

卵砾石河道摩阻流速计算方法探讨

王宪业¹, 王协康¹, 刘兴年¹, 卢伟真², 杨青远¹

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 香港城市大学建筑系, 香港)

摘要 通过水槽试验, 采用 6 种方法: 对数流速分布回归法、外延雷诺应力分布法、三维紊动能法、垂向紊动能法、韩其为经验公式法和拖曳力系数法, 计算了卵砾石河床的摩阻流速。以韩其为计算摩阻流速的经验公式为标准, 分析了各种方法中参数取值对计算结果的影响及其在不同水力和床面条件下各种方法的适用性。提出了 2 种可行的计算途径: 光滑床面条件下各方法计算摩阻流速所得结果最大均方差为 2.15, 其中对数流速分布回归法较准确, 三维紊动能法计算值普遍偏小, 相对粗糙床面条件下各方法计算摩阻流速的结果均方差最大达到 8.84, 其中对数流速分布回归法和三维紊动能法较准确。

关键词 摩阻流速; 相对粗糙度; 佛劳德数; 声学多普勒测速仪

中图分类号: TV143

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2007)05-0014-05

Calculation methods of shear velocity in open gravel channel//WANG Xian-ye¹, WANG Xie-kang¹, LIU Xing-nian¹, LU Wei-zhen², YANG Qing-yuan¹(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Department of Building & Construction, City University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract: Based on a series of flume experiments, 6 methods, i. e. the logarithmic velocity distribution regression method, the extensible Reynolds stress distribution method, the 3-D turbulence kinetic energy method, the vertical turbulence kinetic energy method, Han's empirical formula, and the drag coefficient method were adopted for calculation of the shear velocity of gravel river bed. Based on Han's empirical formula for shear velocity calculation, the influences of parameter values of different methods on the calculated result as well as the applicability of each method under different hydraulic and river bed conditions were analyzed. The result showed that the maximum mean square error of the shear velocity calculated by the above methods was 2.15 under the condition of smooth river bed, while the value was up to 8.84 under the condition of rough river bed. As a result, the logarithmic velocity distribution regression method is much suitable for smooth river bed because of its high accuracy, while the result of the 3-D turbulence kinetic method is relatively small under the same condition. Meanwhile the logarithmic velocity distribution regression method and the 3-D turbulence kinetic energy method are both suitable for rough river bed as compared with other methods.

Key words: shear velocity; relative roughness; Froude number; acoustic Doppler velocimeter

在河流水沙运动过程中, 床面剪切力或摩阻流速是一个极为重要的变量^[1]。在实际研究中, 应用可以直接量测床面剪切力的 Preston 管^[2]测量床面切应力较为困难, 从而采用不同的间接方法, 如基于水流控制体力平衡方程而导出的近似平均床面切应力方法及常采用的时均流速垂线分布法^[3]。随着量测技术的高速发展, 使三维水流紊动结构的精细测量在高频率和小误差要求下成为可能^[4], 因而可通过雷诺应力确定局部河床剪切力, 但是在天然河道内获得近壁区精细的紊动参数仍然相当困难^[5]。对于二维水流来说, Nikora 等^[6]和刘春晶等^[7]分别通

过垂线雷诺应力分布的外延关系得到床面剪切力。外国学者 Schlichting^[8]以平均床面剪切应力与平均流速的关系来求解局部床面剪切力, 我国学者韩其为^[9]也曾以野外实测资料为基础, 建立了以垂线平均流速计算摩阻流速的经验公式。本文针对当前山区卵砾石河道, 通过室内试验资料, 探求对于山区卵砾石河床计算摩阻流速的适宜方法。

1 试验概况

试验在四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室长 11.5 m、宽 0.60 m、深 0.80 m 的平底

基金项目: 国家自然科学基金(50409012, 50579041, SRG7001953)

