

泥沙颗粒起动时明渠阻力方程

黄才安¹, 奚 斌²

(1. 河海大学港口航道及海岸工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 扬州大学水建学院, 江苏 扬州 225009)

摘要 在对泥沙起动的 Shields 曲线与明渠阻力特性之间的关系进行分析后, 指出了无因次起动切应力与相对等效粗糙突起高度之间存在比例关系. 利用 182 组实测资料求得了用阻力系数表示的泥沙起动阻力方程, 该方程与泥沙粒径无关, 可用于稳定渠道的设计中.

关键词 泥沙起动 阻力特性 Shields 曲线 相似性 稳定渠道设计

中图分类号 TV142 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2000)05-0098-03

泥沙起动条件, 不仅广泛应用于输沙计算中, 而且有助于稳定渠道的设计. 尽管目前普遍认为泥沙的起动是一种随机现象, 需从概率的角度出发来研究起动条件, 但是, 从平均角度出发的 Shields 曲线还是被普遍用来作为起动判别准则^[1]. 然而, 在进行稳定渠道设计时, 仅有 Shields 曲线还不够, 还需要一个阻力方程, 才能求解. 目前这个阻力方程主要依赖于 Chezy-Manning 公式, 其 Manning 系数的确定在很大程度上还依靠经验. 因此有必要建立一个泥沙起动时的明渠阻力方程.

1 泥沙起动与明渠阻力特性的相似性

Shields 在 1936 年从泥沙起动时的力学平衡条件出发, 借助于量纲分析法, 得到了起动切应力公式^[1]:

$$\theta_c = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)d} = f\left(\frac{U_* d}{\nu}\right) = f(Re^*) \quad (1)$$

式中: θ_c ——无因次起动切应力 (或称为 Shields 参数); τ_c ——起动切应力; d ——泥沙颗粒粒径; U_* ——摩阻流速; ν ——水流的运动粘性系数; γ_s, γ ——泥沙及水的容重; Re^* ——沙粒雷诺数. Shields 利用一些试验资料得到了 Shields 参数与沙粒雷诺数之间的关系曲线, 即 Shields 曲线, 如图 1 所示.

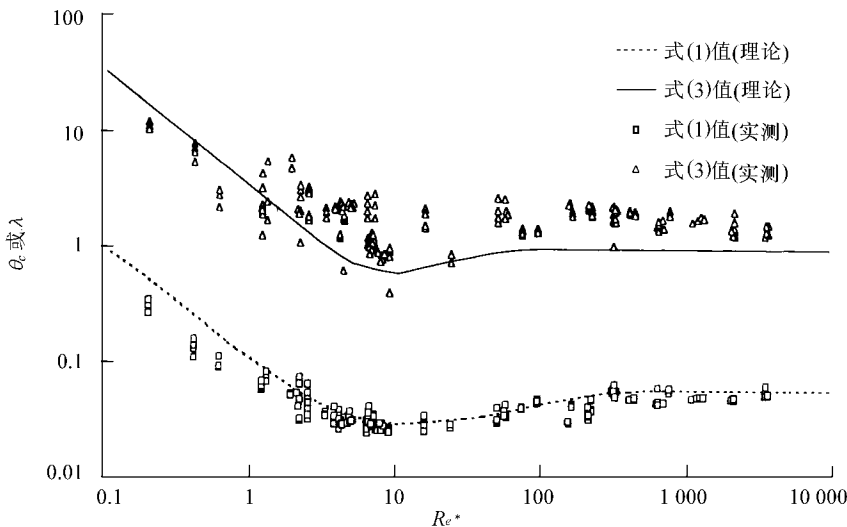


图 1 θ_c 与 Re^* 及 λ 与 Re^* 的关系

Fig.1 Relationships of $\theta_c \sim Re^*$ and $\lambda \sim Re^*$

明渠阻力公式,可用有一定理论基础的、适用于紊流光滑区、过渡区及粗糙区的 Einstein 对数公式表示^[1] :

$$\frac{V}{U_*} = 5.75\log(12.27 \frac{RX}{k_s}) \tag{2}$$

式中: V – 平均流速; R – 水力半径; k_s – 粗糙突起高度; X – 流态校正系数,是 k_s/δ 的函数, δ 为粘性底层厚度, $\delta = 11.6\nu/U_*$. 若将 X 统一包含于粗糙突起高度中,并定义如下相对等效粗糙突起高度:

$$\lambda = \frac{k_s/X}{d} = f(Re^*) \tag{3}$$

式中 λ 为相对等效粗糙突起高度,与沙粒雷诺数有关.则由 Einstein 所得 X 与 k_s/δ 的关系^[1],并按尼古拉兹的结果取 $k_s = d$,可得式(3)所表示的 λ 与 Re^* 关系,如图 1 所示.

