

文章编号:0559-9350(2006)10-1175-06

## 高低含沙水流流速分布的统一规律

舒安平<sup>1,3</sup>,刘青泉<sup>2</sup>,费祥俊<sup>3</sup>

(1. 北京师范大学水科学研究院,水沙科学教育部重点实验室,北京 100875;

2. 中国科学院力学研究所,北京 100080; 3. 清华大学水沙科学教育部重点实验室,北京 100084)

**摘要:**作为自然界中普遍存在的一种典型的固液两相流,挟沙水流流速分布具有与清水不同的变化规律。本文明确挟沙紊流(无流核)为研究对象,通过天然沙挟沙水流流速试验,首先分析紊动状态下高、低含沙水流流速分布特点;在此基础上,通过引入同时反映含沙量和颗粒级配影响的相对黏度指标,分析高、低含沙紊流的卡门常数  $\kappa$  统一规律及其表达式,由此将高、低含沙水流流速分布统一于卡尔曼-勃兰德对数流速分布公式上,并应用室内粉煤灰等试验资料分别验证了卡门常数  $\kappa$  及卡尔曼-勃兰德对数流速分布公式的合理性和可靠性;本项研究成果对进一步揭示高、低含沙水流的水流结构与输沙机理以及对河道整治规划设计具有重要的现实意义。

**关键词:**挟沙水流;高含沙水流;流速分布;卡门常数  $\kappa$

**中图分类号:**TV143

**文献标识码:**A

挟沙水流普遍存在于天然河道和人工渠道之中,一般可简单地按含沙量的大小将其划分为高、低含沙水流。对于处在紊动状态下的挟沙水流,无论含沙量的高低,其悬移运动主要取决于紊动作用与重力作用的对比消长结果,由此决定了挟沙水流运动的共同特点,而流速分布规律正是这一共同特点的具体体现。与清水相比,挟沙水流流速分布规律要复杂得多,它不仅与水流条件有关,而且泥沙的存在还反过来影响水流结构,导致能量转换和流速分布发生了改变。因此,挟沙水流的流速分布规律成为了河流动力学中的重要课题之一,一直受到学术界极大关注。

自20世纪80年代以来,前人已对紊动状态下挟沙水流垂线流速分布规律展开了大量的研究工作,取得许多很有意义的研究成果<sup>[1~13]</sup>,除了少数人认为挟沙水流垂线流速符合指数流速分布<sup>[13]</sup>以外,多数学者认为服从对数分布规律<sup>[1~12]</sup>,而且可将其公式形式划分为以下3种模式:其一是变  $\kappa$  模式,即仅卡门常数  $\kappa$  随水沙条件变化,目前持这种观点的人占大多数;其二是保持  $\kappa$  值不变而增加尾流项模式,即在流速分布公式中加进反映水沙条件变化的尾流项,coles<sup>[6]</sup>和 coleman<sup>[2]</sup>的公式即属此类;其三是同时考虑  $\kappa$  值和尾流项在挟沙水流中变化的混合模式,Ippen<sup>[7]</sup>等人的研究成果具有这种特点。对于后两种模式,尽管增加的尾流项对流速分布进行了合理化修正,但至少存在两点缺陷,其一是流速公式中无法反映高含沙水流运动特点的影响,特别是同时体现含沙量、颗粒级配及黏度等高含沙水流主要特征参数的作用;其二是公式的结构比较复杂,不利于实际应用。相比之下,变  $\kappa$  模式不仅可以弥补上述不足,而且一旦正确地确定  $\kappa$  值后的对数流速分布公式又显得十分简捷和实用,因而得到了人们广泛应用<sup>[11]</sup>。鉴于此,本文采用变  $\kappa$  模式的对数流速分布公式,通过水槽流速试验研究,首先分析高、低含沙水流流速分布特点,通过引入同时反映含沙量和颗粒级配影响的相对黏度指标,研究高、低含沙水流的卡门常数  $\kappa$  及其流速分布统一规律。本项研究成果不仅对进一步揭示高、低含沙水流的水流结构与输沙机理奠定基础,而且对丰富河流动力学学科内容、指导河道整治规划设计具有重要的现实意义。

收稿日期:2006-04-18

基金项目:教育部留学回国人员科研启动基金项目;北京师范大学科研启动基金项目(107023)

