

推移质对水流阻力影响的定量研究

黄才安¹ 李德荣²

(1.扬州大学水利与建筑工程学院,江苏 扬州 225009;2.江都市农水科研试验站,江苏 江都 225200)

摘要:从挟带推移质的水流能量平衡方程出发,引入 Meyer-Peter 和 Muller 推移质输沙率公式,推导了挟带推移质的动平整床面阻力系数公式.实测资料对公式验证的结果表明,该公式具有一定的精度,可用于实际问题的计算.

关键词:推移质;水流阻力;动平整床面;能量平衡

中图分类号:TV142 文献标识码:A 文章编号:1000-198X(2002)02-0113-03

挟沙水流一般属于两相流的范畴,一方面泥沙在水流的作用下发生运动,另一方面泥沙的存在又反过来影响水流.推移质运动要通过碰撞、摩擦而额外消耗一部分能量,由于这部分能量取自水流的时均能量而不是取自紊动动能,因而推移质泥沙的存在将增加水流的能量损失.Ryckoczi、Song 等^[1,2]对这一问题进行了试验研究,其中 Ryckoczi^[1]的试验比较了有沙波存在动床和固定床面条件下的阻力系数,Song 等^[2]的试验则比较了平整床面动床和定床条件下的阻力系数.他们的结果都表明,与定床清水相比,挟沙水流的能量损失较大.尽管目前学术界都认可了以上的观点,但认识还限于定性分析,对定量方面的研究还很不够.本文试图从理论上研究动平整床面时推移质泥沙对水流阻力的定量影响.

1 理论分析

在二维明渠均匀流中,当仅有推移质时,挟沙水流的剪切力 τ 由两部分组成^[3],如图 1 所示.

$$\tau = \tau_f + \tau_s \tag{1}$$

式中: τ_f ——颗粒周围的液体发生变形后所产生的液体剪切力,与连续的液相有关; τ_s ——泥沙颗粒相互碰撞、摩擦以后通过水流运动方向的动量交换所产生的颗粒剪切力,与分散的固相有关.

在单位面积床面上液体消耗的水流势能 E_f ,通过 τ_f 的作用传递到河床附近,在那里产生紊动,从而转化为热能损失掉.水流消耗的水流势能为

$$E_f = \tau_f V = \frac{f_0}{8} \rho V^3 \tag{2}$$

式中: V ——水流平均流速; ρ ——液体的密度; f_0 ——清水时的阻力系数,即定床阻力系数.

在单位面积床面上推移质泥沙消耗的水流势能 E_s ,通过 τ_s 的作用传递到河床上,泥沙颗粒在与河床发生碰撞、摩擦时,而直接散失为热能,并不产生紊动.根据 Bagnold^[3]的研究,推移质泥沙消耗的水流势能为

$$E_s = g_b' \tan \alpha \tag{3}$$

式中: α ——动摩擦角; $\tan \alpha$ ——动摩擦系数; g_b' ——以水下重量计的单宽推移质输沙率.推移质输沙率可采用 Meyer-Peter 和 Muller 公式^[4]

$$\Phi = g_b' [(\gamma_s - \gamma) \sqrt{(\gamma_s / \gamma - 1) g d d}]^{-1} = 8 (\Theta - \Theta_c)^{1.5} \tag{4}$$

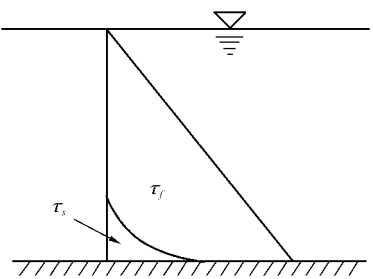


图 1 挟沙水流剪切力的组成
Fig.1 Composition of shear stress in sediment-laden flow

收稿日期:2001-03-01
基金项目:江苏省教育厅自然科学基金资助项目(00KJB570002)
作者简介:黄才安(1966—)男,江苏江都人,副教授,博士研究生,主要从事泥沙运动研究.