作者简介: 王宪业(1982—)男, 河北冀州人, 硕士研究生, 从事水力学及河流动力学研究。E-mail: wxye2000@tom.com

通讯作者: 王协康(1970—)男, 江西吉安人, 研究员, 从事水力学及河流动力学研究。E-mail: wangxiakang@163.com

水槽中进行。本次试验共有 13 组,测试断面及垂线布置见图 1,各组水沙条件见表 1。试验测试段在水槽中段,有效试验段长 1 m,测试段各断面位置为:沿起始段下游 0.2 m(M1),0.4 m(M2),0.6 m(M3);每个断面上 5 条垂线分别距离槽壁 10 cm(1 号),20 cm(2 号),30 cm(3 号),40 cm(4 号),50 cm(5 号)。每条垂线上测点间距自水面向下逐渐加密,在床面 1 cm 范围内最小间距为 1 mm。各组次初始床沙均保持平铺状态,使个别颗粒运动,以达到重塑河床的目的。

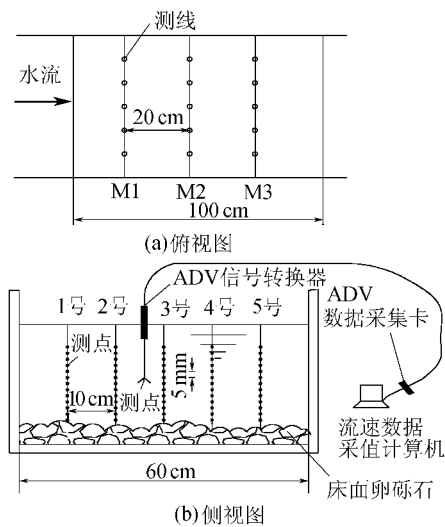


图 1 试验测试布置

表 1 试验水沙条件及参数

组次	床沙粒径/ mm	分析 断面	H/ cm	Q/ (L·s ⁻¹)	R/ cm	K _s D ₅₀ / cm	Fr	H/ D ₅₀
1		M1	50.2	83.3	19		0.16	
		M2	50.1	83.3	19		0.16	
2		M1	29.3	84.2	15		0.35	
		M2	29.3	84.2	15		0.35	
3	2	M1	42.0	74.9	18	0.2	0.18	210
	2	M2	42.0	74.9	18	0.2	0.18	210
4	5	M1	37.0	84.9	17	0.5	0.25	74
	5	M2	37.0	84.9	17	0.5	0.25	74
5	10	M1	24.5	78.1	13	0.5	0.42	49
	10	M2	24.7	78.1	14	0.5	0.41	49.4
6	10	M1	30.7	71.7	15	1	0.33	30.7
	10	M2	30.7	71.7	15	1	0.33	30.7
7	10	M1	17.4	71.7	11	1	0.73	17.4
	10	M2	18.1	71.7	11	1	0.65	18.1
8	10	M1	16.7	77.6	11	1	0.79	16.7
	10	M2	17.1	77.6	11	1	0.77	17.1
9	10	M1	18.0	76.9	11	1	0.78	18
	10	M2	18.0	76.9	11	1	0.77	18
10	20	M1	31.0	61.2	15	2	0.25	15.5
	20	M2	31.0	61.2	15	2	0.25	15.5
11	20	M1	28.6	72.3	15	2	0.35	14.3
	20	M2	29.0	72.3	15	2	0.34	14.5
12	20	M1	18.4	76.8	11	2	0.71	9.2
	20	M2	19.5	76.8	12	2	0.69	9.75
13	20	M1	17.9	77.2	11	2	0.76	8.95
	20	M2	17.2	77.2	11	2	0.79	8.6

