

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.06.007

感潮河段底床阻力特性分析

朱文谨¹,李瑞杰²,干岳良³,董德信²

(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. 河海大学物理海洋研究所,江苏 南京 210098 ;3. 舟山市交通规划设计院,浙江 舟山 316021)

摘要 为更好地了解长江感潮河段的底床阻力特性,在实测资料的基础上,结合流速对数分布的假设及谢才公式和曼宁公式给出了适合长江梅子洲河段(感潮河段)糙率的计算公式,并将公式加入到二维有限元水动力数学模型 HSCTM 中。数值计算的水位、流速及流场均显示了糙率公式的合理性;从尼库拉兹实验出发结合希夫林松的阻力公式从理论上探讨了摩阻流速和糙率高度之间的关系,并采用长江感潮河段的实测资料印证了两者之间存在间接的线性关系。

关键词 感潮河段 底床阻力 对数流速 HSCTM 摩阻流速 糙率高度

中图分类号 :TV131.2+2 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2009)06-0025-04

Analysis on the riverbed resistance characteristic of tidal river//ZHU Wen-jin¹, LI Rui-jie², GAN Yue-liang³, DONG De-xin² (1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China ; 2. Research institute of Coastal and Ocean Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China 3. Zhoushan Communications Planning Design Institute, Zhoushan 316021, China)

Abstract : In order to understand the riverbed resistance characteristic of tidal rivers more clearly, on the basis of measured data combined with the assumption that the velocity distribution is logarithmic, the Chezy formula and the Manning formula, the formula for calculating the roughness of the Yangtze River (tidal river), are provided. The formula has also been added to the two-dimensional finite element formula of the hydrodynamic mathematical model HSCTM. The numerical results, including the water level, velocity and flow field, show that the formula for calculating the roughness is reasonable. The relationship between shear velocity and roughness height is discussed theoretically with the Nikuradse experiment combined with the resistance formula. The indirectly linear relationship between shear velocity and roughness height is proven with the measured tidal river data from the Yangtze River.

Key words : tidal river ; bed resistance ; logarithmic velocity ; HSCTM ; shear velocity ; roughness height

底床阻力特性对于了解水流的动力特性特别重要,许多学者对非恒定流条件下底床的阻力作用展开了卓有成效的研究。Limerinos^[1]根据实测资料得出床面粗糙条件下的糙率计算公式;宋志尧^[2]从三维潮流运动控制方程出发,假定潮流垂直分布服从对数率,得到一个较全面反映水深、水位变化梯度和流向等因素的摩阻系数修正表达式;辛文杰^[3]将底床沙坡、沙纹产生的附加阻力用形状糙率表示,所确定的糙率包含了这 2 种糙率的综合作用;Dronker^[4]则给出了谢才系数决定于水深和底床起伏高度的表达式;Pingree 等^[5]在计算英吉利海峡的潮流场时采用了修正后的谢才公式。

分析这些研究成果可知,研究者常采用糙率高度 z_0 和糙率 n 表示底床的不平整性,从而反映底床阻

力特性以及河床粗糙程度对水流作用的影响。摩阻流速 $u_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ 可以理解到底床处紊流的速度尺度, u_* 也可用来表示底床对水流的阻力, z_0, n, u_* 均可反映底床对水流的阻力作用,它们的确定尤为重要。本文根据长江梅子洲河段的实测资料结合流速对数分布的假设给出了适合当地的糙率计算公式,将得到的公式加入二维有限元水动力数学模型 HSCTM 中,计算的水位流速及流场均显示了糙率公式的合理性;为弄清 u_* 和 z_0 之间的关系,从尼库拉兹实验出发结合希夫林松的阻力公式理论上探讨了 u_* 和 z_0 之间的关系,并采用实测资料验证了这一关系。

1 长江梅子洲河段糙率的计算

参照 Limerinos 的糙率计算公式^[1] 结合流速对

数率公式、谢才公式和曼宁公式可以得到糙率 n 的计算公式^[6-9]。一般河道中糙率的确定采用：

$$n = \frac{kH^{1/6}}{\sqrt{g} \left[\ln \left(\frac{H}{z_0} \right) - 1 \right]} \tag{1}$$

