学者对沙质浅滩整治线宽度的确定进行过广泛深入的研究, 提出了许多经验的或理论的计算公式, 可供航道整治工程设计时参考。但论述卵石浅滩整治线宽度计算方法的文献却不多见。文献[1]从泥沙起动流速的概念出发, 导出了计算公式。本文在简述各家泥沙起动条件表达式的基础上, 分析卵石浅滩整治与泥沙起动条件的关系, 然后根据泥沙起动条件的不同表达式, 导出卵石浅滩整治线宽度的计算公式, 并用实测资料对所建立的公式进行比较, 提出一个比较符合实际的计算公式, 供参考。

## 一、泥沙起动条件的表达式

泥沙起动条件是指河床上的泥沙由静止状态转变为运动状态的临界水流条件, 通常以起动拖曳力或起动流速来表示。

### (一) 泥沙起动拖曳力

早在1936年, 希尔兹(A. Shields)从作用于床面泥沙颗粒上的各种力的平衡出发, 导出了无粘性泥沙的起动拖曳力公式[2]:

$$\tau_c / (\gamma_s - \gamma) d = f(u_* d / \nu) \quad (1)$$

式中,  $\tau_c$  为泥沙起动拖曳力;  $d$  为泥沙粒径;  $\gamma_s$  和  $\gamma$  分别为泥沙和水的容重;  $u_*$  为摩阻流速;  $\nu$  为水的运动粘滞系数。

式 (1) 表明, 比值  $\tau_c / (\gamma_s - \gamma) d$  为沙粒雷诺数  $u_* d / \nu$  的函数, 而函数  $f$  的形式必须通过试验资料来确定。图 1 是根据希尔兹及其他学者的试验资料点绘的希尔兹曲线<sup>[3]</sup>。从图可见, 比值  $\tau_c / (\gamma_s - \gamma) d$  随沙粒雷诺数的变化而变化, 在沙粒雷诺数大于 1000 以后, 对于无粘性颗粒泥沙中的粗颗粒泥沙,  $\tau_c / (\gamma_s - \gamma) d$  接近于一个常数, 即:

$$\tau_c / (\gamma_s - \gamma) d = 0.06 \quad (2)$$

钱宁在图 1 中补充了怀特 (S.J. White)、曼茨 (P.A. Mantz) 等人的试验资料后, 发现点据不是集中在希尔兹曲线上, 而是得到一条  $\tau_c / (\gamma_s - \gamma) d$  与  $u_* d / \nu$  关系的分布带<sup>[2]</sup>。据此, 在沙粒雷诺数大于 1000 以后,  $\tau_c / (\gamma_s - \gamma) d$  不是一个常数, 从图 1 可看出, 0.06 可作为上限值, 而下限值约等于 0.04, 即:

$$\tau_c / (\gamma_s - \gamma) d = 0.04 \sim 0.06 \quad (3)$$

众所周知, 推移质运动与泥沙起动有密切关系, 泥沙起动的临界状态相当于推移质输沙率等于零时的极限状态。因此, 利用推移质输沙率公式有可能求出  $\tau_c / (\gamma_s - \gamma) d$  的值。文献 [2] 根据在欧洲得到广泛应用的梅叶-彼德 (E. Meyer-Peter) 推移质输沙率公式, 求得:

$$\tau_c / (\gamma_s - \gamma) d = 0.047 \quad (4)$$

## (二) 泥沙起动流速

对于粘性细颗粒泥沙, 还受细颗粒泥沙之间粘结力的作用。把作用于床面泥沙的各种力

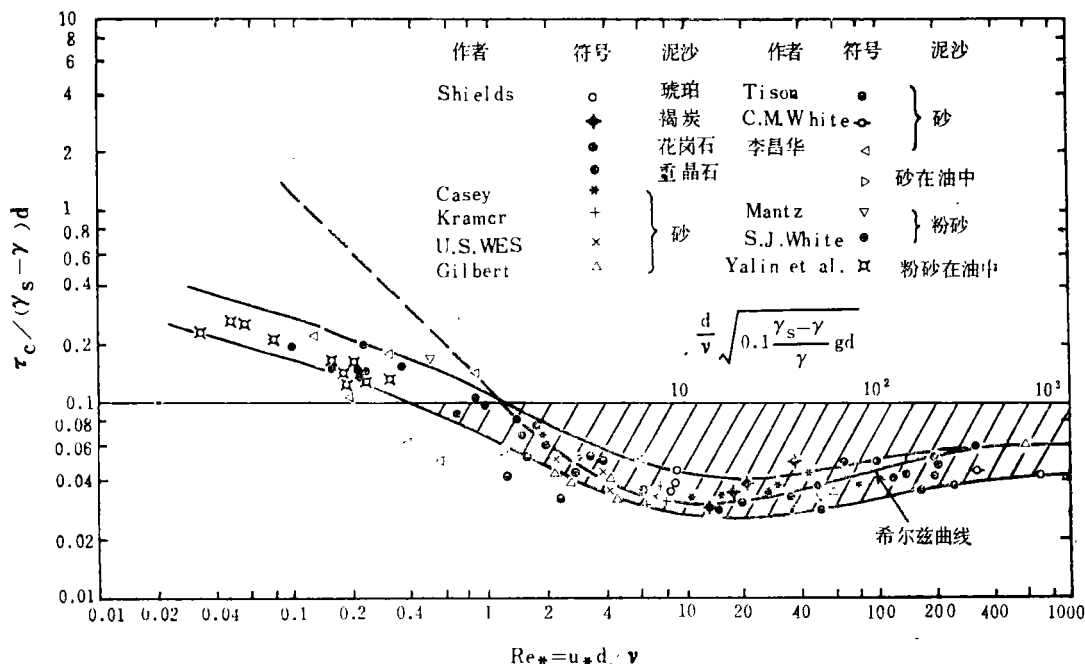


图 1 希尔兹曲线及其修正  
Shields's curve and its modification

一起考虑,通过力的平衡方程式,可导得无粘性颗粒和粘性细颗粒泥沙的统一起动流速公式。而对粘结力如何计算,各家的认识不同,因而提出的粘结力计算式也不同,致使导得的起动流速公式亦不同。

我国学者对不同大小颗粒泥沙的统一起动规律作过深入的研究,其中比较有影响的是以下4家公式。

张瑞瑾公式<sup>[4]</sup>:

$$U_c = \left( \frac{h}{d} \right)^{0.14} \left( 17.6 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} d + 0.000000605 \frac{10 + h}{d^{0.72}} \right)^{1/2} \quad (5)$$

式中,  $U_c$  为临界水流条件下的垂线平均流速(对空间问题则为断面平均流速),称为起动流速;  $h$  为水深; 其它符号意义同前。

唐成本公式<sup>[5]</sup>:

$$U_c = 1.79 \frac{1}{1+m} \left( \frac{h}{d} \right)^m \left[ \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d + \left( \frac{\gamma'}{\gamma_c'} \right)^{10} \frac{c}{\rho d} \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中,  $\gamma'$  和  $\gamma_c'$  分别为泥沙干容重和稳定干容重;  $g$  为重力加速度;  $\rho$  为水的密度;  $c$  为粘结力系数; 对一般天然河道,  $m = 1/6$ 。

窦国仁公式<sup>[4]</sup>:

$$U_c = 0.32 \left( \ln \frac{11h}{K_s} \right) \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d + 0.19 \frac{gh\delta + \varepsilon_k}{d} \right)^{1/2} \quad (7)$$

式中,  $K_s$  为河床粗糙度,对平整床面,当  $d \leq 0.5\text{mm}$  时,取  $K_s = 0.5\text{mm}$ , 当  $d > 0.5\text{mm}$  时,取  $K_s = d$ ;  $\varepsilon_k$  为粘结力系数;  $\delta$  为与沙粒缝隙大小有关的特征厚度。