的,但并不产生大量泥沙颗粒外移到测试段外。槽首设置阀门及静水池,流量控制采用矩形堰,测试段尾部设置尾水阀门以调节水深,水槽导轨上安置声学多普勒测速仪(ADV)。

2 计算方法的选取

当前,摩阻流速计算方法众多,本文针对山区卵砾石河床的特点,初选 6 种方法进行比较,见表 2。

表 2 计算方法选取

方 法	公 式	限制因素
1. 对数流速分布回归法	$\frac{u}{U^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y}{\kappa_s} \right) + B$	复杂情况下对数流速分布不总是与实际测量值符合
2. 外延雷诺应力分法	$\tau = \tau_0 \left(1 - \frac{y}{h} \right)$	紊流区雷诺应力符合线性分布的高度范围确定变得有些困难
3. 三维紊动能法	$\tau_0 = 0.5 C_1 \rho (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$	计算 U* 紊动能的水深范围选取有困难
4. 垂向紊动能法	$\tau_0 = C_2 \rho \overline{w'^2}$	计算 U* 紊动能的水深范围选取有困难
5. 拖曳力法	$\tau_0 = \rho C_d U^2$	主要困难在于拖曳力系数不是一个常数
6. 韩其为经验公式法	$\frac{U}{u^*} = \frac{V}{\sqrt{gDJ}} = 6.5 \left(\frac{H}{D} \right)^{\frac{1}{4 + \lg \frac{H}{D}}}$	不同床面条件水深和粗糙度的确定有难度

对于卵砾石河床下的恒定均匀流,通过测量河道的坡降或水力半径,计算摩阻流速最普遍的方法是以河床坡降为参数。由于卵砾石床面泥沙颗粒的排列极不规则,暴露和隐蔽的作用相当明显,三维水流结构平均意义上的坡降概念在局部范围内不存在,因此该方法的应用存在一定困难,只能作为大尺度范围内的摩阻流速估计。本试验中测得时均流速分布存在两种形式(图 2 与图 3),对于近似为对数分布的情况可以采用对数律法,即表 2 中的方法 1,即使是近似满足对数流速分布的河道,随着床面粗糙度的增加,床面附近的流速梯度增大,近壁处水流的紊动强度明显增强。对于偏离对数流速分布的情况,还是对符合对数律的部分应用该方法进行比较,以考察其普适性。因此,在卵砾石河道内使用方法 1 确定摩阻流速需要更严格的讨论。如 Nezu 等^[10]认为只有 20% 的水深范围适用对数律;Katul 等^[11]指出对于浅水或粗糙床面条件,平均流速分布并不总是满足于对数律。

若雷诺应力分布足够接近线性,根据方法 2 将粗糙层以上的雷诺应力分布外延至平均河床高度,则提供了一条估算摩阻流速的途径^[12]。如果受床面形态影响雷诺应力偏离线性分布,该法则不能适用。由于 ADV 使高精度的紊动测量成为可能,因此以前用于海洋学的与紊动量相关的方法 3 和方法 4

□1号垂线 ○2号垂线 △3号垂线 ▽4号垂线 ◇5号垂线

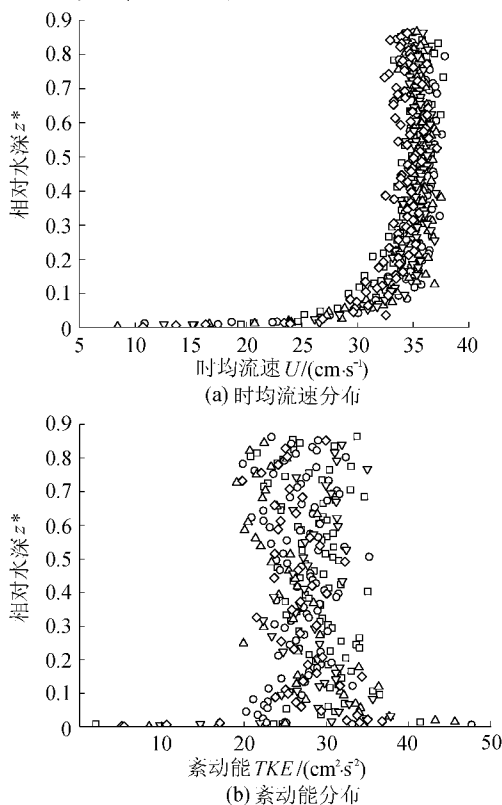


图2 光滑床面时均流速和紊动能分布(试验组次1)