式中： k 为卡门常数； z_0 为糙率高度； H 为水深。式(1)反映了糙率 n 与糙率高度 z_0 的关系，在水深和糙率高度已知的条件下，容易得到糙率的大小。进一步确定 z_0 ，垂线上 1,2 两点流速为

$$u_1 = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{z_1}{z_0} \right) u_* \tag{2}$$

$$u_2 = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{z_2}{z_0} \right) u_* \tag{3}$$

式(2)除以式(3)，并令 $a = \frac{u_1 \ln z_2 - u_2 \ln z_1}{u_1 - u_2}$ ，得

$$z_0 = e^{\frac{u_1 \ln z_2 - u_2 \ln z_1}{u_1 - u_2}} = e^a \tag{4}$$

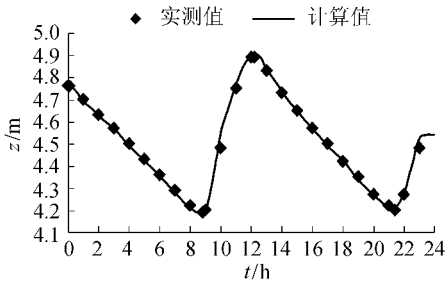
式(4)表明糙率高度 z_0 可由垂线上任意两点的流速求得，当有多层流速资料时，可采用拟合的方式得到 z_0 。将式(4)代入式(1)中有

$$n = \frac{kH^{1/6}}{\sqrt{g} \left[\ln \left(\frac{H}{e^a} \right) - 1 \right]} \tag{5}$$

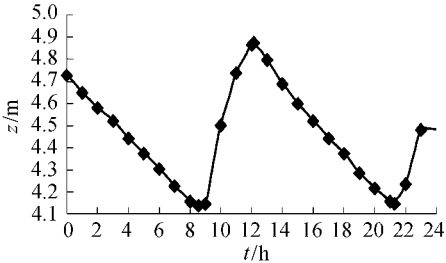
式(5)说明已知垂线上任意两点流速可以求得糙率 n ，公式中考虑了水位变化这一影响，适合非恒定流时的阻力计算。

长江梅子洲河段水位受长江径流和潮汐双重影响，除枯季大潮有短时间流速很小的涨潮流外，一般均为单向下泄流。受到水深变化较大等因素影响，该河段底床阻力特性也呈现各处相差甚远的特性。采用 2007 年 4 月 7 日全天的水文测验资料对上述糙率的取值方法进行验证。考虑到垂线上有 6 层(表层,0.2 层,0.4 层,0.6 层,0.8 层,底层)数据，采用每条垂线拟合对数分布，求解摩阻流速以及糙率高度。23 个测点处的摩阻流速以及糙率高度的计算结果如表 1 所示，根据式(5)可以得到长江梅子洲河段糙率与水深的关系(图 1)。将图 1 所示的关系加入到二维有限元水动力数学模型 HSCTM 中，对长江梅子洲河段的水动力进行计算，从图2和图3的水

表 1 反映实测点底床阻力特性的参数				
站点	编号	$u_* / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	z_0 / mm	$u_*^2 g^{-1} / \text{mm}$
南京水文站(大胜关)	1	19.17	0.28	0.04
	2	24.85	1.48	0.06
	3	21.04	0.16	0.05
	4	22.53	0.35	0.05
	5	29.60	1.41	0.09
	6	32.36	0.95	0.11
	7	42.08	3.36	0.18
	8	34.69	1.07	0.12
	9	27.20	1.15	0.08
	10	22.15	0.48	0.05
梅子洲左汊	11	16.01	0.26	0.03
	12	17.48	0.48	0.03
	13	19.24	0.27	0.04
	14	25.21	0.54	0.06
	15	28.33	0.27	0.08
	16	33.51	1.24	0.11
	17	37.79	1.60	0.15
	18	41.08	1.83	0.17
梅子洲右汊	19	14.90	0.00	0.02
	20	20.91	0.15	0.04
	21	19.32	0.14	0.04
	22	15.82	0.00	0.03
	23	23.69	0.72	0.06



