

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.01.017

悬移质泥沙的垂线分布

莫磊¹,李瑞杰^{1,2},李佳芮¹,刘华锋¹

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室,江苏 南京 210098; 2. 河海大学环境海洋实验室,江苏 南京 210098)

摘要:为解决 Rouse 公式在模拟悬移质泥沙垂线分布中的局限性,从水流的应力分析入手,通过对 Einstein 和 Chien 的泥沙试验资料进行最小二乘法拟合,得到一个新的掺混长度公式。在此基础上,得出一个新的悬移质泥沙垂线分布公式,当 Rouse 数等于 1 时,该公式与 Rouse 公式的相关系数达到 0.9628,并且克服了 Rouse 公式在水面含沙量为零的缺陷。通过 2010 年的瓯江口各层含沙量实测资料的验证,表明新的悬移质泥沙垂线分布公式能客观反映含沙量的垂线分布规律。

关键词:掺混长度;紊动黏性系数;悬移质泥沙垂线分布

中图分类号:TV149 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2013)01-0090-05

Research on vertical distribution of suspended sediment concentration

MO Lei¹, LI Ruijie^{1,2}, LI Jiarui¹, LIU Huafeng¹

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Laboratory of Ocean Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The Rouse formula has limitations in simulating the vertical distribution of suspended sediment concentration. In order to solve this problem, the flow stress was analyzed and least squares fitting was performed using Einstein and Chien's sediment test data to obtain a new mixing length formula. Based on this, a new vertical distribution formula of suspended sediment concentration was derived. In comparison with the Rouse formula, if the Rouse number was equal to 1, the correlation between this formula and the Rouse formula reached 0.9628. Meanwhile, the problem in the Rouse formula of the sediment concentration being zero on the surface was solved. Verified by observed data from the Oujiang Estuary in 2010, the proposed formula can objectively reflect the vertical distribution rule of sediment concentration.

Key words: mixing length; turbulent viscosity coefficient; suspended sediment vertical distribution

悬移质泥沙的浓度分布理论多种多样^[1],但都可以统一到扩散理论的形式,不同点主要表现为扩散系数中考虑的主要影响因素和影响方式的差别。扩散理论的关键是合理确定扩散系数,由于泥沙问题的复杂性,扩散系数的确定经常带有半经验性,通常引入施密特数 S_c ($S_c = \nu_t / \varepsilon_s$) 或修正系数 β ($\beta = 1 / S_c$),认为紊动扩散系数 ε_s 正比于水流紊动黏性系数 ν_t ^[2]。进一步假定水流质点的紊动扩散与水流动量的紊动交换过程类似,紊动扩散系数等于水流紊动黏性系数。在研究含沙量沿垂向分布以及紊流计算中,经常要用到水流的紊动黏性系数^[3]。基于有限掺混长度理论,不同掺混长度的表达式对应着不同的水流紊动黏性系数^[4]。由于不同区域的泥沙特性不一样,因此考虑泥沙垂线分布时也要考虑到不同区域的泥沙特性^[5-7]。泥沙垂线分布公式的形式很多^[8-11],其中 Rouse 提出的公式应用最多,但 Rouse 公式有一定的局限性。笔者拟从水流的应力分析入手,对实测资料进行最小二乘拟合,期望得出新的掺混长度公式,进而导出新的悬沙垂线分布公式以弥补 Rouse 公式的一些缺陷。

收稿日期:2012-06-15

基金项目:海洋公益性行业科研专项(201205005);国家自然科学基金(41276017)

作者简介:莫磊(1987—),男,江苏南通人,硕士研究生,主要从事泥沙运动力学及海岸泥沙运动研究。E-mail:mo_lei@163.com

1 紊动黏性系数

1.1 应力分析

根据紊流理论,切应力由两部分组成:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \tag{1}$$

其中

$$\tau_1 = \mu \frac{du_x}{dz} \qquad \tau_2 = -\rho \overline{u'_x u'_z}$$

式中: τ_1 ——黏滞切应力; τ_2 ——紊动切应力; μ ——水流的动力黏性系数; u_x ——顺流向的速度分量; ρ ——水的密度; u'_x —— x 方向的脉动流速; u'_z —— z 方向的脉动流速。

