

非均匀沙分级起动切应力探讨

解 刚, 刘 兴 年

(四川大学高速水力学国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:在考虑水流条件、床沙组成的基础上, 通过对泥沙颗粒受力分析, 建立了滚动平衡方程式, 得出非均匀沙分级起动切应力公式. 在建立公式的过程中考虑了床沙非均匀性对起动的影响, 定义了附加作用力 G , 并将其引入公式中. 通过实验数据的验证表明公式的计算结果与实验数据符合良好.

关键词:非均匀沙; 起动切应力; 起动条件; 泥沙

中图分类号:TV142

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2003)06-0001-03

在水流的作用下, 泥沙开始从静止状态进入运动的初始状态是一个十分重要的临界条件, 称之为起动条件. 起动条件是河流运动力学和泥沙工程学领域的一个极其重要的基本问题. 泥沙起动是对泥沙输移、河道演变与整治、水库上下游河床的堆积和冲刷、河岸稳定、河床粗细化、数学模型基本方程等许多泥沙研究理论和工程泥沙实际问题进行研究的基础. 因此, 泥沙起动在理论和实际中有着十分重要的意义. 但由于水流条件和床沙条件的复杂性, 泥沙起动也是泥沙理论研究的一个难点.

1 泥沙起动研究现状

起动条件的判别方法有三种, 即起动切应力、起动流速和起动功率, 三者是统一的可以相互转化. 起动功率是一个较新的概念, 这方面的研究还不够深入, 实际应用也不多. 目前研究泥沙起动主要考虑两方面的因素: 一方面是泥沙颗粒的受力情况; 另一方面是泥沙颗粒处于床面位置的随机性和作用在颗粒上水流底速的随机性. 基于以上两方面因素, 研究者有的只从力学角度研究泥沙起动, 有的则将这两方面都加以考虑. 由于非均匀沙的复杂性, 颗粒大小不一而且相互影响, 许多研究者认为非均匀沙颗粒还受到粗细颗粒间的隐暴作用. 其实早在 20 世纪 50 年代, 爱因斯坦就在他的推移质输沙率公式中首先引入隐暴系数 ξ 来反映由于粗细颗粒的影响细颗粒所受上举力的减少^[1]. 秦荣昱等^[2]认为非均匀沙颗粒还将受到一个附加作用力 R , 并假定与床面的平均抗剪力 τ_c 成正比. 方红卫^[3]提出了包含暴露度

的作用力臂形式. 李荣^[4]认为非均匀沙的附加作用力应是暴露度、床沙组成 k (以 d_{90} , d_{60} , d_{10} 反映)、床沙粗细化因子 (紧密系数 m) 等的函数.

对于暴露度, 国内外有很多提法. 伊格扎洛夫认为暴露度系数因床沙全动和非全动而易. 国外具有代表性的还有 Garde, Shen 和 Paintal 等的研究. 国内的学者中, 韩其为等^[5]认为绝对暴露度是上游颗粒的最低点到下游相邻颗粒的接触点之间的竖直距离, 而相对暴露度则取绝对暴露度对下游颗粒粒径的比值. 刘兴年等^[6]根据水槽实验和野外实测资料提出了暴露度和各级粒径等效粒径, 暴露高度取颗粒顶点到平均床面的垂直距离. 何文社等^[7]认为绝对暴露度应为上游颗粒的最低点到下游相邻颗粒的最高点的竖直距离, 相对暴露度则取绝对暴露度对下游颗粒粒径的比值. 但由于暴露度难以测量, 现在的很多公式所引用的隐暴系数大多是采用实验和实测所得的起动切应力或起动流速反过来确定的, 因此并未能够真正在物理意义上将其代入公式中.