沙玉清公式<sup>[6]</sup>:

$$U_c = \left[ 266 \left( \frac{\delta}{d} \right)^{1/4} + 6.66 \times 10^9 (0.7 - \varepsilon)^4 \left( \frac{\delta}{d} \right)^2 \right]^{1/2} \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d} h^{1/5} \quad (8)$$

式中,  $\delta$  为薄膜水厚度,取  $\delta = 1 \times 10^{-7}\text{m}$ ;  $\varepsilon$  为孔隙率,取  $\varepsilon = 0.4$ 。

图2表示上述各家起动流速公式计算值与实测值的比较<sup>[4]</sup>。从图中可看出,对于无粘性颗粒泥沙,随着粒径的增大,起动流速增大。而对于无粘性的较粗颗粒泥沙(例如  $d > 5\text{mm}$ ),实测点据比较分散,难于判断哪一家公式更为可靠。对同一粒径的泥沙而言,以公式(8)计算的起动流速最大,公式(7)计算的起动流速最小,公式(5)、(6)的计算值则介于两者之间。

上述4个起动流速公式中括号内的第一项反映重力的作用,第二项反映粘结力的作用。对于粗颗粒泥沙,重力起主要作用,反映粘结力的第二项可忽略不计。由于本文所讨论的是卵

石起动问题,因此,式(5) — (8)中括号内的第二项可忽略不计。

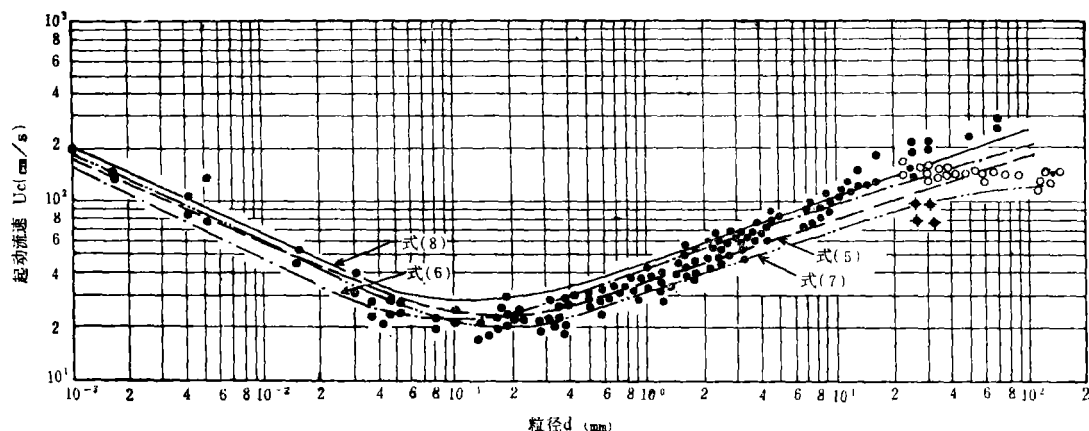


图 2 起动流速计算值与实测值的比较 (水深  $h=0.15\text{m}$ )

Comparison between the values calculated by some formulas  
of starting velocity and the measured values

## 二、卵石浅滩整治与泥沙起动条件的关系

卵石浅滩整治的关键是卵石推移质的运动问题,而卵石推移质的运动与泥沙起动条件有密切关系。在枯水期,卵石浅滩水浅,不能满足通航要求,必须通过修建整治建筑物来束窄河床,引导水流冲刷浅滩,从而获得设计要求的航深。束窄河床是为了使在某一流量下水流作用于床面卵石的拖曳力大于卵石起动拖曳力,或浅滩的断面平均流速大于卵石起动流速,这样,浅滩上的卵石就会向下游推移。所以,卵石浅滩整治的理论依据就是泥沙起动规律。

