

泥沙影响流速分布规律的试验研究

周家俞¹, 陈立², 叶小云³, 吴门伍², 黄荣敏²

(1. 重庆交通学院西南水运工程科学研究所, 重庆 400016; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;
3. 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010)

摘要: 挟沙水流中泥沙颗粒的存在将影响水流的紊动结构, 并进一步影响水流流速分布。采用超声流速仪 MicroADV 测量挟沙水流的时均流速沿垂线分布, 分析了在不同水力条件、不同泥沙条件(包括泥沙浓度及颗粒粒径)下泥沙与水流相互作用对流速沿垂线分布的影响, 在此基础上, 考虑到现有流速分布公式在实际河道水流流速沿垂线分布中的应用, 提出新的指数型流速分布公式形式; 并根据实验资料, 初步检验了该公式的精度, 同时分析了指数型流速公式中系数 k 和指数 m 随泥沙浓度 s 、粒径 d 以及水力条件的变化规律。结果表明: 系数 k 随泥沙浓度的增加而增大, 同时水力条件以及泥沙颗粒粒径同样也影响着 k 的变化; 而指数 m 随粒径 d 的增大而减小, 随泥沙浓度 s 的增加而增大。

关键词: 挟沙水流; 流速分布; 含沙量; 泥沙粒径; 试验研究

中图分类号: TV143.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2005)04-0506-05

挟沙水流流速沿垂线的分布是挟沙水流理论研究中的重要问题之一。Prandtl^[1]、Coleman^[2]、Zagustin^[3]、Bazin^[4]、张红武^[4]等通过不同的混合掺长得到较多的半经验半理论的研究成果, 除常见的对数流速分布公式外, 还有双曲正切函数、抛物线、指数分布等形式。20 世纪 20 年代, Coleman 和 Prandtl 通过因次分析提出了指数流速分布公式, 钱宁等^[5]提出的指数流速分布公式中考虑了颗粒之间粘结力的影响, 陈永宽^[6]提出的指数流速分布公式形式简单。

近期的研究工作已经发现, 泥沙与水流的相互作用将会影响到挟沙水流的流动结构, 包括紊动结构、流速沿垂线的分布等。实际上陈永宽公式中指数 m 在 $1/6 \sim 1/8$ 之间变化在一定程度上反映出这种影响。本文将采用 MicroADV 流速仪测量挟沙水流流速沿垂线的分布, 分析泥沙与水流相互影响对流速分布的影响, 进而提出考虑这种影响的流速分布公式。

1 试验条件

试验在宽、高均为 0.5 m, 长为 33 m 的可变底坡的玻璃水槽中进行。试验沙采用黄河天然沙及长江天然沙两种, 泥沙为均匀沙, 粒径为 0.033 ~ 0.088 mm。实验中控制床面处于冲淤平衡状态。

流速采用超声流速仪 (MicroADV) 测量, 超声测速的原理是 Doppler 效应^[7]:

$$F_{\text{Doppler}} = - 2 F_{\text{source}} (V / C)$$

式中 F_{Doppler} 为接收频率的变化 (Doppler 效应); F_{source} 为发射相位的频率; C 为声速; V 为发射探头与接收控制体积的相对速度。

收稿日期: 2004-03-23; 修订日期: 2004-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50479036); 国家重点基础研究发展计划 (973) 资助项目 (2003CB415205); 湖北省创新群体基金项目 (2003ABA195); 博士点基金项目