(a) 南京水文站（大胜关）



(b) 南京西钢闸

图 2 长江梅子洲河段水位验证

位、流速的验证以及水流动力场(图 4)的复演中可以看出，图 1 显示的糙率与水深关系能够准确反映该段河床的阻力特性。

2 摩阻流速和糙率高度的关系

糙率高度 z_0 和切应力关系在草地和海洋表面的空气紊动的许多研究中探讨过，一般认为 $z_0 = b(u_*^2/g)$ ，其中 b 为常数^[10]。根据美国《海岸防护手册》^[11]，对于充分成长的风浪有：

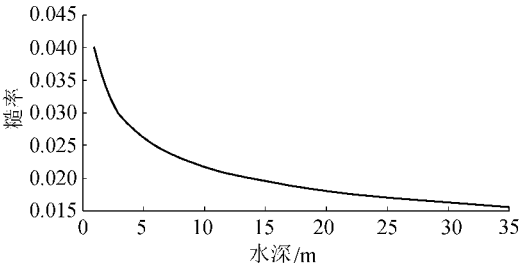
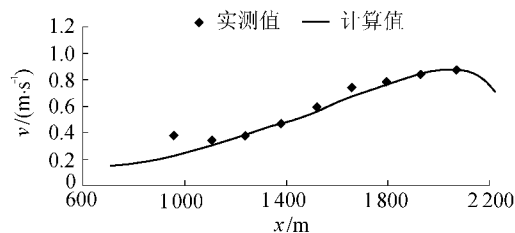
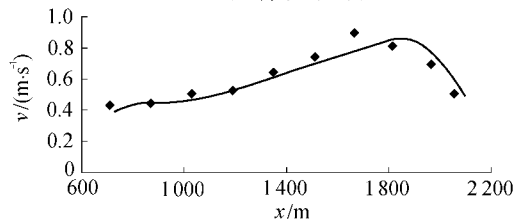


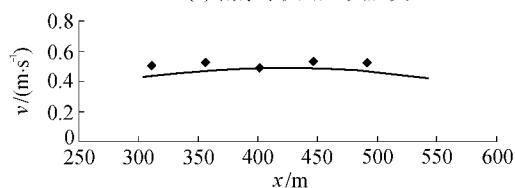
图 1 长江梅子洲河段糙率与水深的关系



(a) 梅子洲左汊



(b) 南京水文站 (大胜关)



(c) 梅子洲右汊

图3 长江梅子洲河段流速验证

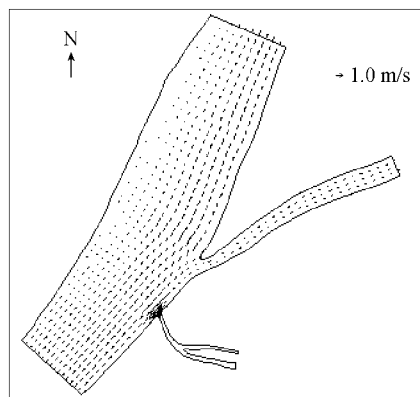


图4 长江梅子洲河段流场

$$(H_s)_m = 2.433 \times 10^{-1} \frac{U_A^2}{g} \quad (6)$$

式中 $U_A = 0.71 U^{1.23}$, 为风的调整因子。如果将充分成长的波高与河床底部的糙率高度类比,海面附近风速与摩阻流速 u_* 类比,同样存在类似关系: $z_0 = a_1(u_*^2/g)$, a_1 可近似看作常数。郝嘉陵等^[7]曾将 u_*^2/g 和 z_0 进行了线性相关性分析,但是对这一线性关系的物理意义没有进行解释。

定义 H/z_0 为底床的光滑程度,或相对光滑度。尼库拉兹实验^[12]表明,当 $Re > 10^5$ 时,即粗糙管湍流区,底床的阻力系数 λ 与 Re 无关,不同的相对光滑度产生的阻力也不同。在该区域内阻力系数 λ 与速度 $\bar{u}$ 无关,水力坡降 J 与 λ 成正比, λ 越大 J 越大,设两者之间的关系为 $J = m\lambda$,其中 m 为比例系数^[10-17]。有学者对粗糙管湍流区内 λ 与 H/z_0 的关系进行过研究^[16],以简单的希夫林松公式(式(7))