□1号垂线 ○2号垂线 △3号垂线 ▽4号垂线 ◇5号垂线

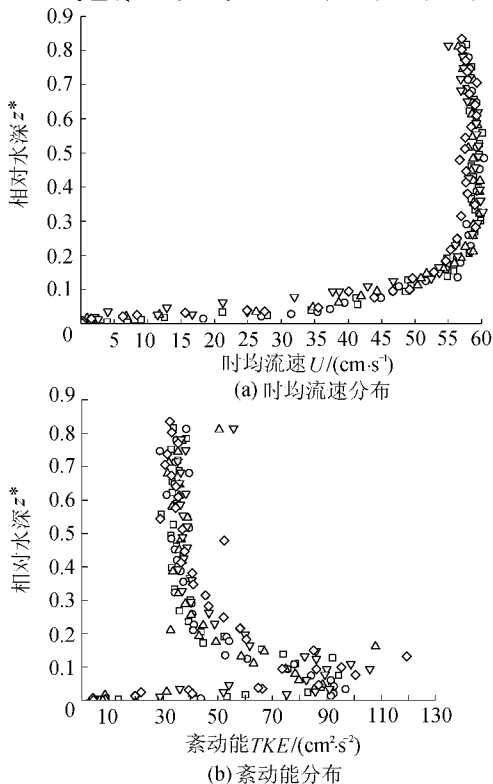


图3 粗糙床面时均流速和紊动能分布(试验组次6)

也可以计算摩阻流速。然而,关于移植该方法的机理必须对其作出更精确的论证,如 Kim 等^[13]倾向于认为仪器噪声误差带来的影响将会引起紊动能偏差。由于本次试验中河床的泥沙颗粒均处于起动的

临界状态,为此拟采用方法 5(拖曳力法)和方法 6(韩其为经验公式法)来计算。

图 4 和图 5 表明,沿水深的紊动强度增大,流速曲线偏离对数分布,紊动能在 0.2 倍水深附近发生突变^[14],伴随着流速的“尖钉”现象,说明那里存在着强烈的水流紊动,尽管雷诺应力的分布符合线性,但紊动能与光滑床面的分布有着显著不同。

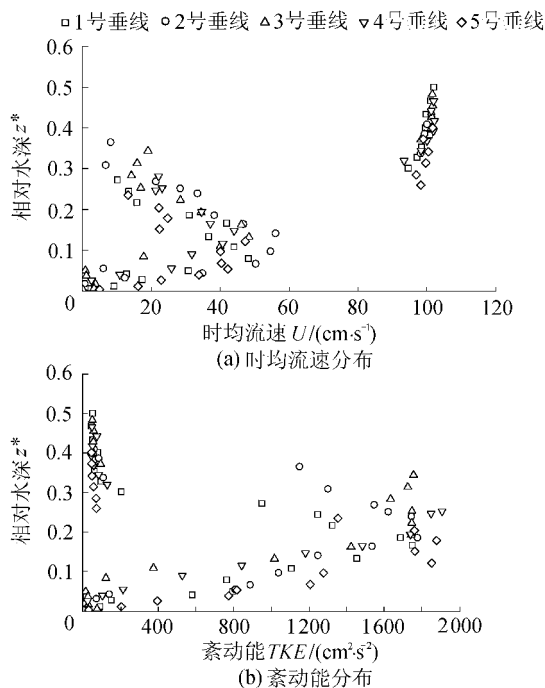


图4 时均流速和紊动能沿水深分布(试验组次12, $K_s = 4\text{ cm}$)

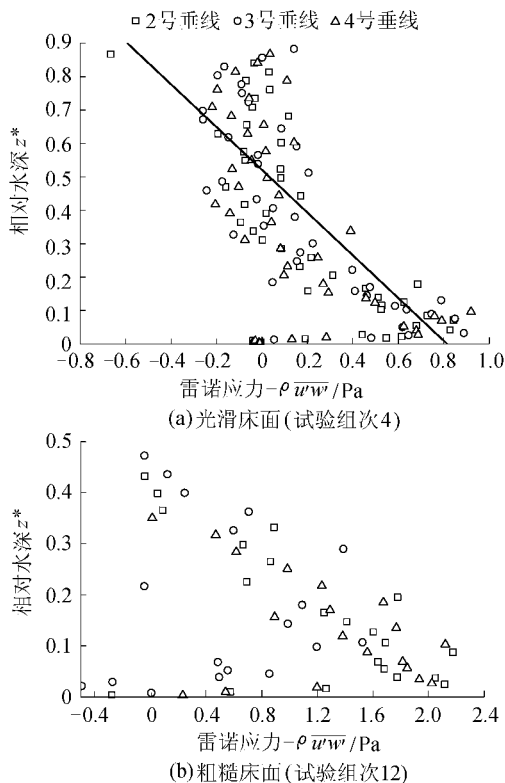


图5 不同床面雷诺应力分布

3 计算结果分析

应用表 2 中的 6 种方法计算各种工况条件下的摩阻流速,由于缺乏直接量测床面剪切力的资料,暂以在卵砾石河床广泛应用的韩其为公式(方法 6)计算结果作为参考,针对本次试验的拟合情况见图 6。

