文章编号:1001 - 5485(2009)09 - 0006 - 03

金沙江下游支流河段推移质输沙率公式初探

惠晓晓,刘同宦,徐海涛
(长江科学院 河流研究所,武汉 430010)

摘要:选取金沙江下游龙川江、小江、牛栏江 3 条典型支流,对其进行水槽平衡输沙试验,并分析总结现有的推移质输沙率公式,以计算该 3 条支流的推移质输沙率。将试验成果与计算结果进行对比分析,结果表明:①从公式立论基础上看,以能量平衡为主要理论依据的公式计算值偏大;②从公式形式上看,以河段比降为主要参数的公式计算值偏大;③综合考虑各水力要素,Ackers-White 公式,Einstein-Brown 公式和长江科学院输沙曲线,较适用于金沙江下游支流河段的推移质输沙率的计算。

关 键 词:金沙江;推移质;输沙率;水槽试验
中图分类号:TV143.4 **文献标识码**:A

推移质输沙率问题是个十分复杂的问题,迄今为止,对于推移质运动的研究已有一百多年的历史。虽然现在已经从不同的理论角度建立了各种推移质输沙率的公式,但这些理论基础之间本身存在争议,加之天然河道水流泥沙运动情况千差万别,且很难取得精度较高的天然实测资料,所以对于推移质输沙率的研究迄今为止还很不完善[1~4]。本文以金沙江下游 3 条代表支流为例,对各家推移质输沙率公式进行了对比分析。通过对各家公式计算所得结果和水槽平衡输沙试验结果的统一化比较和回归分析,确定了较适用于该类河段的输沙率公式,并用推荐公式计算结果和试验结果对该河段的年推移质输沙量进行了计算,继而对推移质计算公式参数的敏感性进行了分析。

1 河段概况及研究参数

1.1 河段概况

攀枝花至宜宾为金沙江下游段,规划有乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝 4 座梯级水电站。金沙江下游水系发达,该河段支流(沟)众多,坡陡流急,支流进入金沙江的推移质沙量较大,干流集水面积 85 379 km^2,全长约 768 km,落差 738 m,河床平均比降0.961%,多年平均径流量为 405 亿 m^3,含沙量为 4.3 kg/m^3,悬移质输沙量为1.76亿 t,输沙模数 2 060 $t/(km^2 \cdot a)$。根据金沙江下游的上、中、下 3 个不同产沙河段特性,结合金沙江下游主要一级支流的多年平均年输沙量以及输沙模数的差异,综合分析各支流的床面组成、比降、流量等水力泥沙参数,分别选取乌东德库区的龙川江、白鹤滩库区的小江、溪洛渡库区的牛栏江 3 条支流进行研究[5]。其中,龙川江流域面积约 9 185 km^2,河长约 257 km,全河段平均比降 4.8‰,多年平均流量约 52 m^3/s;小江流域面积 3 043 km^2,全长 138 km,河床平均比降1.28 %,多年平均流量 51 m^3。牛栏江流域面积13 672 km^2,全长 423 km,全河段平均比降约 4‰,多年平均径流量49.5亿 m^3,平均含沙量3.68 kg/m^3。

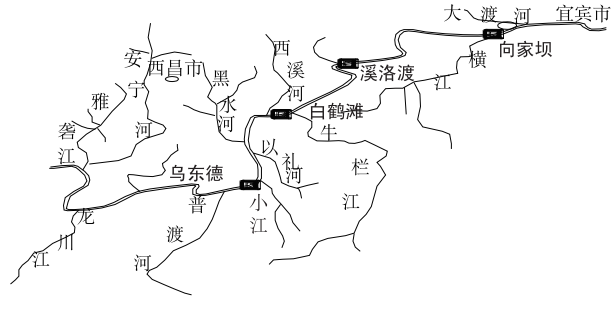


图 1 金沙江下游流域概况图

Fig. 1 Sketch of downstream basin of Jinshajiang River

1.2 参数说明

基于 3 条代表支流统计年的流量资料,以多年平均后,年内累积出现 1,9,18,36,72 d 为分界点对流量进行统计,以分界点的流量为特征流量。在特定断面下,选取特征流量下的水深、流速、河宽、过水面积等,以及该河段河床比降、床沙粒径、级配等特征参数,继而对 3 条典型支流进行推移质输沙率的计算和水槽平衡输沙试验。参数选取具体情况如表 1 所示。