在山区河流中,连接上弯道和下弯道的直线过渡河段往往形成过渡段浅滩,它是卵石浅滩中最基本的滩型,本文讨论的卵石浅滩主要是指这种浅滩。在上、下弯道,由于受弯道环流的作用,使凹岸受冲刷,形成通航条件较好的深槽。但在过渡段,由于不受环流的作用,通常形成横断面成对称抛物线型的宽浅河槽。

在大、中洪水时,过渡段的横断面积一般大于弯道的横断面积,故流速较小,水流的输沙能力减弱,于是,从上深槽推移来的卵石,便在过渡段淤积下来。在洪水退落时,又不能将淤积的卵石全部冲走,致使过渡段水浅,形成碍航浅滩。若从泥沙起动拖曳力的概念出发,则在中枯水时,水流作用于浅滩床面卵石的拖曳力小于卵石起动拖曳力,滩上卵石不能起动。若从泥沙起动流速的概念出发,则在中枯水时,浅滩的断面平均流速小于卵石起动流速,滩上卵石不会向下深槽推移。而中枯水时上深槽水流缓慢,水流作用于床面卵石的拖曳力也小于卵石起动拖曳力(或断面平均流速小于卵石起动流速),上深槽中的卵石不会推移到浅滩上来,所以,在中枯水时,过渡段浅滩处于不冲不淤的相对平衡状态。

航道整治一般采用中枯水整治,但在中枯水时,浅滩上的卵石处于静止状态。因此,只

要设法使水流作用于浅滩床面卵石的拖曳力大于卵石起动拖曳力, 或使浅滩断面平均流速大于卵石起动流速, 将卵石推移到下深槽中去, 就可增加浅滩水深, 满足通航要求。为此, 在整治水位确定后, 必须用整治建筑物将浅滩段较宽的河面束窄, 使浅滩段具有某一固定的宽度, 即整治线宽度。在这个宽度及整治水位相应的流量下, 水流作用于床面卵石的拖曳力大于卵石起动拖曳力, 或浅滩断面平均流速大于卵石起动流速, 致使滩上卵石起动并向下深槽推移。于是, 浅滩受冲刷, 而最终处于不冲不淤的新的平衡状态时, 浅滩水深恰能符合设计航深要求。

### 三、基于起动拖曳力概念的计算公式

卵石浅滩整治后, 水流作用于床面卵石的拖曳力大于卵石起动拖曳力, 卵石向下深槽推移。于是, 浅滩受冲刷, 水深增加, 流速减小, 因而水流作用于床面卵石的拖曳力也随之减小。直至把浅滩冲刷成满足设计要求, 而此时水流作用于床面卵石的拖曳力恰好等于卵石起动拖曳力, 即滩上卵石恰好处于临界起动状态。当水位低于整治水位后, 滩上卵石不能起动。根据这个概念, 可建立卵石浅滩的整治线宽度计算公式。

当卵石浅滩整治后, 重新处于不冲不淤的新的相对平衡状态时, 在整治水位和整治线宽度情况下, 水流作用于床面卵石的拖曳力为:

$$\tau = \gamma h J \quad (9)$$

式中,  $\tau$  为水流作用于床面卵石的拖曳力;  $h$  为浅滩整治后整治水位时的断面平均水深, 文献〔7〕给出了确定方法;  $J$  为整治后整治水位时的比降。

于是, 我们有:

$$\tau = \tau_0 \quad (10)$$

将式 (9) 和 (2) 代入上式, 可得:

$$\gamma h J = 0.06(\gamma_s - \gamma) d \quad (11)$$

若河床糙率  $n = d^{1/6}/A$ , 则水流运动方程为:

$$U = A(h/d)^{1/6} \sqrt{hJ} \quad (12)$$

式中,  $U$  为整治后整治水位时的断面平均流速;  $A$  为系数;  $d$  为卵石粒径, 可取平均粒径。

水流连续性方程为:

$$Q = UBh \quad (13)$$

式中,  $Q$  为整治水位时通过的流量, 即整治流量;  $B$  为整治线宽度。

联解 (11)、(12) 和 (13) 3 式, 可得卵石浅滩整治线宽度计算公式:

$$B = Q/A \left( 0.06 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right)^{1/2} h^{7/6} d^{1/3} \quad (14)$$