将图 1 中的两条曲线对比,可以发现这两条曲线均是以 Re^* 为横坐标的,两者有着惊人的相似.当 Re^* 很大(即紊流粗糙区)时, θ_c 与 Re^* 无关,为一常数,该常数对两曲线分别为 0.06 和 1;当 Re^* 很小(即紊流光滑区)时,两曲线均为一条 45° 直线,即 θ_c 和 λ 都与 Re^* 成反比;而当 Re^* 介于这两者之间(即过渡区)时,均为一下凹曲线,在 $Re^* = 11.6$ 附近有一极小值,此时粗糙突起高度 k_s 与粘性底层厚度 δ 相当.值得注意的是由于两曲线是由不同的实测资料求得,因而其紊流分区的临界值并不完全一致.

实际上,Shields 在研究起动问题时,也曾注意到起动与阻力问题之间的相似性.但他仅将起动条件与尼古拉兹曲线进行类比,说明 Shields 曲线与尼古拉兹曲线在不同紊流区域之间的共性.但此后很少有人对此进行进一步分析探讨. λ 与 θ_c 间存在相似性的原因是相对等效粗糙突起高度 λ 表示的是泥沙颗粒尺寸(包含粘性在内)对水流运动产生的影响,而 Shields 参数 θ_c 表示的是单位面积上的拖曳力与泥沙重量之比,即摩擦系数,有的学者直接称 Shields 参数为阻力系数^[2].因而两者表示的均是阻力特性,从而有其相似性.

2 泥沙起动时的明渠阻力方程

进一步分析图 1 中的两条曲线,可以发现这两条曲线近乎平行,在不同的 Re^* 处相对等效粗糙突起高度 λ 与 Shields 参数 θ_c 之间的比值

$$\beta = \lambda/\theta_c \tag{4}$$

约在 20 ~ 30 之间变化,在此我们可初步认为 β 为一常数.而 β 之所以有一定的变幅,主要是由于两曲线是根据不同的试验数据而定,与实际情况不完全吻合所致.

下面由一些试验资料来确定 λ 与 θ_c 之间的关系.为此,笔者搜集了一些起动资料,为了能同时确定 λ 及 θ_c ,对试验资料的要求是必须完整地包含水深、流速及能坡等项目,有很多较好的资料由于无流速或比降一项而不得不舍去.最终所选用的资料包括 Gilbert, Evert, Neill, Ashide-Bayazit, Kramer, WES, Li-Sun, Wolman-Brush 等 8 家共 182 组实测资料.这些资料的变化范围为,相对容重 $(\gamma_s - \gamma)/\gamma$ 从 1.25 至 3.70,粒径 d 从 0.09 mm 至 22.5 mm,沙粒雷诺数 Re^* 从 0.2 至 3578.所有数据均是在紊流条件下获得的.

利用这些实测资料,计算 θ_c 及由式(4)反求出 λ ,并点绘 θ_c 与 Re^* 及 λ 与 Re^* 的关系,如图 1 所示.实测点与两条曲线并不完全吻合,特别是 λ 与 Re^* 关系的实测数据明显偏大,主要原因是尼古拉兹试验数据中取 $k_s = d$,根据一些学者的研究^[1],泥沙运动时的 k_s 要较 d 大得多.由 λ 及 θ_c 计算 β 值,将 β 与 Re^* 的关系点绘于图 2 中.从图 2 可看出,在 Re^* 很大的变化范围内 β 近似为一常数. β 的平均值为 38.5,从而充分证明了上述推测,即相对等效粗糙突起高度 β 与 Shields 参数 θ_c 之比为一常数.

图 2 表明,尽管 β 为一常数,但其数据点仍有一点分散,可能是由下列因素引起的:(a) λ 值是由式(2)反求而得,由于式(2)是对数关系,因而当 V/U_* 有较小变化时,可导致 λ 的较大变化;(b) 各学者的资料所选用起动标准不完全一致;(c) 各学者试验中所采用的泥沙有一定的非均匀性.