对于二维均匀流, τ 沿垂线的分布呈线性变化:

$$\tau = \tau_0 \left(1 - \frac{z}{h}\right) \tag{2}$$

其中

$$\tau_0 = \rho u_*^2$$

式中: τ_0 ——床面切应力; z ——垂向位置坐标(z 轴的正方向与重力方向相反),在床面上时取 $z=0$; h ——水深; u_* ——摩阻流速。

紊流中,在黏性底层以外的流区,满足:

$$\tau_2 \approx \tau = \tau_0 \left(1 - \frac{z}{h}\right) \tag{3}$$

根据 Prandtl 的混合长度理论, τ_2 又可表示为

$$\tau_2 = \rho l^2 \left(\frac{d\bar{u}_x}{dz}\right)^2 \tag{4}$$

式中: $\bar{u}_x$ —— x 方向速度分量的时均值; l ——掺混长度。

1.2 掺混长度

Prandtl 假设掺混长度的表达式为 $l=\kappa z$,其中 κ 为卡门常数。而 Rouse 公式中,采用二维均匀流的切应力垂线分布 $\tau=\tau_0(1-z/h)$,得到紊流掺混长度公式为

$$l = \kappa z \sqrt{1 - \frac{z}{h}} \tag{5}$$

根据 Einstein 和 Chien 的泥沙试验资料,采用最小二乘法拟合出一条平滑的曲线。该曲线的表达式为

$$\frac{l}{h} = A\kappa \sqrt{\frac{z}{h}} \tag{6}$$

式中 A 为待定系数, A 的拟合结果为 0.172 375。

将 Prandtl 及 Rouse 采用的紊流掺混长度公式与式(6)进行比较(图 1),可知 Prandtl 掺混长度在整个垂线方向为线性形式,这与实际不符。同样,Rouse 公式的掺混长度在水面处等于零,这也与实际不符。

再将 Prandtl,Rouse 和式(6)的紊流掺混长度与试验资料进行比较(图 2),可知式(6)结果与 Einstein 和 Chien 的泥沙试验资料最切合。

1.3 紊动黏性系数的计算

1887 年 Boussinesq 类比层流提出了紊动黏性系数 ν_t 的概念,根据其假定:

$$-\overline{u'_x u'_z} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_x}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial x} \right) \tag{7}$$

式中: $\bar{u}_z$ —— z 方向速度量的时均值。在二维均匀水流中,有 $\frac{\partial \bar{u}_z}{\partial x}=0$ 。因此式(7)可以表示为

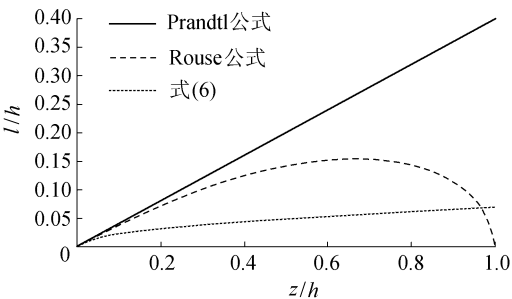


图 1 Prandtl 和 Rouse 采用的紊流掺混长度与式(6)结果的比较

Fig. 1 Comparison of Prandtl and Rouse's mixing length with Eq. (6)

$$- \overline{u_x' u_z'} = \nu_t \frac{d\bar{u}_x}{dz} \tag{8}$$

将式(3)代入式(1),并将 $\tau_0 = \rho u_*^2$ 代入,联立式(8)可得

$$\nu_t = \frac{u_*^2 \left(1 - \frac{z}{h}\right)}{\frac{d\bar{u}_x}{dz}} \tag{9}$$