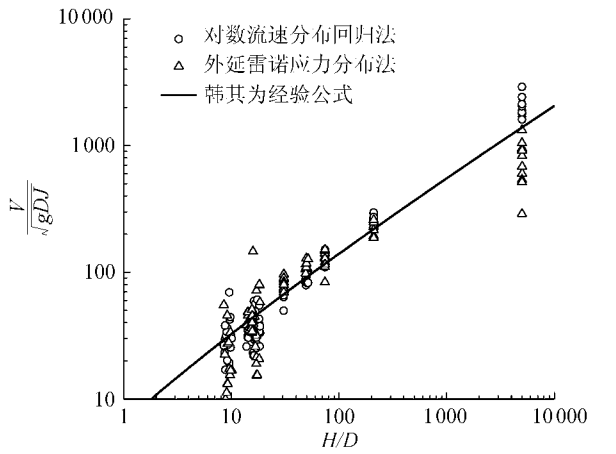
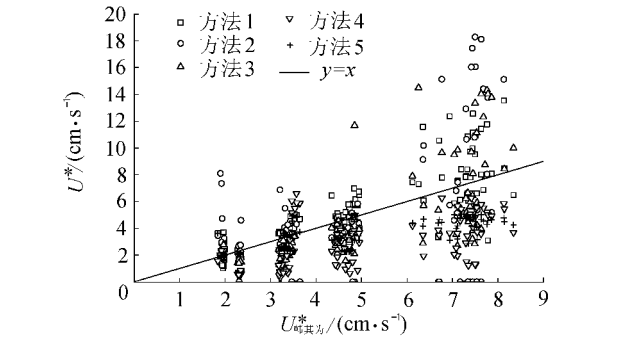


图 6 床面切应力计算结果比较

对摩阻流速计算结果加以比较,见表 3。对于前 5 个组次,近壁处水流紊动强度较弱,各种 U^* 计算方法结果均方差较小,对数流速分布回归法和外延雷诺应力分布法较其他结果为大,外延雷诺应力分布法的均方差最大,为 2.15;以紊动能为参数的计算结果偏小,计算值波动范围较大,见图 7,当床沙级配范围很广、河床可以移动并且存在床面形态时很难精确定义代表床沙粗糙高度的代表粒径。随着河床粗糙程度的增加,近壁处水流紊动强度增强,各方法均方差也相应增大,最大达到了 8.84。由于各个试验工况下拖曳力系数取一确定值,故其结果波动范围小。

水槽试验是研究明渠水流特性的基本手段,而时均流速的半对数分布对水槽底部的起始位置是十



分敏感的,如何确定床面位置这一问题长期困扰着研究者们^[15-17]。事实上,大多数研究者对于光滑床面多是直接测量床面位置,对于沙质平整床面则采用经验方法,对于有沙波的明渠流动,确定床面位置将更加困难。当床面粗糙时,河床表面有明显的起伏不平,对于对数流速分布公式,这时理论上的平均床面已不在突起物的最高平面,而是在这个平面以下相当于 mK_s 的地方。尽管本次试验中粗糙床面时均流速分布已偏离对数律,但其回归值与韩其为公式的结果接近。从表 4 计算结果对比可以看出,当床面剪切力较小时,各计算方法所得结果相对接近。随着床面的粗糙和水流条件的改变,在床面剪切力增大的同时计算结果差别增大,从表 3 可以看出,方法 2 计算的结果与其他方法的结果差别很大,可能是由于床面粗糙引起近底水流流速的三维化,并沿水深向上影响雷诺应力的分布。