式中: γ, γ_s ——水和泥沙的容重; d ——泥沙粒径; g ——重力加速度; Θ ——无因次水流切应力; Θ_c ——无因次起动切应力. 将式(4)代入式(3), 得

$$E_s = 8\rho \tan\alpha (U_*^2 - U_{*c}^2)^{1.5}$$

(5)

式中: U_* ——摩阻流速; U_{*c} ——起动摩阻流速. 式(5)可进一步改写成用阻力系数和平均流速表示的形式

$$E_s = \frac{\rho \tan\alpha}{\sqrt{8}} (fV^2 - f_c V_c^2)^{1.5} = \frac{\rho \tan\alpha}{\sqrt{8}} (fV^2 - f_0 V_c^2)^{1.5}$$

(6)

式中: V_c ——起动流速; f ——总阻力系数; f_c ——泥沙起动时的阻力系数. 显然 f_c 应与定床清水阻力系数(即沙粒阻力系数)相等, $f_c = f_0$.

在单位面积床面上水流提供的势能为

$$E = \tau V = \frac{f}{8} \rho V^3$$

(7)

根据能量守恒定律, 动平整床面水流提供的势能, 一部分用于输水, 其余部分用于输送推移质泥沙, 即

$$E = E_f + E_s$$

(8)

将式(2)(6)(7)代入式(8), 整理后得

$$f = f_0 + \sqrt{8} \tan\alpha (f - f_0 \frac{V_c^2}{V^2})^{1.5}$$

(9)

式(9)即为考虑推移质泥沙运动影响后的动平整床面阻力公式. 当泥沙起动($V = V_c$)时, 即输沙率为0, $f = f_0$. 随着水流强度的增大, 阻力系数增大, 与现有的定性分析结论一致. 而当水流强度很大($V \gg V_c$)时, 即输沙率很大时, 阻力系数趋于一定值, 此值与定床清水阻力系数有关. 根据 Bagnold^[5]的分析, 动摩擦系数可取为 $\tan\alpha = 0.63$, 则式(9)变为

$$f = f_0 + 1.78 (f - f_0 \frac{V_c^2}{V^2})^{1.5}$$

(10)

式(10)也可不用流速表示, 而用切应力表示, 即

$$f = f_0 + 1.78 (1 - \frac{\Theta_c}{\Theta})^{1.5} f_0^{1.5}$$

(11)

以上结论适用于仅有推移质泥沙运动时动平整床面的阻力计算.

2 公式验证

以上从理论上分析了推移质泥沙运动对水流阻力系数的影响, 现利用5组实测输沙资料(表1)对式(11)进行验证. 所有资料均采用 Vanoni-Brooks 方法^[4]进行边壁校正.

表1 验证资料汇总

Table 1 Summary of data for testing

资料来源	资料组数	流速 V ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	水深 h /m	能坡 J / 10^{-3}	粒径 d /mm	阻力系数 f	无因次切应力 Θ
Song 等 ^[2]	54	0.90~1.18	0.084~0.253	5.00~15.00	12.3	0.063~0.132	0.052~0.097
Julien 等 ^[6]	7	0.35~0.51	0.038~0.056	2.57~5.12	0.60	0.046~0.103	0.160~0.210
Gillbert ^[5]	56	0.49~1.42	0.017~0.078	5.60~27.50	0.506~3.170	0.031~0.110	0.129~1.420
Singh ^[5]	7	0.29~0.80	0.015~0.084	1.50~14.00	0.62	0.033~0.048	0.057~0.564
Williams ^[5]	8	0.33~2.15	0.025~0.155	2.37~36.70	1.35	0.042~0.055	0.062~0.306

在用式(11)验证时, 定床阻力系数 f_0 采用 Song 等^[2]试验中的测量结果, 其他试验中因没有 f_0 实测资料, 采用文献[7]泥沙起动阻力公式计算. 无因次起动切应力, 直接引用 Julien 和 Raslan 的计算数据, 其他试验中未测量, 采用 $\Theta_c = 0.045$. 验证结果如图2所示. 试验点据基本上都落在式(11)所表示的曲线上, 说明式(11)具有一定的精度, 可用于实际问题的计算.