作者简介:舒安平(1965—),男,湖北鄂州人,副教授、博士,主要从事河流动力学、水沙灾害、水土保持与生态修复等的研究。

E-mail:shuap@bnu.edu.cn

## 1 问题的研究现状

**1.1 流速分布代表性公式** 在众多的变  $\kappa$  模式流速分布公式中,最有影响、应用最为广泛的莫过于卡尔曼—勃兰德对数流速分布公式<sup>[1]</sup>,即

$$\frac{u_{\max} - u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{y} \quad (1)$$

式中:  $u$ 、 $u_{\max}$  及  $u_*$  分别为深度  $y$  处的流速、最大流速及摩阻流速,  $h$  为水深。

另一方面,张红武<sup>[8]</sup>以紊流涡团模式为基础,通过理论推导和合理简化,得出如下适用于高低含沙紊流的流速分布公式

$$\frac{u_{\max} - u}{u_*} = \frac{\pi}{2C_n} - \frac{1}{C_n} \left[ \sqrt{\left(1 - \frac{y}{h}\right) \frac{y}{h}} + \arcsin \sqrt{\frac{y}{h}} \right] \quad (2)$$

式中: 涡团参数  $C_n$  与卡门常数  $\kappa$  有关,根据 Prandle 掺长模式及实测资料分析确定两者关系式为

$$C_n = 0.375 \kappa \quad (3)$$

张红武认为卡门常数  $\kappa$  与含沙量有关,并依据天然实测资料确定其表达式,详见后文公式(7)。

**1.2 卡门常数  $\kappa$  的几种表达式** 对于变  $\kappa$  模式的对数流速分布公式,最关键的问题是如何确定卡门常数  $\kappa$ 。目前常见的方法主要包括能量法、自动悬浮理论、河床形态法及含沙量法等 4 种。回顾前人代表性的研究成果,对进一步研究反映高、低含沙水流的  $\kappa$  常数统一公式具有重要的借鉴作用。

(1) 能量法。钱宁<sup>[12]</sup>通过应用大量的野外和室内实测资料建立卡门常数  $\kappa$  与水流功率系数  $E_o$  之间的关系,结果表明  $\kappa$  值随水流功率系数  $E_o$  增大而减小的变化规律。尽管这种关系尚难量化,但正是从这种能量角度引入反映密度梯度变化的 Richardson 数,才能将采用能量法确定卡门常数  $\kappa$  几种模式统一成以下函数关系。

$$\kappa = f(E_o) = f\left(\frac{r_s - r}{r} \sum \frac{S_i \omega_i}{UJ}\right) \quad (4)$$

(2) 自动悬浮理论。王尚毅<sup>[1]</sup>基于泥沙自动悬浮理论分析泥沙自动悬浮的条件,即沉速  $\omega < UJ$  时,  $\kappa < \kappa_o$ ; 而当  $\omega = UJ$  时,卡门常数  $\kappa = \kappa_o = f\left(\frac{U}{u_*}\right)$ ,与含沙量浓度  $S_v$  无关,由此得到卡门常数  $\kappa$  公式

$$\frac{1}{\kappa} = \frac{1}{\kappa_o} + 1.14 \frac{r_s - r_m}{r_m} \frac{\omega - UJ}{u_* J} S_v \quad (5)$$

(3) 河床形态法。秦荣昱<sup>[5]</sup>基于河床形态方法提出如下卡门常数  $\kappa$  公式

$$\kappa = \alpha_1 \left( Fr \frac{U}{\omega_{50}} \right)^{\beta_1} \quad (6)$$

式中:  $\alpha_1$ 、 $\beta_1$  与  $Fr$  有关,式(6)适用于平整河床。

(4) 含沙量法。作为一种经验处理,张红武<sup>[14]</sup>应用大量野外实测资料研究卡门常数  $\kappa$  随着含沙量  $S_v$  的变化规律,并建立两者之间的关系式,即:

$$\frac{\kappa}{\kappa_0} = 1 - 4.2 \sqrt{S_v} (0.365 - S_v) \quad (7)$$

## 2 试验概况

**2.1 试验系统** 挟沙水流流速测量试验是在室内长 16m、宽 0.5m、高 0.6m 的变坡水槽中进行的<sup>[11]</sup>,变坡水槽底坡可调范围为 0%~2%,最大流量  $Q_{\max} = 130 \text{ L/s}$ ,水槽试验系统见图 1。