上述分析表明,卡门常数 κ 、水力半径 R 、绝对粗糙度 K_s 、摩阻流速 U^* 4 者之间相互关联,但 4 个参数都没有确定性的理论值,需从试验测量中得到,而试验的流速分布还会受理论床面位置的影响。因此,各种间接计算摩阻流速的方法差别较大,卵砾石床面条件下局部范围内摩阻流速的精确估算将需要高精度的仪器才能得出可靠的 U^* 值。

表 3 各方法摩阻流速计算结果

组次	$Q/(L \cdot s^{-1})$	各方法 $U^*/(cm \cdot s^{-1})$											
		方法 1		方法 2		方法 3		方法 4		方法 5		方法 6	
		均值	均方差	均值	均方差	均值	均方差	均值	均方差	均值	均方差	均值	均方差
1	83.3	1.40	0.22	1.96	1.54	2.29	0.20	2.13	0.25	1.94	0.03	2.01	0.03
2	84.2	3.35	0.25	3.91	2.15	2.75	0.09	2.14	0.11	3.08	0.62	3.04	0.61
3	74.9	2.14	0.14	2.34	1.12	1.60	0.19	0.64	0.10	2.32	0.02	2.08	0.02
4	84.9	3.43	0.26	3.36	1.54	1.94	0.55	0.91	0.31	3.25	0.06	2.60	0.05
5	78.1	5.24	0.51	3.82	0.31	2.26	0.66	0.99	0.36	4.70	0.06	3.59	0.05
6	71.7	4.79	0.66	3.30	0.66	3.75	0.76	2.53	0.85	4.47	0.06	3.21	0.04
7	71.7	8.16	2.47	6.98	7.06	5.25	1.94	3.06	1.09	6.72	0.48	4.40	0.31
8	77.6	9.38	2.62	7.71	7.92	5.72	1.49	3.80	1.41	7.32	0.13	4.84	0.09
9	76.9	9.43	2.20	7.34	8.84	6.50	3.80	3.23	1.74	7.38	0.23	4.92	0.15
10	61.2	4.30	0.63	3.79	0.51	3.32	0.13	2.55	0.27	3.52	0.07	2.30	0.04
11	72.3	5.92	0.68	4.86	0.53	4.03	0.56	3.27	0.77	4.82	0.13	3.11	0.09
12	76.8	7.82	2.91	10.38	5.34	11.56	2.04	5.56	0.47	7.42	0.38	4.49	0.24
13	77.2	8.68	2.10			13.00	2.39	5.42	0.87	7.68	0.63	4.59	0.37

表4 粗糙与光滑床面条件下摩阻流速计算结果对比

垂线号	摩阻流速计算值/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)											
	方法1		方法2		方法3		方法4		方法5		方法6	
	粗糙床面	光滑床面	粗糙床面	光滑床面	粗糙床面	光滑床面	粗糙床面	光滑床面	粗糙床面	光滑床面	粗糙床面	光滑床面
M0101	8.93	4.60	18.12	3.13	14.51	3.97	5.77	2.58	4.66	3.26	7.74	4.54
M0102	7.55	4.54			14.05	4.17	5.45	3.07	4.49	3.27	7.53	4.56
M0103	6.86	4.46			8.44	2.44	3.69	1.19	4.26	3.21	7.12	4.47
M0104	13.54	6.45	23.09	3.30	10.01	4.04	4.26	2.30	4.59	3.12	7.68	4.34
M0105	7.29	4.89	22.06	2.87	15.58	2.73	6.60	1.27	4.88	3.18	8.13	4.43
M0201	8.01	4.75			15.70	4.52	5.88	3.54	3.73	3.20	6.25	4.46
M0202	8.47	4.47			13.06	4.26	5.17	3.22	4.54	3.20	7.63	4.46
M0203	9.03	4.76	4.31	4.36	11.91	4.17	5.90	3.26	4.83	3.24	8.14	4.52
M0204	6.48	5.12			14.62	2.85	6.05	1.84	4.93	3.21	8.26	4.47
M0205	10.66	3.94	10.95	4.20	12.12	4.31	5.48	3.04	4.97	3.20	8.34	4.46