3 结 语

推移质泥沙运动对水流能量损失的影响, 目前在定性上已取得了共识, 即推移质泥沙的存在使水流的能

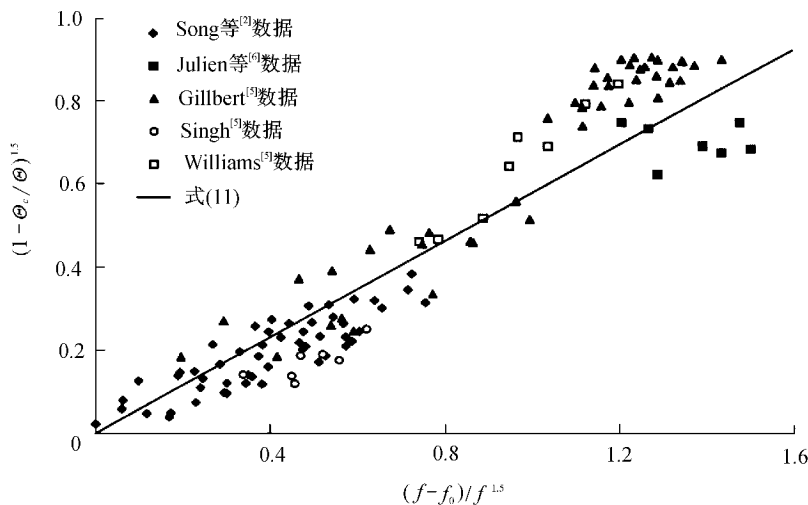


图 2 式 (11) 的验证

Fig.2 Verification of equation (11)

量损失增大 ,但由于问题的复杂性 ,还没有定量方面的成果.本文从挟带推移质泥沙运动的水流能量方程出发 ,推导出了无沙波存在时的动平整床面阻力系数的计算公式 ,即式 (10)或式 (11).由于该式与实测资料吻合较好 ,从而为推移质运动时阻力的定量计算提供了可能 .

参考文献 :

[1] Ryckoczi L. Experiment study of flume bed roughness[A]. In : Symposium of 12th IAHR[C]. Fort Collins , 1967. 181 ~ 186.

[2] Song T , Chiew Y M , Chin C O . Effect of bed-load movement on flow friction factor[J]. Journal of Hydraulic Engineering , 1998 , 124 (2) :165 ~ 175 .

[3] Bagnold R A. Approach to the sediment transport problem from general physics[R]. U.S. Geology Survey , Professional Paper 422-I , 1966. 1 ~ 37.

[4] 钱宁 , 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京 : 科学出版社 , 1983. 262 ~ 415.

[5] Bagnold R A. The nature of saltation and of bed load transport in water[J]. Proc of Royal Soc Lodon , 1973 , 332 :443 ~ 471 .

[6] Julien P Y , Raslan Y. Upper-regime plane bed[J]. Journal of Hydraulic Engineering , 1998 , 124 (11) :1086 ~ 1096.

[7] 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 , 2000 , 28 (5) :98 ~ 100.

Quantitative Study on Effect of Bed Load on Flow Resistance

HUANG Cai-an¹ , LI De-rong²

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering , Yangzhou Univ. , Yangzhou 225009 , China ;
2. Jiangdu Agriculture Irrigation Research and Experiment Station , Jiangdu 225200 , China)

Abstract : Based on the energy balance equation of flow containing bed load , and by use of the Meyer-Peter and Muller bed load equation , a flow resistance equation for movable plane bed is derived. Verification with measured data shows that the equation is of a certain accuracy , and can be used for practical calculation.

Key words : bed load ; flow resistance ; movable plane bed ; energy balance