将式(3)、式(6)代入式(4),可得 $\bar{u}_x$ 在 z 方向的梯度,联立式(9)得到紊动黏性系数 ν_t 的表达式:

$$\nu_t = A\kappa u_* \sqrt{\left(1 - \frac{z}{h}\right)zh} \tag{10}$$

2 悬沙垂线分布公式

悬移质在水流中处于平衡状态时应满足的质量守恒方程为

$$\omega c + \varepsilon_s \frac{dc}{dz} = 0 \tag{11}$$

式中: ω ——泥沙颗粒在静止清水中的沉降速度; c ——含沙量; ε_s ——泥沙颗粒交换系数,取 $\varepsilon_s \approx \nu_t$,可得

$$\frac{c}{c_a} = \exp\left[-\frac{2\omega}{A\kappa u_*} \left(\arcsin\sqrt{\frac{z}{h}} - \arcsin\sqrt{\frac{a}{h}}\right)\right] \tag{12}$$

式中 c_a 为 $z=a$ 处的含沙量。

而 Rouse 公式为

$$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a}\right)^{\frac{\omega}{\kappa u_*}} \tag{13}$$

其中

$$u_* = \frac{\kappa U}{\ln \frac{4h}{z_0} - \frac{8}{3}}$$

式中: $\frac{\omega}{\kappa u_*}$ ——Rouse 数; z_0 ——床面粗糙高度,通常取 $z_0 = 0.0025$; U ——垂线平均流速。

瓯江口的泥沙为黏性沙,根据 Krone 发现的泥沙沉速随着含沙量的增加而增加的规律^[12],认为可取

$$\omega = Kc^{\frac{4}{3}} \tag{14}$$

式中 K 为经验系数,取为0.001。在已知 u_* 和 ω 的情况下,即可求得 Rouse 数。

取 Rouse 数等于1时,Rouse 公式和式(12)结果的比较如图3所示。结果显示,式(12)与 Rouse 公式的相关系数达到0.9628,但式(12)却克服了 Rouse 公式在水面处和河底部位出现的缺陷,即式(12)不仅当悬浮指标不大时所描述的水面含沙量不为零,而且当参考点取得相当小时所描述的含沙量仍不会出现等于无穷大的不合理现象。

3 实测资料验证分析

选取2010年瓯江口1号和2号站点的中潮实测资料(各层含沙量)对式(12)进行分析验证(参考层取为0.2层),小潮和大潮的结果与中潮类似。

如图4、图5所示,虽然瓯江口海域输沙量大,但含沙量都比较低,泥沙分布特征不明显,下层含沙量与

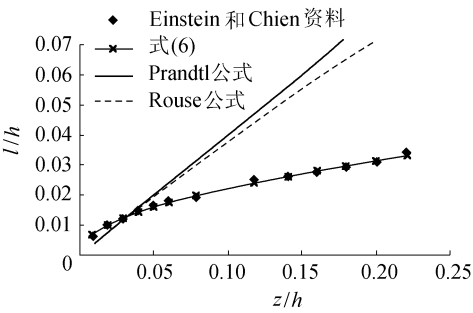


图2 Prandtl,Rouse 及式(6)的紊流掺混长度与 Einstein 和 Chien 试验资料的比较

Fig. 2 Comparison of Prandtl and Rouse's mixing length, and Eq. (6) with Einstein and Chien's test data

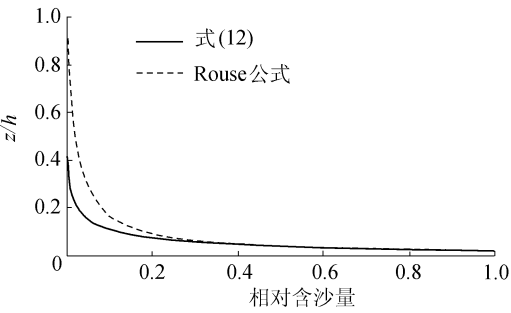


图3 Rouse 公式结果与式(12)结果的比较 (Rouse 数为1)