4 结 语

本文以室内试验水槽数据为依据 ,分析比较了 6 种间接计算山区卵砾石河床摩阻流速的方法 ,结果表明 :床面相对光滑、时均流速沿水深分布近似为对数时 ,计算摩阻流速的方法所得均方差最大值为 2.15 ,其中对数流速分布的回归方法和三维紊动能法具有较高的准确性和稳定性 ;床面粗糙、水流紊动较强烈时 ,时均流速沿水深的分布相当复杂 ,各种计算摩阻流速的方法所得均方差最大达到 8.84 ,其中对数流速分布回归法和三维紊动能法较准确。

在卵砾石河床条件下 ,由于河床表面的高度不规则 ,在天然河道内的平均坡降概念局部范围内不复存在 ,暴露和隐蔽的现象层出不穷 ,摩阻流速在局部的变化较大 ,对数律中的卡门常数、河床理论床面的位置和床沙的绝对粗糙高度的精确定义有待进一步研究确定 ,几个参数相互关联 ,对摩阻流速的计算值影响较大。

参考文献 :

[1] WILCOCK P R. Estimating local bed shear stress from velocity observations[J]. Water Resources Research ,1996 ,32(11) : 3361-3366.

[2] KRISHNAPPAN B G ,ENGEL P. Distribution of bed shear stress in rotating circular flume[J]. Journal of Hydraulic Engineering American Society of Civil Engineers 2004 ,130(44) 324-331.

[3] 韩其为. 泥沙起动规律及起动流速[J]. 泥沙研究 ,1982 (2) :11-26.

[4] McLELLAND S J ,NICHOLAS A P. A new method for evaluating errors in high-frequency ADV measurements[J]. Hydrological Processes ,2000 ,14 351-366.

[5] DIETRICH W E ,WHITING P. Boundary shear stress and sediment transport in river meanders of sand and gravel[J]. Water Resources Monograph ,1989 ,12 1-50.

[6] NIKORA V ,GORING D. Flow turbulence over fixed and weakly

mobile gravel beds[J]. Journal of Hydraulic Engineering , ASCE 2000 ,126(9) 679-690.

[7] 刘春晶 ,李丹勋 ,王兴奎. 明渠均匀流的摩阻流速及流速分佈[J]. 水利学报 2005 ,36(8) 950-955.

[8] SCHLICHTING H. Boundary layer theory[M]. 7th Edition. New York :McGraw-Hill ,1987.

[9] 韩其为. 泥沙起动规律及起动流速[M]. 北京 :科学出版社 ,1999 :104-109.

[10] NEZU I ,NAKAGAWA H. Turbulence in open-channel flows [M]. Balkema :Rotterdam ,1993.

[11] KATUL G ,WIBERG P ,ALBERTSON J ,et al. A mixing layer theory for flow resistance in shallow streams[J]. Water Resources Research 2002 ,38(11) :1250.

[12] CAMPBELL L ,McEWAN I ,NIKONRA V ,et al. Bed-load effects on hydrodynamics of rough-bed open-channel flows [J]. Hydraul Eng 2005 ,131(7) 576-585.

[13] KIM S C ,FRIEDRICHS C T ,MAA J P Y ,et al. Estimating bottom stress in tidal boundary layer from acoustic Doppler velocimeter data[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,2000 , 126(5) 399-406.

[14] 白玉川 ,许栋 ,张雪岩. 冲积床面上明渠水流湍流特性及其与底层泥沙起动关系的试验研究[J]. 自然科学进展 2005 ,15(4) 439-445.

[15] 卢金友 ,徐海涛 ,姚仕明. 天然河道水流紊动特性分析 [J]. 水利学报 2005 ,36(9) :1029-1034.

[16] 杨斌 ,杨胜发. 大比降卵石河床水流运动试验研究[J]. 水动力学研究与进展 :A 辑 2005 20(2) 207-213.

[17] 郑钧 ,张超 ,李万友 ,等. 卵石河流的时均流速和悬沙浓度垂线分佈[J]. 水力发电学报 2006 25(3) 32-35.

(收稿日期 2006-10-18 编辑 :高建群)