作者简介: 周家俞 (1979 -), 男, 重庆巴南人, 硕士, 主要从事水力学及河流动力学研究。

E-mail: cqjy1979@163.com

试验观测了不同条件(包括粒径、浓度、流量和比降)下沿垂线不同点的水流流速、泥沙浓度。挟沙水流的实验参数见表 1。

表 1 挟沙水流的实验参数

Table 1 Parameters of experiments in sediment-laden flow

序号	系列	粒径 <i>d</i> /mm	流量 <i>Q</i> /(L·s ⁻¹)	水深 <i>h</i> /cm	比降 <i>J</i> /10 ⁻³	温度 <i>T</i> /	雷诺数 <i>Re</i> /10 ⁵	浓度 <i>S</i> /(kg·m ⁻³)	摩阻流速 <i>U*</i> /(cm·s ⁻¹)	备注 (用沙)
1	716	0.033	75.4	10.8	4.5	28.0~31.0	1.25~1.33	0~8.95	6.90	黄河沙
2	717	0.080	75.6	10.8	4.5	29.0~31.0	1.28~1.33	0~10.6	6.90	长江沙
3	727	0.070	57.9	11.0	3.0	30.0~33.0	1.0~1.06	0~11.7	5.69	长江沙
4	729	0.033	45.7	11.9	1.5	30.0~35.0	0.77~0.85	0~11.7	4.18	黄河沙
5	730	0.070	41.8	11.8	1.5	31.0~35.0	0.72~0.78	0~7.45	4.16	长江沙
6	731	0.080	46.1	11.9	1.5	30.5~33.0	0.78~0.82	0~7.75	4.18	长江沙
7	0109-1	0.088	29.2	12.4	0.5	13.0	0.30	0.6~2.93	2.46	长江沙
8	0109-2	0.088	48.6	10.9	1.0	13.5	0.57	0.67~3.95	3.27	长江沙
9	0110-1	0.088	43.1	11.9	1.5	14.0	0.49	0.89~5.64	4.18	长江沙
10	0110-2	0.088	47.4	11.9	2.0	15.0	0.56	1.41~8.31	4.83	长江沙

2 试验资料分析

2.1 不同泥沙粒径、浓度挟沙水流流速分布

相同水流条件下,对粒径小于 0.03 mm 的细颗粒(717 系列),泥沙浓度增加,流速分布没有明显的变化,流速梯度基本不变;对颗粒粒径为 0.065~0.09 mm 的泥沙颗粒(820 系列),泥沙浓度增加,挟沙后主流区流速有所增加,流速梯度增大,近壁区没有明显的变化;对于粒径小于 0.25 mm 的粗颗粒(729 系列),浓度增加,主流区流速有所增加,流速梯度增大,近壁区没有明显的变化^[8](图 1), Jim Best^[9]、M. Muster^[10]实验发现,当保持流量、比降不变时,增加含沙量,流速明显增大。

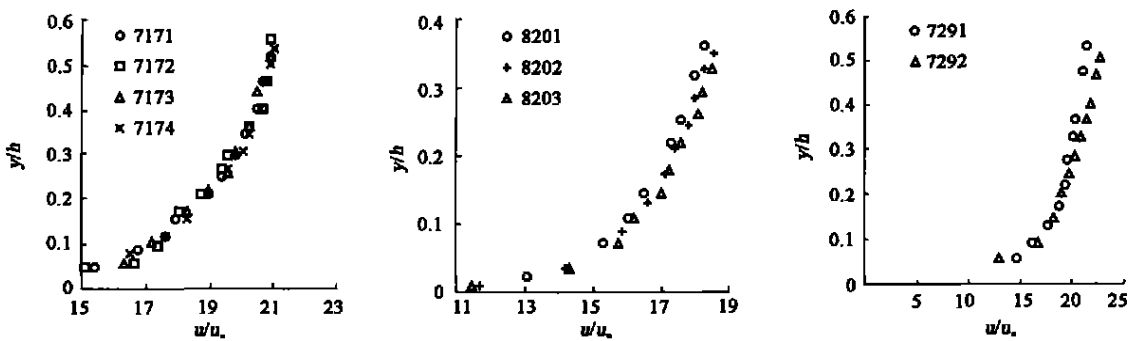


图 1 不同粒径挟沙水流流速分布

Fig. 1 Velocity distribution with different sediment particles in sediment-laden flow

在相同水流条件和相同粒径条件下,浓度增加,主流区水流流速明显增大,近壁区没有明显变化,如图 2 所示。

2.2 挟沙水流流速分布公式

陈永宽指数型公式形式简单,用本文试验资料进行验证,结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,在近壁区计算值与实测值吻合较好,而主流区偏差较大。这说明泥沙条件的影响在公式中还没有得到充分反映。本文提出如下形式的挟沙水流流速沿垂线分布式