Fig. 3 Comparison of Rouse formula and Eq. (12) (assuming Rouse number is equal to 1)

上层差异不大。式(12)的计算结果与实测整体趋势一致,均能客观地反映含沙量垂线分布规律。整体上,式(12)合理地反映了整个水体的含沙量垂线分布规律。

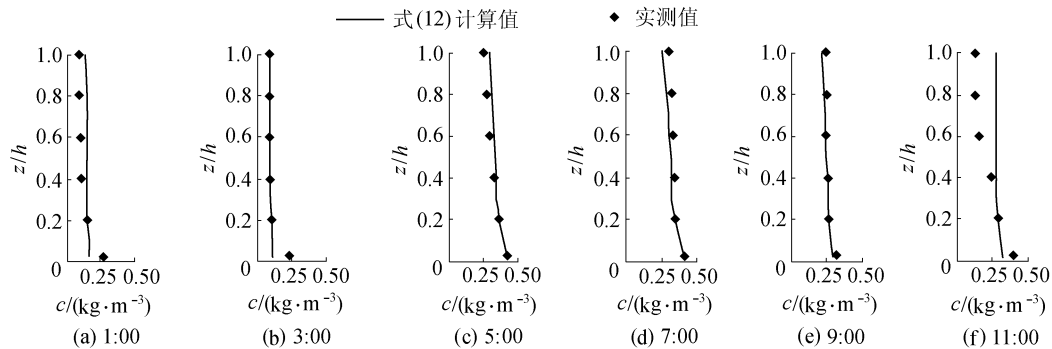


图 4 瓯江 1 号站位 (中潮) 计算与实测含沙量对比

Fig. 4 Comparison of computed sediment concentration and field data at station No.1 in Oujiang Estuary (middle tide)

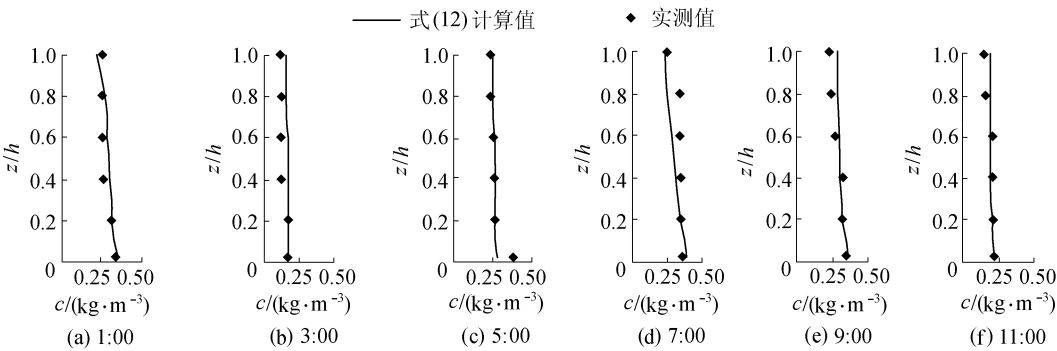


图 5 瓯江 2 号站位 (中潮) 计算与实测含沙量对比

Fig. 5 Comparison of computed sediment concentration and field data at station No.2 in Oujiang Estuary (middle tide)

4 结 语

根据 Einstein 和 Chien 的泥沙试验资料,采用最小二乘法拟合出新的掺混长度经验公式,在此基础上推导得到新的悬沙垂线分布公式,将此公式与 2010 年瓯江口各层含沙量实测资料进行对比,结果表明新公式能够较好地反映悬沙垂线分布规律。

参考文献:

[1] 倪晋仁,遇惠甲. 悬移质浓度垂线分布的各种理论及其间关系[J]. 水利水运科学研究, 1988(1): 83-95. (NI Jinren, YU Huijia. The theory and its relationship of vertical distribution of concentration[J]. Hydro-Science and Engineering, 1988(1): 83-95. (in Chinese))

[2] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社,1986.