收稿日期:2008 - 11 - 18; **修回日期**:2009 - 02 - 20
基金项目:长江科学院中央级公益性科研院所基本科研业务费资助(YWF0710/HL03; YWF0711/HL04)
作者简介:惠晓晓(1984-),女,陕西富平人,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究,(电话)15527474448(电子信箱)xiaoxiao_828@126.com。

表 1　计算参数选取说明表

Table 1　Illustration of calculation parameters

江名	流量		水深/m	流速/(m·s^{-1})	中值粒径 d_{50}/mm	级配		比降	统计年份
	出现天数/d	流量值/(m^3·s^{-1})				粒径/mm	累计百分比/%		
龙川江	≥1	242	1.42	2.52	43	<2	9.3	0.004 8	2004－2006
						4	17.1		
	≥18	200	1.28	2.46		8	25.5		
						16	33.1		
	≥36	145	1.03	2.37		32	43.2		
						64	62.9		
	≥72	80	0.93	2.29		>64	100		
小江	≥1	243	1.34	2.93	15.5	<2	22.7	0.011	1961－1970
						4	31		
	≥18	186	1.24	2.49		8	40		
						16	52.4		
	≥36	110	0.88	2.27		32	72.6		
						64	95.5		
	≥72	60	0.80	1.94		>64	100		
牛栏江	≥1	740	3.20	3.68	31.5	<2	10.5	0.004	2004－2006
						4	14.5		
	≥9	590	2.85	2.69		8	24.3		
						16	32		
	≥18	277	2.10	2.36		32	50.7		
						64	72.3		
	≥36	211	1.90	2.06		>64	100		
	≥72	155	1.70	1.94					

2　计算公式及水槽试验说明

目前,推移质输沙率的研究方法主要有室内特定河段模型试验、水槽试验、推移质输沙率公式的计算及现场实测。本文通过选定公式对金沙江下游河段乌东德库区的龙川江、白鹤滩库区的小江、溪洛渡库区的牛栏江 3 条支流的推移质输沙率进行计算,并将水槽平衡输沙试验结果与计算结果进行比较,对适用于该河段的推移质输沙率公式进行了初步研究。

2.1　计算公式说明

推导推移质输沙率公式的理论基础不同,得出的公式形式也千差万别。截止目前,在对推移质输沙率公式进行的理论研究中,依据立论基础,公式形式大致可分为以下 4 类:建立在能量平衡观点的基础上,以拖曳力为主要参变数考虑问题;从统计学理论考虑问题;从沙波运行的情况考虑问题;以流速为主要参变数考虑问题[1~4,6]。各家公式的具体介绍见表 2。其中,g_b 为单宽推移质输沙率,h 为水深,d 为床沙粒径,J 为河床比降。