式中,  $(\gamma_s - \gamma)/\gamma = 1.65$ 。系数  $A$  与卵石的级配、几何形状和排列有关。卵石浅滩整治后重新处于平衡状态时, 卵石的排列可能比较松散, 不会很有规则, 因而对水流的阻力较大, 故据文献〔4〕可取  $A = 19$ 。于是, 上式可进一步写成:

$$B = Q/5.98 \ h^{7/6} d^{1/3} \quad (15)$$

将式(10)中的起动拖曳力 $\tau_c$ 改用式(4)代入,并采用上述相同的方法,可求得如下整治线宽度计算公式:

$$B = Q/5.29 \ h^{7/6} d^{1/3} \quad (16)$$

#### 四、基于起动流速概念的计算公式

卵石浅滩整治后,浅滩段的断面平均流速大于卵石起动流速,浅滩卵石向下深槽推移。于是,浅滩段水深增加,断面平均流速则随之减小,最终把浅滩冲刷成符合设计航深要求,而断面平均流速则恰好等于卵石起动流速,此时滩上卵石恰好处于临界起动状态。当水位降到整治水位以下时,滩上卵石不能起动。基于上述概念,则要求:

$$U = U_c \quad (17)$$

将式(13)代入上式,则有:

$$Q/Bh = U_c \quad (18)$$

文献(1)采用公式(5),忽略式中括号内的第二项后,将该式代入上式,求得如下卵石浅滩整治线宽度计算公式:

$$B = Q/5.39 \ h^{1.14} d^{0.36} \quad (19)$$

同样,我们可将式(6)、(7)和(8)中括号内的第二项忽略后,分别代入式(18),则可分别得到如下整治线宽度计算公式:

$$B = Q/6.17 \ h^{7/6} d^{1/3} \quad (20)$$

$$B = Q/1.29 \ h \ d^{1/2} \ln(11h/d) \quad (21)$$

$$B = Q/8.75 \ h^{1.2} d^{0.375} \quad (22)$$

式(15) — (22)的单位均采用 $m \cdot s$ 制。

#### 五、公式的比较

北江是纵贯广东南北的水上交通要道,但航道上存在众多浅滩,枯水期碍航。为了开发北江航运,曾于1965年至1971年间进行了大规模的航道整治,当时大部分浅滩采用优良河段模拟法来确定整治线宽度。为了对所建立的公式进行比较,我们对北江上游的许多卵石浅滩进行了计算,发现有些公式的计算值与当时采用的整治线宽度符合较好,有些则相差太远。限于篇幅,本文仅对两个卵石浅滩整治河段的计算结果进行介绍。

##### (一) 乌石滩浅滩整治河段

整治段全长约600m,滩长约300m,属过渡段卵石浅滩,卵石平均粒径为0.02m,整治前最小航深为0.5m。设计要求航深为0.8m,采用整治水位高出设计水位1.0m,整治流量为500 $m^3/s$ ,整治线宽度为170—210m。整治工程于1968年初竣工,根据1986年3月测量的航道地形图,即整治后经历了18年时间,河床已处于相对平衡状态,航深增加到1.0—1.2m,大于原设计航深。在整治段航道地形图上,从上游至下游共取7个断面,求出整治后整治水

位时的各断面平均水深,再用上述各式计算整治线宽度,计算结果见表1。表中同时列出各公式计算值与实际采用值的相对误差。

## (二) 鱼梁浅滩整治河段

整治段全长约1500m,滩长约520m,属过渡段卵石浅滩,卵石平均粒径为0.025m,整治前最小航深为0.5m。整治流量和设计航深与前述相同,整治线宽度为150—180m。整治工程于1968年初竣工,根据1986年3月测量的航道地形图,航深已增加到1.0—1.3m,超出原设计航深。从整治段航道地形图上,自上游至下游共取9个断面,求出整治后整治水位时的各断面平均水深,再用上述各式计算整治线宽度,计算结果见表2。表中也列出了各公式计算值与实际采用值的相对误差。