$$\frac{u}{u_*} = k \left(\frac{y}{h} \right)^m \tag{1}$$

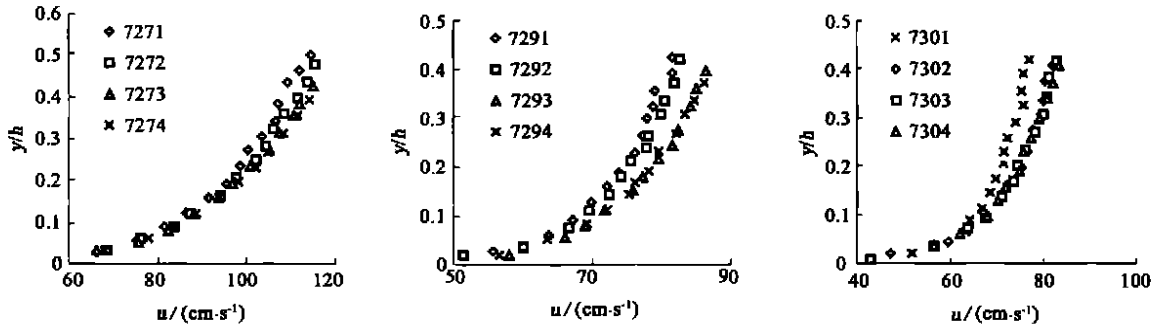


图2 不同浓度挟沙水流流速分布

Fig.2 Velocity distribution with different sediment concentration in sediment-laden flow

图4是729、717和727测次实测流速与计算流速的对比,结果表明二者吻合较好。

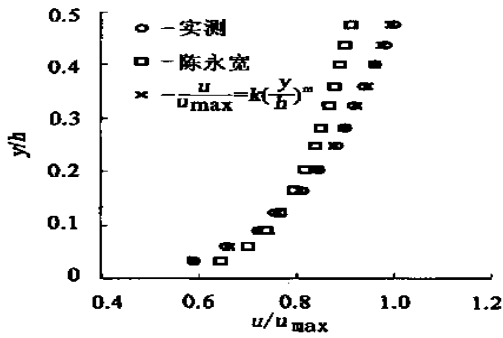


图3 流速公式验证与比较

Fig.3 Testing of velocity distribution formula and comparison

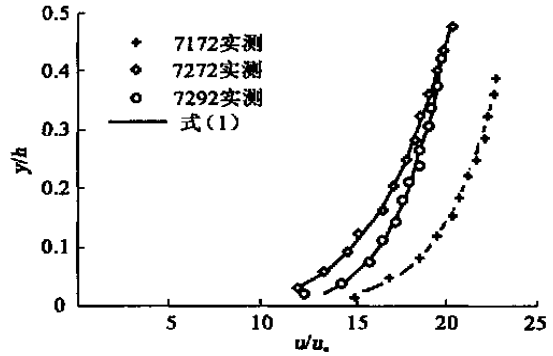


图4 实测流速分布与式(1)比较

Fig.4 Comparison of measured velocity distribution and formula(1)

3 对公式(1)中参数的讨论

3.1 系数 k

图5点绘了731、729系列系数k与泥沙浓度s的关系,结果表明系数k随泥沙浓度s增加而增大。731系列的浓度由3.83增加到4.33 kg/m³,系数k从23.56增加到23.78;729系列的浓度由2.16增加到8.27 kg/m³,系数k由21.74增加到23.39。

图6给出了716系列系数k与泥沙浓度s的关系。当泥沙浓度s从0增加到8.95 kg/m³,系数k先随浓度增加而增加,达到最大值以后,随浓度的进一步增加逐渐减小。

图7表明除了浓度以外,还有其他因素(水力条件和泥沙颗粒粒径)也将影响系数k。

3.2 指数 m

(1) 泥沙浓度s对指数m的影响 图8中点绘了挟沙后不同测次流速分布曲线,其中727系列的m分别为0.1864、0.1955、0.2044,729系列的m分别为0.1267、

