

河湾副流横向输沙问题的研究

吕 昕

(长沙交通学院)

摘 要: 河湾副流的横向输沙计算, 对于研究河道横向演变及其变形规律具有很大的实际意义。本文从分析河湾副流横向流速沿水深分布和含沙量沿垂线分布的规律出发, 先后得出单位面积上横向输沙率沿水深分布的表达式及单宽横向输沙率的计算公式, 而且还进一步对上、下两部分的横向输沙率进行了讨论, 其研究与初步验证及分析结果颇为一致。此外, 文中给出的含沙量相对分布公式(4)及绝对量分布式(10), 不仅克服了经典公式的一系列理论缺陷, 而且同多沙河流的实测资料也较为符合, 颇具有独到之处。

关键词: 河湾副流, 横向输沙, 含沙量分布, 环流流速

中图分类号: P343.1

河湾副流的横向输沙计算, 对于研究河道横向演变及其变形的规律具有很大的实际意义。本文从分析河湾副流横向流速沿水深分布和含沙量沿垂线分布的规律出发, 先后得出单位面积上横向输沙率沿水深分布的表达式及单宽横向输沙率的计算公式, 而且还进一步对上、下两部分的横向输沙率进行了讨论, 其研究与初步验证及分析结构颇为一致。

1 河湾副流

研究河湾副流横向输沙, 可为河道横向演变及其变形的研究提供一定的基础。河湾副流横向流速沿垂线的分布, 又直接关系到横向输沙特性, 对此已有很多学者进行过研究^[1], 如罗索夫斯基, 波达夫, 罗辛斯基, 马卡维也夫, Engelund 及我国学者张红武等, 曾先后提出了弯道环流的计算公式, 其中张红武公式与实测资料最为符合, 因此, 本文在进行弯道环流若干特性分析时, 主要采用该公式。

1.1 横向流速沿水深的分布

张红武提出的如下弯道横向流速沿水深分布的通用公式既适用于光滑又适用于粗糙两种床面情况, 即

$$V_r = 86.7 \frac{V_{cp} h}{r} \left[1 + 5.75 \frac{g}{C^2} \right] \eta^{1.857} - 0.88 \eta^{2.14} + (0.034 - 12.5 \frac{g}{C^2}) \eta^{0.857} + 4.72 \frac{g}{C^2} - 0.088 \quad (1)$$

式中, $\eta = z/h$, 为相对水深, C 为谢才系数; V_{cp} 为纵向垂线平均流速; h 为水深; r 为弯道中垂线所对应的曲率半径; V_r 为横向流速; g 为重力加速度。

我们的验证结果也表明式(1)与实际是相当符合的(图1)。

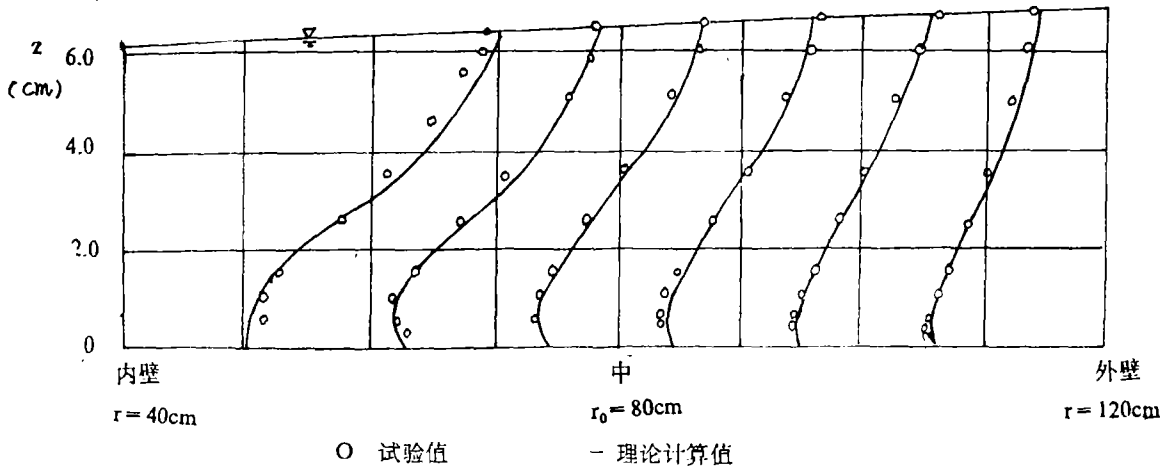


图1 横向流速分布公式的验证(罗索夫斯基粗糙水槽资料)