**2.2 试验条件** 垂线流速分布测量是在挟沙水流与槽底铺设的泥沙层相互调整,而且达到一种相对输沙平衡、充分紊流条件下进行的,试验所依据的水沙条件如表 1 所示。

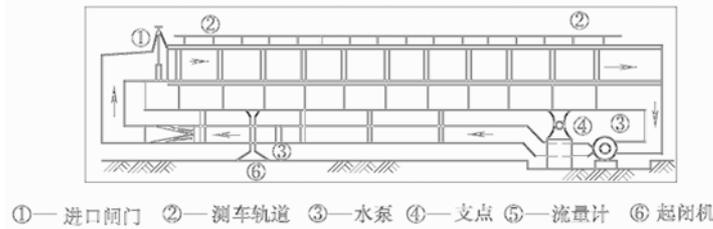


图1 水槽试验系统

表1 试验所依据的水沙条件

天然比重 $\gamma_s$ ( $t \cdot m^{-3}$ )	泥沙颗粒粒径 $d$ mm		水槽底坡 $I_b$ (%)	含沙量 $S$ ( $kg \cdot m^{-3}$ )
	范围	中径 $d_{50}$		
2.65	0.0016~0.40	0.076	1~15	2.61~765.61
流量 $Q$ ( $L \cdot s^{-1}$ )	水力坡降 $J$ %	水深 $R$ cm	宽深比 $B/h$	有效雷诺数 $Re_m$
9.06~94.87	0.17~5.40	7.0~17.2	2.91~7.14	3 950~142 600

**2.3 流速测量** 首先在水槽底部均匀铺放 20cm 厚度的天然沙,再放入清水。通过加大系统的流量来造成槽底泥沙的冲刷,实现增大挟沙水流含沙浓度,最终建立一种相对稳定的动床平衡状态,采用改进型超声测淤仪测量水深,并在流动的稳定段设置固定测流断面及测流垂线,采用自行研制 HCV-1 型传感式高浓度流速仪实测垂线流速分布,通过 A/D 转化和计算机数据采集以实现试验测量系统及数据处理的自动化<sup>[11]</sup>。通过加大系统流量,使水流与河床发生调整,直至建立新的输沙平衡的状态,再实测这种条件下的水深和垂线流速分布。如此类推,可以测得不同水沙条件下挟沙水流的水深和流速分布,总共完成 70 组挟沙水流流速分布测量试验。依据实测的垂线流速实测数据,可以反求卡门常数  $\kappa$  值。

此外,挟沙水流试验中还测量了各组次的流量、水深、比降、水温、含沙量分布、床沙与悬沙颗粒级配等水沙因子。

### 3 垂线流速分布的特点

根据试验实测流速资料,对数流速分布曲线斜率  $1/\kappa$  直接反映了卡门常数  $\kappa$  的变化,试验中测得大多数组次的流速分布在主流区与底流区均具有同一斜率,即相同的卡门常数  $\kappa$ ,如图 2(a)所示。

此外,在主流区和底流区流速梯度还出现了两种偏离情况,以  $y/h=0.15 \sim 0.20$  作为主流区和底流区分界,一是在低含沙与中等含沙水流时形成的底部流速分布梯度明显大于主流区,表明底部由于含沙量大而引起了卡门常数  $\kappa$  减小,这与目前人们的取得普遍认识基本一致。但在试验中又出现了另一种新的情况,即在高含沙水流中底部流速分布梯度小于主流区,招致底部卡门常数  $\kappa$  反而大于主流区的异常现象。造成以上底流区与主流区  $\kappa$  值两种不同的偏离情况的原因在于两区浓度的自然梯度的存在以及图 3 所反映的高含沙与低含沙水流  $\kappa$  值随  $\mu_s$  或  $S_b$  而出现增大和减小这两种不同的变化趋向所致。但应该指

