

泥沙起动判别标准探讨

何文社, 方 铎, 曹叔尤, 杨具瑞, 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: 分析了现有起动标准的不足之处。在制定起动标准时, 不但要考虑水流条件, 还必须考虑泥沙颗粒在床面的相对位置。对同一粒径的泥沙颗粒, 其起动条件不是一个常量, 而是位于一个区间, 它随颗粒在床面的相对暴露度而变化。根据力学原理, 推导了泥沙颗粒起动时的临界无量纲切应力公式, 并对其系数取值进行了理论计算。计算结果表明, 对同一粒径、在同一起动状态下, 泥沙颗粒的起动临界条件并非一个常量。并从理论上分析得到了临界值的范围, 对个别及少量起动, 其无量纲临界切应力为 0.021 ~ 0.042 及 0.041 ~ 0.062。

关键词: 泥沙; 起动标准; 临界切应力

中图分类号: TV 142.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2003)02-143-04

泥沙起动是指泥沙由静止状态转为运动状态时的临界水流条件, 泥沙起动问题是泥沙运动力学方面的基本问题之一。长期以来, 已积累了大量研究成果。但是其中有一个根本问题目前尚未完全解决, 即起动的标准, 它不能仅依靠实验时的目测概估而定。事实上, 由于泥沙起动的随机性, 即使对均匀沙也不存在要动都动、要不动都不动的临界水流条件; 对于非均匀沙, 情况更加复杂。以平均流速表示的起动条件有相当的不确定性, 在同样的时均流速下, 可以起动, 也可以不起动。但是已提出的一些定义或者因为只是定性的, 或者因为缺乏通用性, 难以在实际中具体操作等原因, 尚未被公认。然而, 工程泥沙问题的解决也要求有更可靠、更确切的泥沙起动临界条件作为依据。因此, 本文对起动标准作了一些探讨。

1 起动标准研究现状

在以往的研究中, 为对泥沙起动状况进行判断, 已提出了各式各样的起动标准。但人们不得不承认, 各家实验资料之间, 实验室资料与野外资料之间, 以及公式与实测点据之间, 常常存在较大的偏离。除了泥沙运动所固有的复杂特性外, 一个重要的原因就是起动标准不一致。现有的起动标准大体上可分为定性及定量两大类。在定性标准中, 最为著名的当推 Kramer 在 1935 年提出的标准^[1]。他针对非均匀沙, 把推移质运动分为 4 个阶段, 即无泥沙运动、弱动、中动及普动。但定性标准主观性强, 操作中随意性大, 其实用性受到了限制。因而一些学者对定量标准从不同角度进行了研究。

1.1 概率标准

以窦国仁^[1]为代表提出了起动概率标准。在考虑了水流的脉动, 提出了与 Kramer 推移质泥沙运动 3 种状态相应的起动概率: 即个别起动、少量起动及大量起动, 其相应的起动概率分别为 0.0135、0.0227 及 0.159。故可以取某一定常的起动概率作为判断泥沙起动的标准。但此标准未考虑泥沙颗粒在床面相对位置对起动标准的影响。

收稿日期: 2002-01-09; 修订日期: 2002-04-01

基金项目: 国家自然科学基金和水利部联合资助重大项目 (59890200); “九五”课题资助项目 (95-5-4)

作者简介: 何文社(1966-), 男, 甘肃宁县人, 四川大学副教授, 博士研究生, 主要从事水力学及河流动力学的研究。

1.2 颗数计的标准

亚林^[2]将 $\frac{m}{At} \sqrt{\frac{D^2}{s}}$ 作为泥沙起动的标准。其中 m 为在时间 t 内从河床面积 A 范围内冲刷他移的泥沙颗粒数。对于各种粒径的泥沙应该取一个统一的运动强度，因而，在进行两种密度相同，粒径相差 10 倍的起动试验时，为使两组试验的 $\frac{m}{At} \sqrt{\frac{D^2}{s}}$ 值相同，粒径较粗的那一组实验的 m/At 必须较粒径较细的一组小 $10^{2.5}$ 倍。

冷魁^[3]以个别起动状态为起动临界条件，据此提出了均匀沙和非均匀沙以个别颗粒数计的判别标准。但此标准同样没有考虑颗粒在床面的相对位置对起动的影响。

1.3 输沙率标准

美国水道试验站曾规定以推移质输沙率达到 $14 \text{ cm}^3/\text{m} \cdot \text{min}$ 作为起动标准^[4]；韩其为等^[5]提出的标准内涵与此相似，对水槽、野外沙质及卵石河床分别采用不同的无因次输沙率参数来作为起动标准。Taylor 等^[4]为代表于 1971 年提出的输沙率标准，在平坦沙质床面的水槽中做了一些定量试验，得到泥沙在起动阶段的无因次输沙率资料，取无因次输沙率 $q_s/su \cdot D = 0.02$ 作为起动标准。