2 泥沙起动原理和判别标准

影响泥沙起动的因素很多, 其中主要的是水流条件和泥沙条件. 现在考虑群体泥沙颗粒中的一颗泥沙的起动受力情况. 假定泥沙颗粒较粗且为圆球形, 故泥沙颗粒所受的粘结力和薄膜水的影响很小可以忽略不计. 泥沙主要受到水下重力 W' 、上举力 F_L 和拖曳力 F_D 的作用.

$$F_D = C_D \alpha_D d_i^2 \frac{\rho u_b^2}{2} \quad (1)$$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50279024)

作者简介: 解刚 (1978—), 男, 河北秦皇岛人, 硕士研究生, 从事水力学及河流动力学研究.

$$F_L = C_L \alpha_L d_i^2 \frac{\rho u_b^2}{2} \quad (2)$$

$$W' = \alpha_w (\gamma_s - \gamma) d_i^3 \quad (3)$$

式中: C_D, C_L 分别为拖曳力系数和上举力系数; α_D, α_L 分别为垂直于水流方向及竖直方向的泥沙面积系数; α_w 为沙粒体积系数; d_i 为第 i 级泥沙粒径; u_b 为近底瞬时流速; ρ 为水的密度; γ 为水的容重; γ_s 为泥沙的容重。

此外由于非均匀沙的复杂性,粗颗粒对细颗粒具有阻拦、隐蔽的作用,反过来细颗粒对粗颗粒具有包围、填充密实作用,还有颗粒间的接触反力和摩擦力。泥沙组成愈不均匀,所受的力愈复杂。因此对于一颗泥沙来说它的起动受力情况是很复杂的。因此很多学者都认为非均匀沙颗粒除了受到重力、拖曳力和上举力的作用外还受到附加阻力作用^[2,8,9]。在这里把床面泥沙组成对泥沙的影响归结为一个附加作用力 G , 方向向下。定义如下:

$$G = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \alpha_G (\gamma_s - \gamma) \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}} d_i^3 \frac{d_j}{d_i} \varphi(d_j) d(d_j) \quad (4)$$

式中: α_G 为与附加作用力有关的面积系数; d_i, d_j 为第 i, j 级泥沙粒径; $\varphi(d_j)$ 为床面泥沙以重量计的泥沙分布函数; $d(d_j)$ 为微分符号。

若沙粒以滚动的形式起动,以与下游相邻颗粒的接触点为转移中心, L_D, L_L, L_w, L_G 分别为 F_D, F_L, W', G 的转动力臂。当沙粒处于起动临界状态时则有下面的平衡方程式:

$$F_D L_D + F_L L_L = W' L_w + G L_G \quad (5)$$

泥沙起动标准是一个模糊的概念,说法不一。起动标准只是表示了一定的输沙强度。根据窦国仁的研究和 Kramer 的分析,推移质的起动判别标准^[1]可以表示为个别起动

$$p_{c1} = p[u_0 > u_b = \bar{u}_b + 3\sigma_{ub} = 2.11\bar{u}_b] = 0.00135$$

少量起动

$$p_{c2} = p[u_0 > u_b = \bar{u}_b + 2\sigma_{ub} = 1.74\bar{u}_b] = 0.0227$$

大量起动

$$p_{c3} = p[u_0 > u_b = \bar{u}_b + \sigma_{ub} = 1.37\bar{u}_b] = 0.159$$

其中 p 为起动概率; u_b 为瞬时起动底流速; $\bar{u}_b$ 为时均起动底流速; σ_{ub} 为脉动底流速的均方根。

3 公式的推导

克里斯坦森(Christensen)认为底流速的脉动服从正态分布规律^[1],即可以表示为

$$u_b = \bar{u}_b + \sigma_{ub}\beta \quad (6)$$

式中: σ_{ub} 为瞬时底流速均方差,可取 $0.37\bar{u}_b$; β 为代

表床沙起动的情况系数,分别可取 3, 2, 1, 代表个别起动、少量起动、大量起动的状态。因此上式可以表示为 $u_b = (1 + 0.37\beta)\bar{u}_b$ 。 $\bar{u}_b$ 与切应力的关系可以表示为^[8]

$$\bar{u}_b = \alpha\eta\sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (7)$$