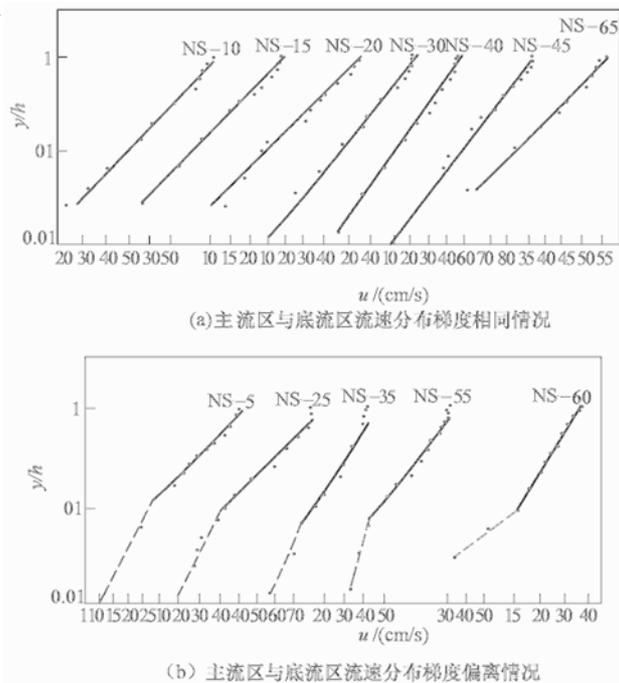


图2 垂线流速分布

出的是,并非所有高含沙与低含沙水流流速分布在底流区与主流区出现偏离,其中原因尚有待于进一步研究。对于考虑分段情况下的卡门常数  $\kappa$  值,则是采用流速梯度加权平均法进行推求。

#### 4 高低含沙水流流速分布统一规律

**4.1 卡门常数  $\kappa$  统一公式及验证** 对于高、低含沙水流,黏度不仅是一种能同时描述含沙浓度和泥沙级配变化的最佳参数,而且还能反应高含沙水流的流变特性。通过分析水槽实测资料,发现卡门常数  $\kappa$  与相对黏度  $\mu_r$  关系密切,点绘两者之间的关系曲线(图 3),通过数值拟合得到如下关系式

$$\kappa \kappa_0 = 1 - 1.511g \mu_r (1 - \lg \mu_r) \quad (8)$$

式中:当  $\mu_r > 10$  时,  $\kappa \kappa_0 = 1$ ,  $\kappa_0$  为清水的卡门常数  $\kappa$ ,取  $\kappa_0 = 0.4$ 。

通过实测数据检验,相对黏度可直接采用费祥俊公式进行计算<sup>[15]</sup>,即

$$\mu_r = \frac{\mu_m}{\mu_0} = \left( 1 - K \frac{S_v}{S_{vm}} \right) - 2.5 \quad (9)$$

式中:  $\mu_m$ 、 $\mu_0$  分别为挟沙水流及清水黏滞系数。

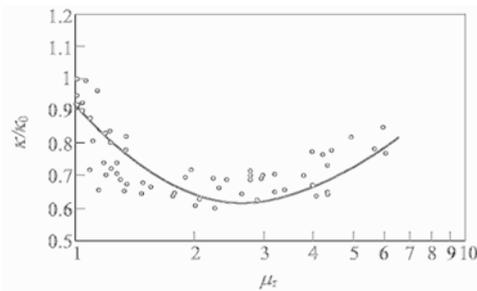
$\kappa$  值表达式为

$$\kappa = 1 + 2.0 \left( \frac{S_v}{S_{vm}} \right)^{0.3} \left( 1 - \frac{S_v}{S_{vm}} \right)^4 \quad (10)$$

泥沙极限浓度

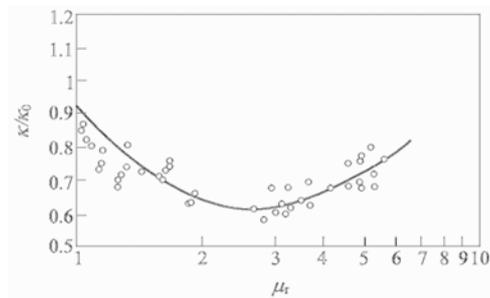
$$S_{vm} = 0.92 - 0.21g \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{d_i} \quad (11)$$

为检验卡门常数  $\kappa$  公式(5)的可靠性和实用性,以作者在黄河水利科学研究院完成的 45 组粉煤灰水槽试验实测数据<sup>[11]</sup>为资料依据,对卡门常数  $\kappa$  公式(8)进行验证,结果表明该公式计算曲线与实测点据符合程度较好(见图 4),进一步证实卡门常数  $\kappa$  公式(8)是可靠的,可以用于对数流速分布公式的计算。



• 试验实测点 — 拟合曲线

图 3  $\kappa \sim \mu_r$  关系曲线



• 粉煤灰验证试验实测点 — 式(8)计算曲线

图 4 卡门常数  $\kappa$  公式(8)的验证结果

**4.2 流速分布统一公式及其验证** 在上述 45 组粉煤灰水槽试验中实测垂线流速分布数据中<sup>[11]</sup>,每隔 10 组选择 1 组共计 4 组能反映高、低含沙水流不同含沙量的组次(CS-5、CS-15、CS-25、CS-35)的实测资料,对前述的卡尔曼—勃兰德尔对数流速公式(1)和张红武公式(2)分别进行验证比较,验证结果分别如表 2 和图 5 所示。