1.2 横向流速 $V_r = 0$ 点的位置

由于水流的连续性, 横向流速 V_r 必有一处等于零, 而该处的流向, 即代表垂线平均流向, 故求得该处的相对水深, 对很快地测量垂线平均流向是具有实际意义的。

为进一步了解横向环流产生的原因, 现仍在弯道中取单位底面积、高为 h 的水柱来分析其横向受力情况(图2-a)。可以看出, 作用于单位水体上的离心力 $\rho V_\theta^2 / r$ (ρ 为水流的密度; V_θ 为纵向流速)自河底向水面增加(图2-b), 而由水面横比降所引起的同一单位水体在离心力的压力差 $\rho g J r$ ($J r$ 为横比降)沿水深不变, 故两者合力形成一力矩(图2-c), 由此形成表流流向凹岸。底流流向凸岸的横向环流(图2-d)。

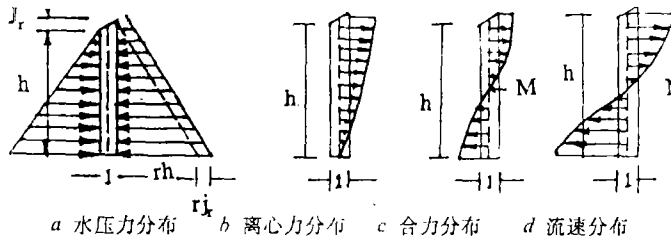


图2 作用于弯道单位水柱上的力分布及流速分布

对于图2中的 M 及 N 点, 一些教科书^[2,3], 认为: “在 M 点处切向流速 u 和垂线平均流速相等, 离心惯性力和横向压差处于平衡状态, 水流质点无横向运动。因而往往将 M 与 N 点以一条虚线相联, 我们则认为 M 点与 N 点并非完全对应, 力与速度直接联系在一起的作法是不妥的。实际上图2仅是一不甚严格的示意图, 因为同时作用于单位水体的力还有横向切力的垂向增量。 M 点为离心力与横向压差的合力为零之点, 只能说明该点的横向切力梯度等于零, 而 N 点为环流流速垂线分布中的零点, 两者无直接联系。

大量的试验结果证实了上述看法^[1]: M 点一般比纵向垂线平均流速所在点稍微偏上, 即在 $Z/h = 0.4$ 附近, 至于 N 点(亦即 $V_r = 0$ 所在点 η_0), 一般位于 $Z/h = 0.5$ 附近。此外按照公式(1)也可得知, η_0 随谢才系数 c 的大小在 $\eta = 0.43 \sim 0.53$ 之间变动, 考虑到该

点附近横向流速很小, 故 $\eta = 0.5$, 这对于横向输沙的计算, 似不会引起大的误差。

2 含沙量沿水深的分布

参照 Rouse 含沙量分布公式的推导方法, 将对数流速分布公式由张红武公式的如下公式^[4] 替代:

$$\frac{V_\theta}{u_*} = \frac{C}{\sqrt{g}} - \frac{3\pi}{8c_n} + \frac{1}{c_n} [\sqrt{\eta - \eta^2} + \arcsin\sqrt{\eta}]$$