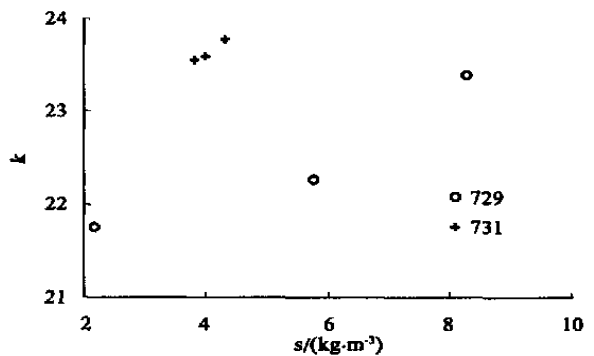


图5 泥沙浓度对系数k的影响

Fig.5 Effect of sediment concentration s on coefficient k

后不同测次流速分布曲线,其中727系列的m分别为0.1864、0.1955、0.2044,729系列的m分别为0.1267、

0.1323、0.1369。可以看出在水力条件相同的情况下，浓度增加，指数 m 也变大。

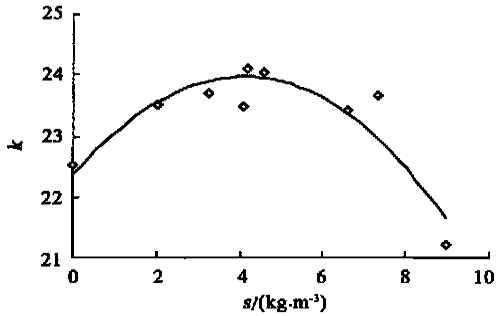


图 6 716 测次泥沙浓度对系数 k 的影响

Fig. 6 Effect of sediment concentration on coefficient k in NO. 716

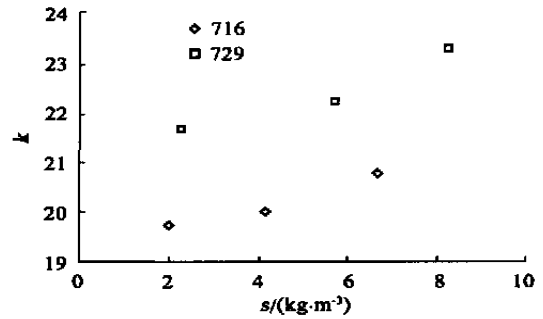


图 7 水力条件对系数 k 的影响

Fig. 7 Effect of hydraulic condition on coefficient k

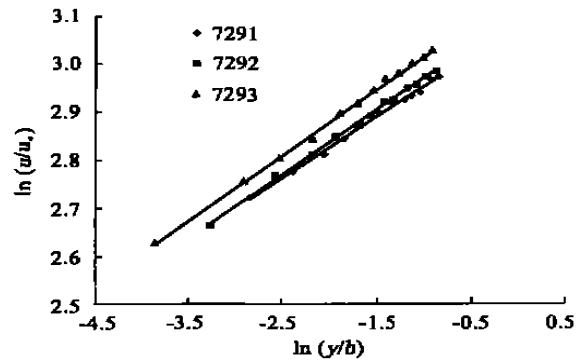
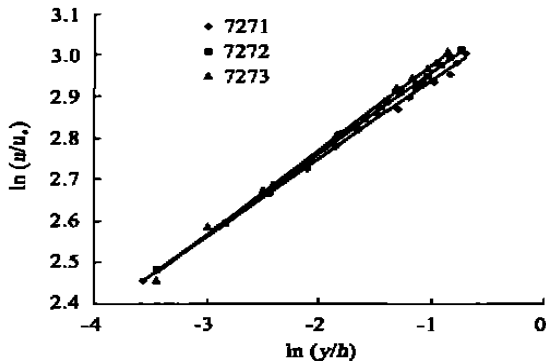


图 8 不同浓度挟沙水流流速分布

Fig. 8 Velocity distribution with different sediment concentration in sediment-laden flow

(2) 颗粒粒径 d 对指数 m 的影响 图 9 中给出水力条件及泥沙浓度相同、颗粒粒径不同 (粒径分别为 0.033 mm 和 0.08 mm) 的两个测次的流速分布曲线, 其中 7163 和 7173 测次的 m 分别为 0.1326 和 0.1134, 7163 和 7173 测次的 m 分别为 0.1486 和 0.1305。表明指数 m 随颗粒粒径 d 增大而减小。

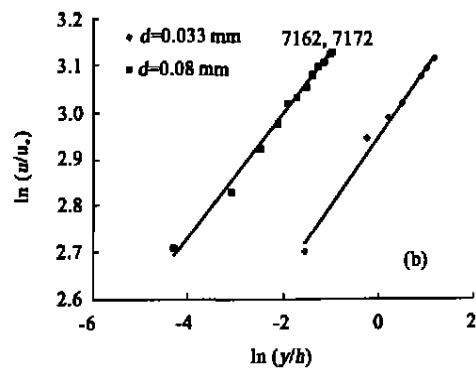
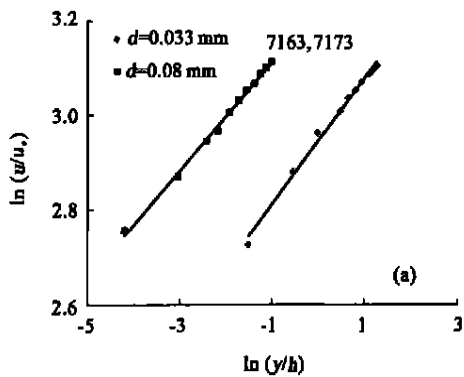