式中: τ 为水流切应力; α 为系数,取 $\alpha = 2/3$ ^[8]; η 为床面起动流速与切应力间的关系系数,取 $\eta = 7.055$ ^[8]。

将式(1)(2)(3)(4)(6)(7)代入式(5)得到临界起动切应力公式:

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)d_i} = \frac{1}{(1 + 0.37\beta)^2(\alpha\eta)^2} \cdot \frac{2\alpha_w L_w + 2\alpha_G L_G \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}} \frac{d_m}{d_i}}{C_D \alpha_D L_D + C_L \alpha_L L_L} \quad (8)$$

式中: d_m 为床沙平均粒径。

式(8)可写为

$$(1 + 0.37\beta)^2(\alpha\eta)^2 \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)d_i} = A + B \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}} \frac{d_m}{d_i} \quad (9)$$

$$\text{式中 } A = \frac{2\alpha_w L_w}{C_D \alpha_D L_D + C_L \alpha_L L_L}, B = \frac{2\alpha_G L_G}{C_D \alpha_D L_D + C_L \alpha_L L_L}$$

采用四川大学高速水力学国家重点实验室水槽实验数据(9组),以及刘兴年^[10](16组)、许唯临^[11](8组)、韩其为^[5](46组)实验数据对式(9)进行多项式线性拟合率定,由于在实验中所研究的泥沙均为有颜色沙,故认为都是少量起动, β 可取 3。参数 $A = 2.6282$, $B = 1.1265$ 。故切应力公式为

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)d_i} = \frac{1}{(1 + 0.37\beta)^2(\alpha\eta)^2} \cdot \left(1.1265 \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}} \frac{d_m}{d_i} + 2.6282 \right) \quad (10)$$

垂线平均流速 U 与摩阻流速有下列关系^[5]:

$$u \approx 6.5 u_* \left(\frac{h}{d_{50}} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (11)$$

摩阻流速 u_* 又可表示为

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (12)$$

对于均匀沙, $d_{75} \approx d_{25} \approx d_{50} \approx d_m$, 将式(11)(12)代入式(10)得均匀沙起动流速公式:

$$u_c = 5.35 d_i^{\frac{1}{3}} h^{\frac{1}{6}} \quad (13)$$

式(13)与常见的各种均匀沙起动流速公式 $u_c = k d_i^{\frac{1}{3}} h^{\frac{1}{6}}$ 形式完全一致,且 k 的值与武汉水利电力学院所研究公式^[12]中的 $k = 5.39$ 基本一致。

4 公式的验证

采用彭凯^[13](75组)、唐造造^[14](5组)的实验数据对公式(9)进行验证,结果如图1和图2所示。

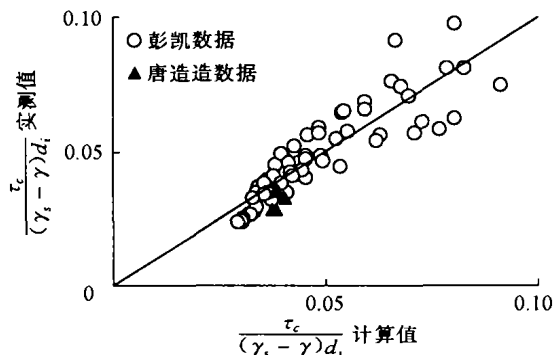


图1 式(9)计算值与实验数据对比

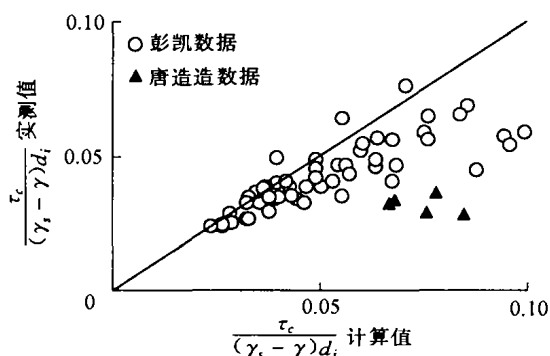


图2 Egiazaroff公式计算值与实验数据对比

图1和图2中直线斜率等于1用于比较。由图1可以看出,式(9)的计算结果与实验数据基本符合。图2为Egiazaroff公式计算值与实验数据的比较,可以看出符合情况并不是很好。显然式(9)的结果更好。