从表1、2可明显看出,式(15)、(20)和(22)的计算值都是偏小的,其中以式

表1 乌石腩浅滩实际采用整治线宽度与各公式计算值的比较

Comparison between the actual widths of normal line at the Wushan Riffle of the Beijiang River and the results computed by some formulas

断面号	实测 h (m)	实际采用 B (m)	各公式计算B (m)									
			式 (15)	误差 (%)	式 (16)	误差 (%)	式 (19)	误差 (%)	式 (20)	误差 (%)	式 (21)	误差 (%)
1	1.87	170	148	-12.9	168	-1.2	186	9.4	141	-15.3	211	24.1
2	1.83	170	152	-10.6	172	1.2	191	11.8	148	-12.9	217	27.6
3	1.88	175	117	-16.0	167	-4.6	185	5.7	113	-18.3	219	21.0
4	1.71	185	165	-10.8	186	0.5	206	11.4	160	-13.5	234	26.5
5	1.64	200	173	-13.5	195	-2.0	216	8.0	168	-16.0	246	23.0
6	1.58	210	181	-13.8	201	-2.9	225	7.1	175	-16.7	256	21.9
7	1.60	210	178	-15.2	201	-4.3	222	5.7	173	-17.6	253	20.5

表2 鱼梁浅滩实际采用整治线宽度与各公式计算值的比较

Comparison between the actual widths of normal line at the Yuliang Riffle of the Beijiang River and the results calculated by some formulas

断面号	实测 h (m)	实际采用 B (m)	各公式计算B (m)									
			式 (15)	误差 (%)	式 (16)	误差 (%)	式 (19)	误差 (%)	式 (20)	误差 (%)	式 (21)	误差 (%)
1	1.90	150	135	-10.0	153	2.0	168	12.0	131	-12.7	192	28.0
2	1.96	150	130	-13.3	147	-2.0	163	8.7	126	-16.0	185	23.3
3	2.00	150	127	-15.3	144	-4.0	159	6.0	123	-18.0	181	20.7
4	1.92	150	134	-10.7	151	0.7	167	11.3	129	-14.0	189	26.0
5	1.75	170	149	-12.4	168	-1.2	185	8.8	144	-15.3	211	24.1
6	1.70	170	151	-9.4	174	2.4	191	12.4	149	-12.4	218	28.2
7	1.71	170	150	-11.8	169	-0.6	186	9.4	145	-14.7	212	24.7
8	1.70	180	154	-14.4	174	-3.3	191	6.1	149	-17.2	218	21.1
9	1.67	180	157	-12.8	178	-1.1	195	8.3	152	-15.6	222	23.3

(22)的相对误差最大,为 $-28.8\sim -34.0\%$ 。因式(22)是根据公式(8)导得的,由前述可知,4个起动流速公式中,以式(8)计算的起动流速最大,因而所要求的整治线宽度必须最小,但这与实际情况不符。若按式(15)、(20)和(22)来确定整治线宽度,会使整治线宽度过小,尤以式(22)更甚,这不但增加工程投资,而且有可能引起冲刷过甚。式(19)和(21)的计算值则偏大,以式(21)的相对误差较大,为 $20.0\sim 28.2\%$ 。因式(21)是根据公式(7)导得的,4个起动流速公式中,以式(7)计算的起动流速最小,故所要求的整治线宽度最大。这也与实际情况不符。若按式(19)和(21)来计算,则会使整治线宽度过大,这有可能造成浅滩冲刷不足,达不到设计航深的要求。6个计算公式中,以式(16)的相对误差最小,为 $-4.6\sim 2.0\%$ ,这表明用该式计算的整治线宽度与实际采用值符合得最好。