为例研究 u_*^2/g 和 z_0 的关系。

$$\lambda = 0.11 \left(\frac{z_0}{H} \right)^{0.25} \quad (7)$$

将 $J = m\lambda$ 代入式(7),并由 $u_* = \sqrt{gHJ}$ 可得

$$z_0 = 6830 \frac{J^3}{m^4} \frac{u_*^2}{g} = \alpha \frac{u_*^2}{g} \quad (8)$$

其中

$$\alpha = 6830 \frac{J^3}{m^4}$$

长江梅子洲河段 z_0 与 u_*^2/g 的相关性如图5所示,这与式(8)反映的关系是一致的。

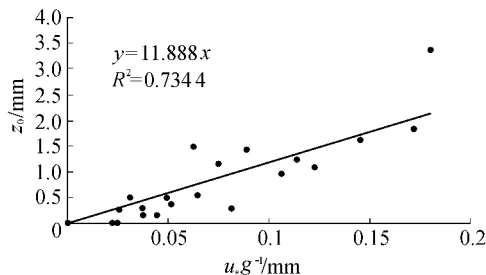


图5 u_*^2/g 与 z_0 关系

3 结 论

a. 依据长江梅子洲河段的实测资料结合流速对数分布的假设以及谢才公式和曼宁公式给出了适合当地的糙率取值公式,将得到的公式加入到二维有限元水动力数学模型中,计算的水位流速及流场均显示了糙率公式的合理性。

b. 从尼库拉兹实验出发结合希夫林松的阻力公式理论上探讨了 u_* 和 z_0 之间的关系,证明在感潮河道中 z_0 与 u_*^2/g 仍然存在线性关系。

参考文献:

- [1] LIMERINOS J T. Determination of the manning coefficient for measured bed roughness in natural channels [M]. Washington, D. C. :Dept. of Water Resources, 1970 :46-47.
- [2] 宋志尧. 平面潮流数值模拟中底床摩阻系数的修正[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2001, 16(1) :56-61.
- [3] 辛文杰. 河口、海湾平面潮流数值计算中的几个问题[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1993, 8(3) :348-354.
- [4] DRONKERS J J. Tidal computations in rivers and coastal waters [M]. Amsterdam :North-Holland Publishing Company, 1964 :423-426.
- [5] PINGREE R D, GRIFFITHS D X. Sand transport path around the British Isles resulting from M_2 and M_4 tidal interaction [J]. J Mar Biol Ass, 1979, 59 :497-513.
- [6] 袁建忠, 惠遇甲. 新的二维流速分布式[J]. 水利水运科学研究, 1991, 12(2) :133-140.
- [7] 郝嘉陵, 宋志尧, 严以新. 河口海岸近底潮流速分布模式初步研究[J]. 泥沙研究, 2006, 15(1) :25-31.

- [8] SOULSBY R L, DYER K R. The form of the near-bed velocity profile in a tidally accelerating flow [J]. J of Geophysical Research, 1981, 86(9) :8067-8074.
- [9] 王家生, 朱代臣, 孙贵洲, 等. 不同断面形态河槽阻力特性试验 [J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(5) :13-15.
- [10] 莱赫特曼. 大气边界层物理学 [M]. 淮培民, 译. 北京: 科学出版社, 1982 :143.
- [11] U. S. Army Coastal Engineering Research Center. Shore protection manual [M]. Washington, D. C. :World Scientific Publishing Co., 1984 :134-137.
- [12] NIKURADSE J. Laws of flow in rough pipes [M]. Washington, D. C. :NACA Tech. Mem, 1937 :1292.
- [13] 肖洋, 唐洪武, 毛野, 等. 新型声学多普勒流速仪及其应用 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2002, 30(3) :15-18.
- [14] 黄才安, 奚斌. 泥沙颗粒起动时明渠阻力方程 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2000, 28(5) :98-100.
- [15] 卞华, 李福田, 蒋慧敏. 二维加糙明渠的阻力特性 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1997, 25(6) :112-115.
- [16] 张也影. 流体动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1985 :273-280.
- [17] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1986 :188-190.