[3] 张红武. 黄河下游洪水模型相似率的研究[D]. 北京:清华大学,1995.

[4] 严冰,张庆河. 基于有限掺混长度概念的悬沙浓度垂线分布研究[J]. 泥沙研究, 2008(1): 9-16. (YAN Bing, ZHANG Qinghe. Distribution of vertical suspended sediment concentration based on the finite mixing length conception[J]. Journal of Sediment Research, 2008(1): 9-16. (in Chinese))

[5] JUNG K T, JIN J Y, KANG H W, et al. LEE Ho Jin. An analytical solution for the local suspended sediment concentration profile in tidal sea region[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 61(4): 657-667.

[6] BUDIANTO O, MANO A. A turbulent and suspended sediment transport model for plunging breakers[J]. Coastal Engineering Journal, 2008, 50(3): 349-367.

[7] 傅旭东,王光谦. 细颗粒悬沙浓度分布的影响因素分析[J]. 水动力学研究与进展, 2004, 19(2): 231-239. (FU Xudong, WANG Guangqian. Analysis on the factors affecting the vertical concentration distribution of fine sediment[J]. Journal of Hydrodynamics, 2004, 19(2): 231-239. (in Chinese))

[8] VANRJJN L C. Sediment transport, part II: suspended load transport[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 110(11):

1613-1641.

[9] 吴剑,岳红艳,廖小永. 悬移质含沙量沿垂线分布的探讨[J]. 人民黄河,1998,20(4):4-5. (WU Jian,YUE Hongyan,LIAO Xiaoyong. Study on vertical distribution of concentration of suspended load[J]. Yellow River,1998,20(4):4-5. (in Chinese))

[10] 陈永宽. 悬移质含沙量沿垂线的分布[J]. 泥沙研究,1984(1):31-39. (CHEN Yongkuan. Vertical distribution of suspended sediment in open channel[J]. Journal of Sediment Research,1984(1):31-39. (in Chinese))

[11] 刘建军. 明渠水流含沙量沿垂线分布研究[J]. 泥沙研究,1996(2):105-108. (LIU Jianjun. Study on vertical distribution of concentration in open channel[J]. Journal of Sediment Research, 1996(2):105-108. (in Chinese))

[12] McANALLY W H,MEHTA A J. Significance of aggregation of fine sediment particles in their deposition[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,2002(4):643-653.

· 简讯 ·

河海大学本科生 2012 年获 176 项国家专利授权

在刚刚过去的2012年,河海大学本科生获国家专利授权176项,比2011年增加46.7%。其中,“风轮转角可连续性调节的水平轴风力发电机及其调节方法”、“修复重金属污染淤泥的装置及方法”、“波浪发电GPS定位救生圈”等13项成果获国家发明专利,“可用于发电的船闸”、“应急海水淡化杯”、“网络试衣系统”等163项成果获国家实用新型专利,专利的应用领域涵盖了国家经济建设和百姓日常生活,专利获得者既有高年级学生也有低年级学生。

河海大学为培养大学生的创新意识和创新思维,提升大学生的创新实践能力,近年来建立及完善了国家、省、校三级大学生创新训练计划体系,设立了大学生创新训练计划基金,对每年经评选立项的150项左右创新训练计划项目给予资金、平台、指导教师等全方位的支持,鼓励大学生积极参与创新训练计划并以作品申报国家专利,取得了丰硕成果,获国家专利授权数持续增加,江苏省知识产权局在河海大学建立了全省高校中唯一的“江苏省专利技术创造与运用实践基地”。

(本刊编辑部供稿)