5 结论

非均匀沙起动是很复杂的,本文考虑了非均匀性对泥沙起动的影响,引入了附加阻力 G ,通过对泥沙颗粒的受力分析,建立了滚动平衡方程式,得出了非均匀沙分级起动切应力公式。采用水槽实验数据

(少量起动为标准)对该式作了验证,此外还与Egiazaroff公式作了比较,验证比较的结果表明该式与实验数据符合良好,且较Egiazaroff公式为好。

此外还导出了均匀沙起动流速公式,该式与常见的均匀沙公式形式一致,且与武汉水利电力学院的公式^[12]基本一致。

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.
- [2] 秦荣昱,王崇浩.河流推移质运动理论及应用[M].北京:中国铁道出版社,1996.8~14.
- [3] 方红卫.不均匀沙组成及起动[J].水利学报,1994,(4):43~49.
- [4] 李荣.非均匀沙起动规律研究[J].泥沙研究,1999(2):27~32.
- [5] 韩其为,何明民.泥沙起动规律及起动流速[M].北京:科学出版社,1999.
- [6] 刘兴年,曹叔尤.粗细化过程中的非均匀沙起动流速[J].泥沙研究,2000(4):10~13.
- [7] 何文社,杨具瑞.泥沙颗粒暴露度与等效粒径研究[J].水利学报,2002(11):44~48.
- [8] 何文社,曹叔尤,刘兴年.非均匀泥沙起动临界条件探讨[A].第五届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集[C].武汉:湖北辞书出版社,2002.60~63.
- [9] 杨具瑞,方铎.非均匀沙起动规律研究[J].水利学报,2002(10):82~86.
- [10] 刘兴年.非均匀沙推移质输沙率及其粗化研究[D].成都:成都科技大学,1986.
- [11] 许唯临.双峰型床沙推移质运动[D].成都:成都科技大学,1987.64~73.
- [12] 武汉水利电力学院.河流泥沙工程[M].北京:水利出版社,1981.
- [13] 彭凯.非均匀沙起动规律[D].成都:成都科技大学,1984:58~60.
- [14] 唐造造.宽级配非均匀沙输移规律的实验研究[D].成都:四川联合大学,1994.47~50.

(收稿日期:2003-05-17 编辑:张志琴)

欢迎订阅 2004 年《人民黄河》

《人民黄河》由水利部黄河水利委员会主办,中文核心期刊,水利系统优秀科技期刊;内容涉及防洪、治河、水文、泥沙、水资源、水土保持、灌溉、水利水电工程等多门学科,旨在及时报道治黄的最新科技成果、学术争论及动态,是全面反映黄河治理与开发成果的权威性技术刊物;可供水利水电及相关专业的科技人员、高等院校师生,特别是治黄工作者及广大关心治黄的人士阅读参考。

《人民黄河》创刊于1949年,月刊,国际标准16开本,国内外发行,每月20日出版,每期定价4.50元、全年共54.00元;国内统一连续出版物号:CN41-1128/TV,国际标准连续出版物号:ISSN 1000-1379。

《人民黄河》为自办发行,国内订购处:《人民黄河》杂志社(地址:郑州市金水路11号,450003;电话:0371-6022902,6022409;传真:0371-6025672;电子信箱:rmhh@yellowriver.gov.cn;开户银行:河南省郑州市交行政二支;开户单位:黄河水利委员会新闻宣传出版中心;账号:6020149028852)。国外订购处:中国国际图书贸易总公司(北京399信箱,100044,国外代号M738)。