表 2 流速公式验证结果

试验组次	流量 $Q$ ( $L \cdot s^{-1}$ )	水深 $h$ cm	含沙量 $S$ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	卡门常数 $\kappa$ 计算值		流速计算值与实测相关系数 $R$	
				式(7)	式(8)	式(2)	式(1)
CS-5	26.62	12.53	32.60	0.334	0.293	0.987	0.988
CS-15	32.13	10.59	116.90	0.286	0.284	0.940	0.966
CS-25	47.74	13.66	333.90	0.257	0.247	0.956	0.978
CS-35	35.80	11.11	454.80	0.265	0.299	0.970	0.993

从以上表图可以看出,在挟沙水流充分紊动(无流核)的条件下,采用两种不同形式的流速公式(1)

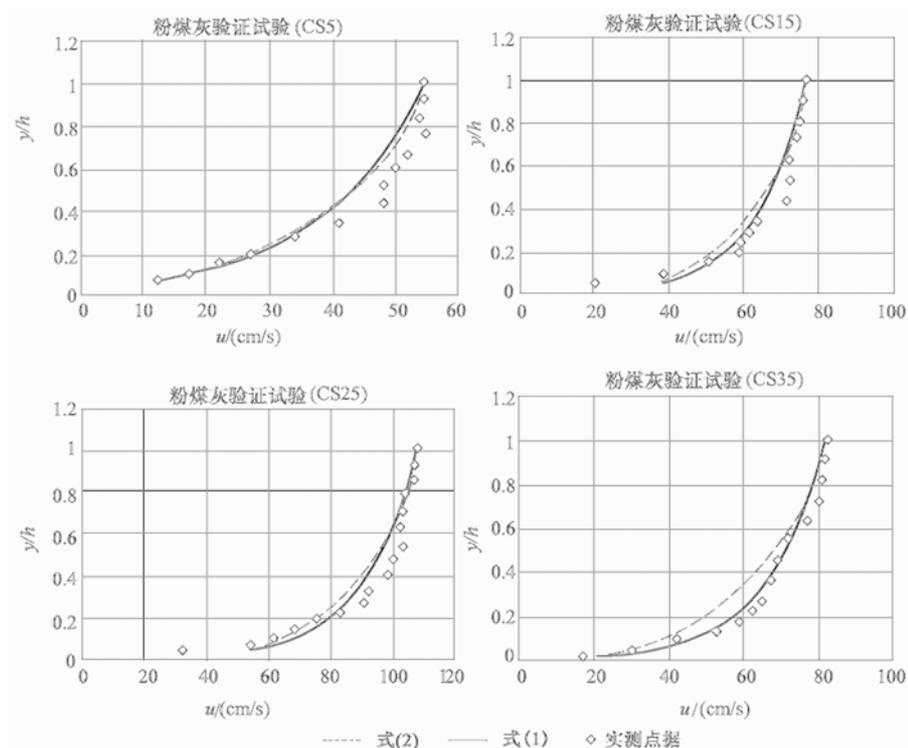


图5 2 流速公式验证结果

和公式(2)计算流速与实测值的相关系数均达到0.90以上,表明两者可靠性均较好,具有较高的实用价值。如进一步进行比较,会发现应用卡尔曼—勃兰德尔对数流速公式(1)和卡门常数 $\kappa$ 公式(8)计算得出不同含沙浓度的挟沙水流垂线流速值与实测值的相关性较张红武公式有所提高,特别是高含沙水流的条件下在底流区向主流区过渡区域流速计算值与实测值符合得更好。可见,采用变 $\kappa$ 模式的具有式(1)形式的对数流速公式以及本文提出卡门常数 $\kappa$ 公式(8),可以将高、低含沙水流的流速分布规律统一起来,而且计算值与实测值符合程度令人满意,可以用于高、低含沙水流垂线流速分布及挟沙能力的计算。