表 2　计算公式说明表

Table 2　Illustration of calculating formulae

公式名称	理论基础	公式形式
Bagnold (1960,1966)	普通物理学概念和力学分析、能量平衡	$g_b=0.01\frac{\gamma_s}{\gamma_s-\gamma}\left(\frac{\omega-\omega_0}{0.5}\right)^{3/2}\times\left(\frac{h}{0.1}\right)^{-2/3}\left(\frac{d}{0.001\,1}\right)^{-1/2}$
Yalin	能量平衡	$g_b=0.635s(\gamma_s-\gamma)D\times\sqrt{ghJ}\left[1-\frac{1}{as}\ln(1+as)\right]$
Parker (1990)	实测资料,量纲分析	$g_b=1\,400g^{1/2}hJ^{3/2}\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_s-\gamma}\right)W_*$
Engelund-Hansen (1966,1967, 1972)	拖曳力为主要参数	$g_b=0.05\gamma_sU^2\left[\frac{d_{50}}{g(\gamma_s/\gamma-1)}\right]^{\frac{1}{2}}\times\left[\frac{\tau_0}{(\gamma_s-\gamma)d_{50}}\right]^{\frac{3}{2}}$
Meyer-Peter & Muller	实测资料为基础、拖曳力为主要参数	$g_b=8\frac{\gamma_s}{\gamma_s-\gamma}\rho^{-1/2}\times\left[\left(\frac{n'}{n_t}\right)^{3/2}\gamma hJ-0.047(\gamma_s-\gamma)d\right]^{3/2}$
Ackers-White	拖曳力为主要参数,量纲分析	$g_b=G_{gr}\rho_s ud$
Einstein-Brown	统计理论和力学分析	$\phi=f\left(\frac{1}{\psi}\right)$, $\phi=\frac{g_b}{K[g(\gamma_s-\gamma)d^3]^{1/2}}$
长江科学院输沙曲线	经验曲线	$\frac{V_D}{\sqrt{gd}}\sim\frac{g_b}{d\sqrt{gd}}$
武水公式	沙波运行理论	$g_b=0.001\,24\frac{\alpha\gamma' U^4}{g^{\frac{3}{2}}h^{\frac{1}{4}}d^{\frac{1}{4}}}$
沙莫夫	流速为主要参数	$g_b=0.95d^{\frac{1}{2}}(U-U_c')\times\left(\frac{U}{U_c'}\right)^3\left(\frac{d}{h}\right)^{\frac{1}{4}}$
冈恰洛夫		$g_b=2.08(U-U_c)\left(\frac{U}{U_c}\right)^3\left(\frac{d}{h}\right)^{\frac{1}{10}}$

2.2　水槽试验基本原理

两相流是一种复杂的水沙运动现象,只能借助于试验方法进行研究,在水槽中模拟原型水沙条件,定性或定量探求所需参数,目前不但已成为可能,而且试验技术也日臻成熟和完善。在确定水槽试验条件时,把河床纵剖面概化成直线,做到在试验带内的河床泥沙组成保持一致、水流为恒定流、进出推移质输沙率及级配相等、侧向无泥沙进出。本文对选取的3条典型支流河道的顺直段进行水槽平衡输

沙试验,以确定各级流量下的推移质平衡输沙率。

试验采用天然沙,模型的比尺分别为,几何比尺:水平比尺等于垂直比尺,等于泥沙粒径比尺,$\lambda_L=\lambda_H=\lambda_d=25$;流速比尺:$\lambda_v=\lambda_L^{0.5}=5$;比降比尺:$\lambda_J=\lambda_H/\lambda_L=1$;阻力比尺:$\lambda_n=1$;水流运动时间比尺:$\lambda_t=\lambda_L/\lambda_v=5$;底沙起动相似比尺:$\lambda_{v0}=\lambda_v=5$;单宽流量及单宽输沙率比尺:$\lambda_q=\lambda_{gb}=\lambda_L^{1.5}=125$。试验时分别选取 3 条支流出口对应控制水文站(小黄瓜园、小江和小河水文站)附近的顺直河段,作为模型试验河段,顺水流方向在主流深槽附近截取宽度 1 m 的条带,并将条带的各种水力因子及边界条件,按正态模型相似律缩制到水槽中,然后进行平衡输沙试验。

3 结果分析

3.1 计算结果与水槽试验结果比较分析

公式计算和水槽试验的结果在输沙强度参数 Φ 和水流参数 Ψ 之间关系图中的比较见图 2。

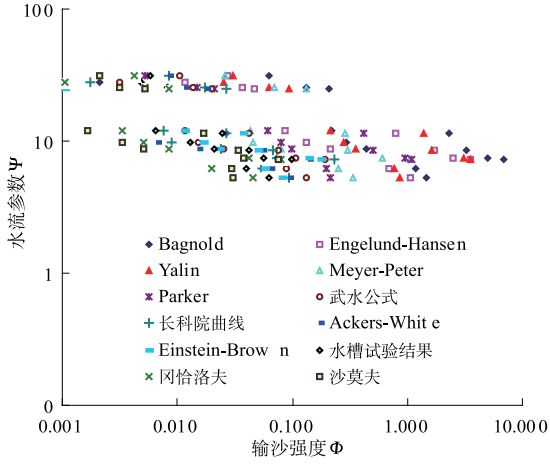


图 2 统一化结果对比图

Fig. 2 Comparison of results obtained by formulae and test data

输沙强度参数:

$$\Phi=\frac{g_b}{\gamma_s}\left(\frac{\gamma}{\gamma_s-\gamma}\right)^{1/2}\cdot\left(\frac{1}{9D^3}\right)^{1/2};$$

水流参数 Ψ:

$$\Psi=\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma}\frac{D}{R_b J}\quad 。$$

可见:Ackers-White, Einstein-Brown,长科院输沙关系曲线的计算结果和水槽试验结果较接近。这 3 个公式的计算结果与水槽试验结果之间的相关关系曲线见图 3,相关系数分别为:0.960,0.907,0.912。由图 3 可知:Ackers-White 公式及 Einstein-Brown 公式的计算结果与试验结果的回归线斜率更接近 1,其次为长江科学院经验曲线,而 Einstein-Brown 公式的回归性差些。

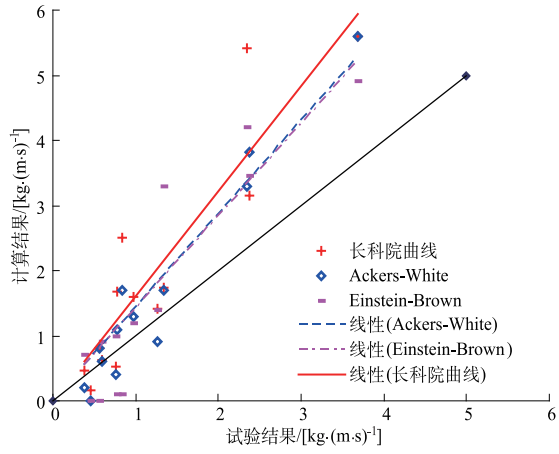


图 3 试验、计算结果相关关系分析图

Fig. 3 Correlation analysis on results of experimentation and calculation

3.2 适用公式主要参数敏感性分析

对各家公式的计算结果进行分析比较,可以看出:建立在能量平衡基础上的公式计算结果偏大,其次为以拖曳力为主要参数建立的公式,而以流速为主要参数建立的公式计算结果偏小。

由于山区河流坡陡流急,河床多由卵石或者卵石夹砂组成。这种河流的河床质泥沙粒径偏大,使床沙较难起动。但是相应地其河床流量、比降、流速、拖曳力也均偏大,便会使推移质输沙率增大,且使推移质输沙率增大的参数之间存在同时增大的关系。在用公式计算山区河流推移质输沙率的过程中,这些参数的累积变化更明显。

在对本文用各家公式对金沙江下游代表支流的推移质输沙率的结果进行分析后发现,从公式形式上看:计算结果对河道比降较敏感的公式计算结果偏大。如:Bagnold, Yalin, Engelund-Hansen, Meyer-Peter& Mulle 以及 Parker 公式中比降 J 的指数均为 3/2,而这几个公式算出的推移质输沙率均偏大;而变化参数较少的公式计算结果偏小,如:冈恰洛夫和沙莫夫公式。这 2 个以流速为主要参数的公式中没有引入比降参数,结果计算值偏小。虽然这些公式是建立在不同的理论基础上的,但是从形式上看,参数变化的累积作用均会使计算的结果偏大。

4 结 论

在不同理论基础上建立的推移质输沙率公式计算出的本文所选金沙江下游 3 条代表支流的推移质输沙率之间存在差异,由于缺乏天然河道中的推移质实测资料的检验和率定,通过与水槽平衡输沙试验结果的比较分析,得出以下结论:

(下转第 16 页)