式中, u_* 为摩阻流速; c_n 为涡团参数, 可由下式计算

$$c_n = 0.15[1 - 4.2\sqrt{S_v}(0.365 - S_v)] = 0.375k \quad (3)$$

式中, S_v 为以体积百分数计的含沙量, k 为卡门常数。

大量资料难证结果表明, 式(2)适用性很强。若同样求解扩散方程, 我们不难求得如下形式的悬移质含沙量分布公式(已将反正弦值换算成弧度值):

$$S = S_a \exp\left\{0.0465 \frac{\omega}{ku_*} [\arcsin(\frac{2a}{h} - 1) - \arcsin(2\eta - 1)]\right\} \quad (4)$$

式中 S_a 代表取 $\eta = a/h$ 为参考点时的含沙量; ω 为沉速; K 由式(3)引入。

分析结果表明, 上式克服了 Rouse 含沙量分布公式在水面和河底部位出现的缺陷, 即该式不仅在水面处适用, 而且参考点取得相当小时, 含沙量仍不会出现等于无穷大的不合理现象。此外, 该式的结构形式比张瑞瑾采用王志德流速公式得到的含沙量分布公式^[5] 简便得多。为便于使用, 我们按照谢鉴衡、丁君松教授的处理方法^[5], 取垂线平均含沙量 S_{cp} 即水流挟沙力作为参考点的含沙量, 于是可将式(4)写为

$$\begin{aligned} s &= S_{cp} \exp\left[0.0465 \frac{\omega}{Ku_*} \arcsin(\eta_{cp} - 1)\right] \exp\left[0.0465 \frac{\omega}{Ku_*} \arcsin(\frac{2z}{h} - 1)\right] \\ &= S_{cp} A_1 \exp\left[0.0465 \frac{\omega}{Ku_*} \arcsin(2\eta - 1)\right] \end{aligned} \quad (5)$$

式中, η_{cp} 为平均含沙量 S_{cp} 对应的相对水深值; A_1 山下式计算

$$A_1 \exp\left[0.0465 \frac{\omega}{Ku_*} \arcsin(2\eta_{cp} - 1)\right] \quad (6)$$

$$\text{另一方面} \quad S_{cp} = \frac{1}{V_{cp}} \int_0^1 S V_\theta d\eta \quad (7)$$

$$\text{式中纵向流速 } V_\theta \text{ 山下式计算:} \quad V_\theta = \frac{8}{7} V_{cp} \eta^{\frac{1}{7}} \quad (8)$$

根据陈永宽的研究^[6], 上式与实测资料的符合程度令人满意。

将式(5)及(8)代入式(7), 则得

$$S_{cp} = \frac{8}{7} A_1 S_{cp} \int_0^1 \eta^{\frac{1}{7}} \exp\left[-0.0465 \frac{\omega}{Ku_*} \arcsin(2\eta - 1)\right] d\eta$$

由此解出

$$A_1 = \frac{7}{8} \left\{ \int_0^1 \eta^{\frac{1}{7}} \exp \left[-0.0456 \frac{\omega}{Ku_*} \arcsin(2\eta - 1) \right] d\eta \right\}^{-1} \quad (9)$$

将上式代入式(5), 即得

$$S = \frac{7}{8N_0} S_{cp} \exp \left[-0.0465 \frac{\omega}{Ku_*} \arcsin(2\eta - 1) \right] \quad (10)$$

$$\text{式中} \quad N_0 = \int_0^1 \eta^{\frac{1}{7}} \exp \left[-0.0456 \frac{\omega}{Ku_*} \arcsin(2\eta - 1) \right] d\eta \quad (11)$$

经验证结果表明, 上式不仅同少沙河流的资料符合, 而且也适用于多沙河流(图3)