图 9 不同粒径挟沙水流流速分布

Fig. 9 Velocity distribution with different sediment particles in sediment-laden flow

4 结 论

(1) 不同浓度、不同粒径泥沙对挟沙水流流速的影响不同, 现有的指数型流速分布公式不能完全反映泥沙对挟沙水流流速分布的影响。本文提出了新的指数型流速分布公式, 实测资料检验表明, 公式与实测资料比较吻合。

(2) 相同或相近的水力条件下, 指数流速分布公式中系数 k 随泥沙浓度 s 的增加而增大, 泥沙颗粒和水力条件也影响系数 k 。

(3) 在水力条件、泥沙浓度相当的情况下, m 随粒径 d 的增大而减小; 相同或相近的水力条件下, 指数 m 随泥沙浓度 s 的增加而增大。

参考文献:

- [1] Kandula V N sarma, Lakshminarayana P, Lakshmana Rao N S. Velocity Distribution in Smooth Rectangular Open Channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983, 109(2):270 - 289.
- [2] Coleman N L. Velocity profiles with suspended sediment[J]. Journal of Hydraulic Research, 1981, 19(3):211 - 229.
- [3] Zagustin A, Zagustin K. Analytical Solution for Turbulent Flow in Pipe[J]. La Houille Blanche, 1969(2):113 - 118.
- [4] 张红武. 挟沙水流流速的垂线分布公式[J]. 泥沙研究, 1995(2):1 - 9.
- [5] 钱 宁, 万兆惠. 近底高含沙量流层对水流及泥沙运动影响的初步探讨[J]. 水利学报, 1965(4):1 - 19.
- [6] 陈永宽. 悬移质含沙量沿垂线分布[J]. 泥沙研究, 1984(1):31 - 40.
- [7] 林 鹏, 陈 立. MicroADV 及其在挟沙水流中的应用研究[A]. 第四届全国泥沙理论学术讨论会论文集[C]. 成都:四川大学出版社, 2000. 393 - 398.
- [8] 林 鹏, 陈 立. 低含沙水流紊动结构的实验研究[J]. 水动力学研究与进展, 2003(3):209 - 216.
- [9] Jim Best. Turbulence modulation and particle velocity over flat sand beds at low transports[J]. J Hydraulic Research, 1997, 123(12):1118 - 1129.
- [10] Muster M, Parthasarathy Rn, Patel V C. Velocity profiles for particles and liquid in open channel flow with suspended sediment[J]. J Hydraulic Research, 1997, 123(9):743 - 751.

Experimental study on effect of sediment on velocity distribution in sediment-laden flow*

ZHOU Jia-yu¹, CHEN Li², YE Xiao-yun³, WU Men-wu², HUANG Rong-min²

(1. Chongqing Communication University, Southwestern Hydraulic Engineering Research Institute for Waterway, Chongqing 400016, China;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. Survey the Planning and Design Research Institute of the Yangtze River Conservancy Committee, Wuhan 430010, China)

Abstract: The turbulent structure and the vertical distribution of the velocity of sediment-laden flow would be effected by the sediment condition including sediment particles diameters and concentration. In this paper, the MicroADV is used to measure the mean velocity distribution of sediment-laden flow. It analyzes the influence of interaction between the sediment particles and flow on the distribution of the velocity of the flow with the different sediment condition and flow intensity. By verifying the application of the existing distribution formula with the experimental data, a new formula of exponential of the velocity distribution is proposed, at the same time, the variational law of coefficient (k) and index (m) in the new formula with the sediment concentration (s), the diameter of particles (d) and the hydraulic condition is analyzed. It is concluded that the k increases with the increasing sediment concentration, the hydraulic condition and the diameter of particles. However, the m decreases with the increasing diameter of particles, and increases with the increasing sediment concentration.

Key words: sediment-laden flow; velocity distribution; sediment concentration; diameter of particles; experimental study

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50479036).