由式(2)(3)(4),及 $\beta = 38.5$,可得如下泥沙起动阻力方程:

$$(\frac{V}{U_*})_c = 5.75\log\left[\frac{0.32(\gamma_s - \gamma)}{\gamma J_c}\right] \tag{5}$$

式中 J_c 为泥沙起动时水力坡度.对于一般天然沙而言, $(\gamma_s - \gamma)/\gamma = 1.65$,则上式变为

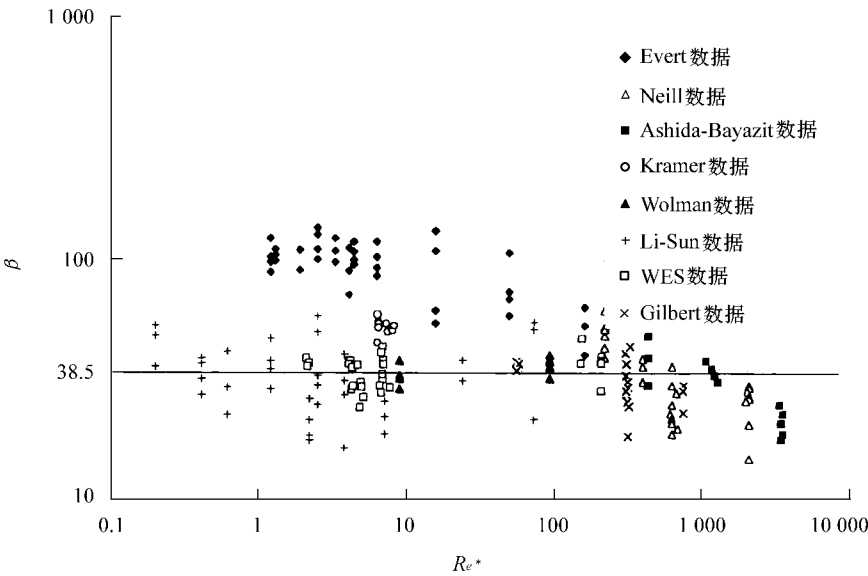


图 2 由实测资料求得的不同 Re^* 时的 β 值

Fig.2 β values at different Re^* according to measured data

$$C_{0c} = \sqrt{\frac{8}{f_c}} = \frac{V_c}{U_{*c}} = 5.75 \log\left(\frac{0.53}{J_c}\right)$$

(6)

式中： f_c ——泥沙起动时的 Darcy-Weisbach 阻力系数； C_{0c} ——起动时的无因次 Chezy 系数， $C_{0c} = C_c/\sqrt{g}$ ， C_c 为起动时的 Chezy 系数， g 为重力加速度。有趣的是式(5)或(6)与泥沙粒径无关，仅与水力坡度 J_c 有关。说明泥沙颗粒起动时的阻力系数独立于泥沙粒径。

3 结 语

本文从泥沙起动条件与明渠阻力特性出发，指出 Shields 参数与相对等效粗糙突起高度之间近似成比例，而且在紊流光滑区、过渡区及粗糙区的变化规律基本一致。利用 182 组项目较为完整的起动试验资料，求得了 Shields 参数 θ_c 与相对等效粗糙突起高度 λ 的比例系数 β 约为 38.5，由此给出了起动阻力方程式，该阻力方程与泥沙粒径无关，可用于稳定渠道设计中。

本文限于对无粘性均匀沙的起动阻力研究，对于非均匀沙时起动阻力关系还有待进一步探讨。

参考文献：

[1] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,1983.184~257.
[2] Bogardi J.Sediment transport in alluvial streams[M]. Budapest: Akademiai Kiado,1974.178~241.

Resistance Equation of Open Channel at Sediment Incipient Motion

HUANG Cai-an¹, XI Bin²

(1. College of Harbor, Waterway and Coastal Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
2. Yangzhou Univ., Yangzhou 225009, China)

Abstract :After analysis of the relationship between Shields Diagram and open channel resistance characteristics, it is pointed out that the non-dimensional critical shear stress is directly proportional to the relative equivalent roughness height. Based on 182 sets of data of critical incipient motion, a resistance equation at incipient motion,unrelated with particle size,is derived. This equation, together with critical shear stress or critical velocity equation, can be used to the design of stable channels.

Key words :sediment incipient motion ;resistance equation ;shields diagram ;similarity ;stable channel design