式(16)是根据起动拖曳力的概念建立的,并用梅叶-彼德推移质输沙率公式定出 $\tau_0/(\gamma_s - \gamma)d$ 的值,由于梅叶-彼德公式是根据大量试验资料推得的,试验资料中又包含中值粒径达28.65mm的卵石试验数据,并且试验时所采用的水流条件使床面上的泥沙绝大部分都能进入运动状态。而本文讨论的是卵石推移质运动问题,且浅滩整治后,在整治线范围内的卵石基本上都能进入运动状态。所以,用梅叶-彼德公式定出 $\tau_0/(\gamma_s - \gamma)d$ 的值,使式(16)的系数为1/5.29是可信的,这大概就是式(16)的计算结果比较符合实际的原因之一。

## 六、结 语

从理论上来说,在整治水位时,卵石浅滩没有来沙的情况下,根据泥沙起动条件表达式推求整治线宽度计算公式是合理的。但是,由于现有的各种泥沙起动条件表达式,大都是来自水槽试验成果,而水槽中模拟的河床与天然河床的实际情况有很大差别。所以,可以认为现有的多数表达式都不能很好地反映天然河流中泥沙的起动规律,特别是卵石的起动规律。为此,本文根据泥沙起动条件的不同表达式,导出了6个整治线宽度计算公式,然后采用北江整治河段的实测资料对各公式进行比较,结果表明:式(16)的计算结果与实际情况比较符合。对其它河流是否适用,则须进一步验证。

若整个浅滩,或在滩头、滩尾形成的表面粗化层的卵石粒径特别粗大,则难于冲动。这时仍采用“束水攻沙”的办法来整治航槽,往往会使河道束得过窄,有可能使整治后的浅滩变成急流滩,这显然是不合理的。对这种浅滩的整治,应采取疏浚与整治建筑物相结合的原则,疏浚是为了满足设计航深要求,修建丁坝则是为了维护航槽的稳定性。

## 参 考 文 献

- [1] 贡炳生. 卵石浅滩整治线宽度及整治水位的确定, 水运工程, 1978年, 第2期。
- [2] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学, 北京: 科学出版社, 1983年。
- [3] 钱宁. 泥沙运动力学的发展与前瞻, 钱宁论文集, 北京: 清华大学出版社, 1990年。
- [4] 武汉水利电力学院河流泥沙工程学教研室. 河流泥沙工程学, 上册, 北京: 水利出版社, 1981年。
- [5] 唐成本. 泥沙运动的规律, 水利学报, 1963年, 第2期。



- (6) 沙玉清. 泥沙运动学引论. 北京: 中国工业出版社, 1965年.  
(7) 南宁航道工程区、重庆交通学院. 卵石滩整治. 北京: 人民交通出版社, 1985年.

## INITIATION CONDITION OF SEDIMENT MOVEMENT AND DETERMINATION OF THE WIDTH OF NORMAL LINE OF NAVIGATION CHANNEL FOR PEBBLE SHOALS

Zhong Enqing

(Department of Geography, Zhongshan University)

**Subject terms:** initiation condition of sediment movement, channel regulation, pebble shoal, width of normal line

### Abstract

So far the problem of determining the width of normal line for pebble shoals has not been completely solved. In order to answer the question, this paper briefly describes the expressions of initiation condition of sediment movement, and further states the relationship between regulation of pebble shoal and initiation condition of sediment movement. On the basis of the concept of starting drag force the formula (15) and (16) for calculating the width of normal line to the gravel shoals are deduced by using the shields's formula and the Shields's curve and its modification, and then according to the concept of starting velocity, we deduce the formula (19), (20), (21) and (22) respectively by use of the Zhang Ruijin's formula, the Tang Canben's formula, the Dou Guoren's formula and the Sha Yuqing's formula. Finally, these formulas are compared by the measured data in the upper reaches of the Beijing River. The comparison results show that the calculated values of the formula (16) are in good agreement with the actual application values. It is expected that the formula can be served as a reference for channel regulations.