(收稿日期 2009-04-14 编辑 熊水斌)

(上接第 12 页)

图 3 和图 4 是粒子云在时间 $t = 0$ 时, 在网格坐标 (850, 2500) 处开始释放, 即在主流区, 而不是在海湾环流区。图 3 中粒子按常规布朗运动扩散 ($H = 0.5$)。观察粒子云的扩散, 2 h 记录 1 次, 直到扩散 12 h 为止。可以看出, 常规布朗粒子云保持得很密集, 因为它们是在海湾环流边界外的主流区流动, 大多数粒子都流过海湾环流区, 贴着海岸线流到下游去了。一小部分粒子进入环流区, 也贴着海岸线。图 4 中粒子的扩散位置和图 3 一样, 但粒子按 fBm 扩散 ($H = 0.75$)。这时粒子云的传播速度有很明显的增加, 导致更多的粒子既趋于上游海岸线的低速水流区又向高速主流区运动, 从而 2 h 后与图 3 相比污染物被稀释了。这在自然界中则意味着污染物浓度的迅速降低。从环境的角度来看, 这也意味着对从原来的有毒水平降到了对生理安全的水平。另外, 更快的扩散导致更多的粒子进入海湾环流区, 它也导致环流区中粒子更密集的分布, 因为粒子不像 $H = 0.5$ 时那样被限制在海岸线边。因此, 海湾中污染物的增加不一定导致环流区海岸线处的污染物增加。这又证实了一个重要的事实: Hurst 指数的变化可改变一个流动区域受污染物影响的程度, 而这种现象是不能靠常规的布朗运动来实现的。

4 结 语

fBm 粒子追踪模型可用来模拟污染物在流体中的传播, 在推断污染物的去向和浓度中, Hurst 指数起着很大的作用, 通过改变 Hurst 指数, 可以对不同污染程度进行扩散模拟。

fBm 粒子追踪模型将对于用数值建模来模拟环境中污染物的扩散提供一个很好的工具, 它给任意空间的非线性扩散带来了灵活性和可行性。fBm 粒子追踪模型也较容易推广到带有潮汐速度分量的扩

散过程, 也可以延伸到 3 维自由表面的扩散模型。

参考文献:

- [1] FISCHER H B, LIST E J, KOH R C Y, et al. Mixing in inland and coastal waters [M]. San Diego, California : Academic Press, 1979.
- [2] LAM D C L, MURTHY, C R, SIMPOSON, R B. Effluent transport and diffusion models for the coastal zone [M]. New York : Springer-Verlag, 1984 :17-27.
- [3] OSBORNE A R, KIRWAN A D, PROVENZALE A, et al. Fractal drifter trajectories in the kuroshio extension [J]. Tellus, 1989, 41A :416-435.
- [4] SANDERSON B G, BOOTH D A. The fractal dimension of drifter trajectories and estimates of horizontal eddy-diffusivity [J]. Tellus, 1991, 43A :334-349.
- [5] ADDISON P S, QU Bo, NISBET A, et al. A non-Fickian, particle-tracking diffusion model based on fractional Brownian motion [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1997, 25 :1373-1384.
- [6] ADDISON P S. Fractal and chaos :an illustrated course [M]. London : Institute of Physics Publishing, 1997.
- [7] MANDELBROT B B, VAN NESS J W. Fractional brownian motions, fractal noises and applications [J]. SIAM Review, 1968, 10(4) :422-437.
- [8] ADDISON P S, QU Bo, NDUMU A S, PYRAH I C. A particle tracking model for non-fickian subsurface diffusion [J]. Mathematical Geology, 1998, 30(6) :695-716.
- [9] QU Bo. The use of fractional brownian motion in the modelling of the dispersion of contaminants in fluids [D]. Edinburgh : Napier University, 1999.
- [10] OKUBO A. Oceanic diffusion diagrams [J]. Deep-Sea Research, 1971, 18 :789-802.
- [11] FISCHER H B. Longitudinal dispersion and turbulent mixing in open-channel flow [J]. Ann Rev Fluid Mech, 1973(5) :39-78.

(收稿日期 2009-05-05 编辑 熊水斌)