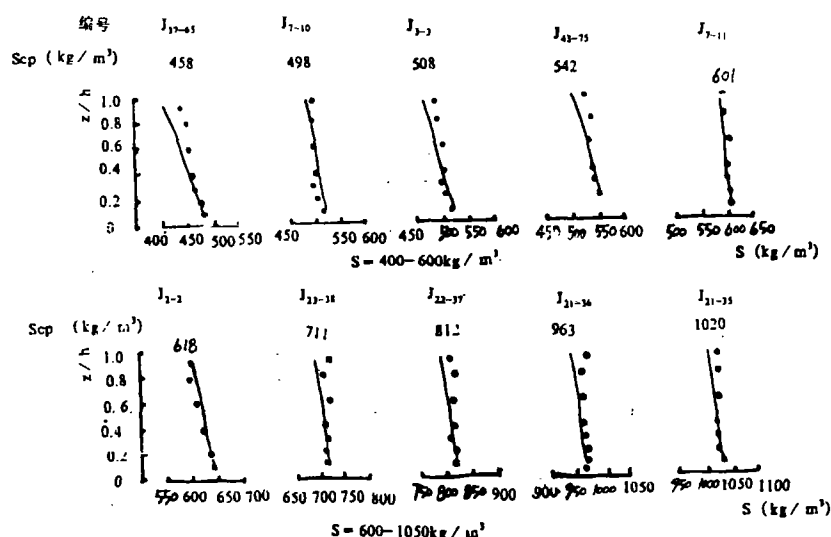


图3 多沙河流测量资料与含沙量分布公式的比较

对于式(10)中的 S_{cp} , 我们由如下水流挟沙力通用公式计算^[7]:

$$S_{cp} = 2.5 \left[\frac{(0.0022 + S_v) V_{cp}^3}{k \frac{r_s - r_m}{r_m} gh\omega} \ln \left(\frac{h}{6D_{50}} \right) \right]^{0.62} \quad (12)$$

上式单位采用 kg 、 m 、 s 制, 式中 r_m 为浑水重度; k 及 ω 为浑水卡门常数和泥沙群体沉速, 它们分别可由如下两式计算:

$$k = 0.4 - 1.68 \sqrt{S_v} (0.365 - S_v) \quad (13)$$

$$\text{及} \quad \omega = \omega_0 \left[\left(1 - \frac{S_v}{2.25 \sqrt{d_{50}}} \right)^{3.5} (1 - 1.25 S_v) \right] \quad (14)$$

式中; ω_0 为清水沉速; d_{50} 为悬沙中径, 单位为 mm 。

3 河湾副流的横向输沙

河湾中垂线上某点单位面积上的横向输沙率可表示为

$$q_{sr} = sv_r \quad (15)$$

将横向流速沿水深分布公式(1)和含沙量沿水深分布公式(10)代入上式, 即不难得到单位面积上横向输沙率沿水深的分布公式

$$q_{sr} = \frac{75.86}{N_0} \frac{V_{cp} h}{r} S_{cp} \exp[-0.0465 \frac{\omega}{Ku} \arcsin(2\eta - 1)] f(\eta) \quad (16)$$

$$\text{其中 } f(\eta) = [(1 + 5.75 \frac{g}{C^2}) \eta^{1.875} - 0.88 \eta^{2.14} + (0.034 - 12.5 \frac{g}{C^2}) \eta^{0.85} + 4.72 \frac{g}{C^2} - 0.088] \quad (17)$$

根据式(16), 即可确定环流横向输沙沿水深的分布。由图4可以看出, 悬浮指标 ω/Ku 愈大(悬沙愈粗), 横向输沙率沿垂线的分布愈不均匀, 横向输沙也越不平衡。

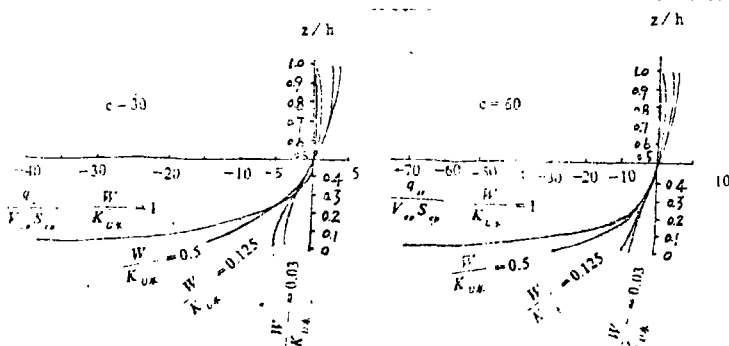


图4 单位面积横向输沙率沿垂线的分布

对式(16)沿水深积分, 又可求出单位水流宽度的横向输沙率:

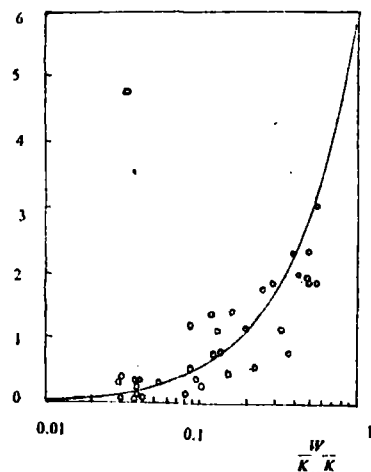
$$G_{sr} = \frac{75.86 V_{cp} h}{N_0 r} S_{cp} \int_0^1 f(\eta) \exp[-0.0465 \frac{\omega}{Ku} \arcsin(2\eta - 1)] d\eta \quad (18)$$

图5的验证结果表明, 式(18)可在实际工程中应用。

此外, 还可根据垂线上环流流速为零之点, 分作两部分, 分别计算上、下两部分的横向输沙率。于是

$$G_{r\pm} = \frac{75.86 V_{cp} h}{N_0 r} S_{cp} \int_0^1 f(\eta) \exp[-0.0465 \frac{\omega}{Ku} \arcsin(2\eta - 1)] d\eta \quad (19)$$

$$\text{及 } G_{r\mp} = \frac{75.86 V_{cp} h}{N_0 r} S_{cp} \int_0^{0.5} f(\eta) \exp[-0.0465 \frac{\omega}{Ku} \arcsin(2\eta - 1)] d\eta \quad (20)$$



o 长江资料 — 计算值
图5 单宽横向输沙率计算结果

与实测资料的比较

利用上两式计算的结果不难发现, 悬沙愈粗(悬浮指标愈大), 上部输沙量愈小, 下部输沙量愈大; 而且上部输沙率小于下部, 即横向输沙总是不平衡的。

4 结 语

本文从分析河湾副流的基本特性及含沙量沿水深分布的规律出发, 先后研究了单位面积上横向输沙率沿水深分布及单宽横向输沙率的计算模式, 所得结果与实测资料基本相符。此外, 由上、下两部分横向输沙率的分析可知, 河湾副流的存在及含沙量上小下大的特有分布图形, 使横向输沙总是不平衡的。

参 考 文 献

- (1) 张红武, 吕昕. 弯道水力学. 水利电力出版社, 1993.
- (2) 清华大学. 水力学(下册). 科学出版社, 1993.
- (3) 华东水利学院. 水力学(上册). 科学出版社, 1983.
- (4) 张红武. 河工模型变率及弯道环流的研究. 硕士学位论文, 1986.
- (5) 陈永宽. 悬移质含沙量沿垂线分布. 泥沙研究, 第一期, 1984.
- (6) 陈永宽. 悬移质含沙量沿垂线分布. 泥沙研究, 第一期, 1984.
- (7) 张红武, 张清. 黄河水流挟沙力的计算公式. 人民黄河, 第11期, 1992.

Study on Transverse sediment Transport of secondary Flow in River Bend

Lu Xin

(Changsha Communications University)

Abstract: The calculation of the transverse transport of sediments with secondary flow in river bends is very important to the investigation of the transverse change of channel. Based on the analysis of the transverse flow velocity and sediments transport distribution along the vertical, this paper presents the formulas to calculate the unit sediments transverse transport and unit area sediments transverse transport along the vertical. Furthermore, the discussion has been made for the sediments transport in the upper level and lower level respectively. All the above formulae have been satisfactorily verified by a large amount of data measured in rivers.

Keywords: secondary flow in river bends; transverse transport of sediments; distribution of sediment concentration; circulating current velocity