## 5 结论

(1)通过应用70组天然沙水槽流速试验实测资料分析垂线流速分布特点,结果发现大多数情况下,主流区与底流区流速梯度基本相同,表明具有相同的卡门常数 $\kappa$ 值。但在少数情况下出现了两种偏离情况,其一是在中低含沙量情况下,卡门常数 $\kappa$ 随着含沙量增大而减少;其二是在高含沙水流情况下,卡门常数 $\kappa$ 随着含沙量增大而增大,这很可能与高含沙水流减阻造成流速分布更加均匀有关。(2)依据天然沙水槽试验实测资料,引入能同时反映泥沙容量和级配组成的黏度参数,获得高、低含沙水流卡门常数 $\kappa$ 统一公式(8),并进一步通过应用粉煤灰水槽试验实测资料进行验证,结果表明式(8)计算精度是令人满意的。(3)粉煤灰水槽试验实测资料验证结果表明,同时应用 $\kappa$ 常数统一公式(8)和对数流速分布公式(1),能够较好地高、低含沙水流的流速分布规律统一起来。可用于对数流速分布及高含沙水流挟沙能力的计算。

## 参 考 文 献:

- [1] Shangyi Wang. Variation of Karman Constant in Sediment-Laden Flow[J]. J. of Hydraulic Division, ASCE, 1981,107(11):407—417.

- [ 2 ] Coleman N L. Velocity Profiles with Suspended Sediment[J]. J. of Hydraulic Research. 1981,(3):211—229.
- [ 3 ] Muneyuki Arai, Tamotsu Takahashi. The Karman Constant of the Flow Laden with High Sediment[A].Proc. of 3rd Inter Sym. on River Sedimentation[C].Mississippi. U. S. A., 1986.824—833.
- [ 4 ] Vetter M. Velocity Distribution and Von-karman Constant in Open Channel Flows with Sediment Transport[A].Proc. of 3rd Inter. Sym. on River Sedimentation[C].Mississippi, U. S. A., 1986.814~823.
- [ 5 ] 秦荣昱.动床水流卡门常数变化规律的研究[J].泥沙研究,1991,(3):38—52.
- [ 6 ] Coles D. The Law of the Wake in the Turbulent Boundary Layer[J]. J. of Fluid Mechanics 1956,11:191—226.
- [ 7 ] Ippen A T. A New Look at Sedimentation in Turbulent Stream[J]. J. of the Boston Soci. of Civil Eng., 1971,58(3).
- [ 8 ] 张红武.挟沙水流流速的垂线分布公式[J].泥沙研究,1995,(2):1—10.
- [ 9 ] 倪晋仁,王光谦.高浓度恒定固液两相流运动机理探析: I . 理论[J].水利学报,2000,(5):22—26.
- [10] 倪晋仁,王光谦.高浓度恒定固液两相流运动机理探析: II . 应用[J].水利学报,2000,(5):27—32.
- [11] 舒安平.高含沙水流挟沙能力及输沙机理的研究[D].北京:清华大学,1994.
- [12] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,1986.
- [13] 张俊华,王严平,等.挟沙水流指数流速分布规律[J].泥沙研究,1998,(4):93—98.
- [14] 张红武,张清.冲积河流的水流挟沙力[A].水利水电工程青年学术论文集[C].北京:中国科学技术出版社,1992.227—281.
- [15] 费祥俊.黄河中下游含沙水流黏度的计算模型[J].泥沙研究,1991,(2).

## Unified laws of velocity distribution for sediment laden flow with high and low concentration

SHU An-ping<sup>1,3</sup>, LIU Qing-quan<sup>2</sup>, FEI Xiang-jun<sup>3</sup>

(1. *Beijing Normal University, Beijing 100875, China*; 2. *Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*;  
3. *Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

**Abstract:** As a typical solid and liquid phase flow existing universally in the nature, it is well-known that the velocity distribution laws of sediment laden flow is different from those of clear water flow. By means of velocity measurements for sediment laden flow in the natural sand tests, the characteristics of turbulent flow with high and low concentration has been analyzed comprehensively in this paper. Furthermore, according to basic logarithm formula of velocity distribution, unified formula of Karman constant  $\kappa$  for the flow with high and low concentration has been reasonably expressed by using relative viscosity index  $\mu_r$  to be related to concentration and grain diameter distribution. Finally, by comparing and verifying for two kinds of velocity formulas, the unified laws of logarithm velocity distribution with both Karman-Prandtle velocity and Karman constant  $\kappa$  has been analyzed and verified by using measured velocity data in the coal powder tests. The achieved results above are significant for revealing water flowing structure and sediment transporting mechanism, enriching river mechanics and guiding river harnessing engineering.

**Key words:** sediment laden flow; hyperconcentrated flow; velocity distribution; Karman constant  $\kappa$

(责任编辑:李福田)