可见研究者运用输沙率标准时，是寻求某种床沙条件下某级泥沙的起动条件。这样便产生了一个问题：该起动条件对应何种床面条件呢？

如在清水冲刷条件下各粒径级泥沙的输沙率随时间发生变化，在不同时刻就会得到不同的起动粒径。因此，以某一输沙率或无因次输沙率来确定起动标准有其不足之处。

1.4 可动层标准

Bagnold^[3]认为，当水流强度和泥沙起动临界水流强度相等时，床面可动层的厚度为 $1.4D_c$ 。彭凯等提出的可动层标准为 $1.2D_c$ 。然而，在相同水流条件下，对不同的床沙级配，其标准是可变的。

2 泥沙起动标准理论探讨

从理论上讲，与起动临界条件相应的输沙率应为零，但这样的标准实用意义不大。因为，即使在水力指标远较 Shields 所规定的泥沙起动指标为小的前提下仍有泥沙运动，只不过运动强度较小而已。因此，所谓的起动临界条件，实际上总是反映一定的颗粒运动强度，或其处于运动状态的概率。

在清水冲刷条件下，泥沙的起动就是床面粗化的开始，起动过程又是河床组成不断变化的过程。因为，在水力因素不变的情况下，随床面粗化程度的加大，输沙率越来越小，对同一粒径级的泥沙颗粒来说，起动概率越来越小。在有泥沙补给的条件下，情况更为复杂，从而使得起动的判别标准更难确定。故将起动标准定为一个常量，在理论上还需进一步探讨。

一般影响泥沙起动的因素主要有两个方面，即水流条件和泥沙条件。对水流条件原来仅考虑平均流速，现在考虑了脉动及其所对应的概率，从理论角度上看，是比较合理的。但还有一个重要的因素，即泥沙条件，考虑得不是很完善。如对均匀沙，当某个颗粒完全暴露于床面上时与其完全隐蔽时，或位于某个位置时，即使水流条件相同，其起动条件也不同。这说明对于一定粒径的泥沙颗粒，在一定的起动标准下，其起动条件并非为一个常量，而是随泥沙颗粒在床面的相对暴露度而变。对非均匀沙，不但与泥沙颗粒在床面的相对暴露度有关，且与级配有关。

3 泥沙起动模式及起动标准

3.1 起动标准

研究推移质泥沙起动时所用到的模式主要有滑动、滚动及跳跃 3 种。无论采用哪种模式，一般都是在力学分析的基础上，有些还结合概率统计等来推导临界条件。但不管采用何种模式得到的起动流速公式最后均要通过实测资料来率定其系数，故不同的研究者在其所采用的资料范围、或相应的条件内与公式计算结果吻合较

好。但对不同研究者得到的公式，即使其公式在形式上相差不大，但其系数却相差较大。对此不应仅仅归结为泥沙颗粒起动的概率问题，即不同研究者对起动概率的主观看法，或采样方法，还应对起动模式及颗粒在床面的相对位置进行一些探讨。

对散粒体泥沙颗粒上受力情况已比较清楚。一般有水流拖曳力 F_D 、上举力 F_L ，泥沙颗粒的水下重力 W ，其表达式分别为

$$F_D = C_D D d^2 \frac{u_b^2}{2}, \quad F_L = C_L L d^2 \frac{u_b^2}{2}, \quad W = w(s - \rho) d^3 \quad (1)$$

式中 C_D 、 C_L 及 w 分别为与水流拖曳力、上举力及水下重力相应的面积系数，对球体分别为 $C_D = C_L = 1/4$ ， $w = 1/6$ ； C_D 、 C_L 为拖曳力及上举力系数，对暴露在河床表面的单个球体颗粒一般取 $C_D = 0.4$ ， $C_L = 0.1^{[6]}$ ； u_b 为水流作用在床面沙粒上的瞬时流速； s 、 ρ 分别为泥沙颗粒及水的容重； ρ 为水的密度； d 为泥沙颗粒粒径。

瞬时速底速 u_b 与平均底速 \bar{u}_b 的关系为^[1]

$$u_b = (1 + 0.37 \lambda) \bar{u}_b \quad (2)$$

式中 λ 为与起动标准相应的参数，对应龚国仁泥沙运动状态相应的起动概率：即个别起动(起动概率为 0.00135)、少量起动(起动概率为 0.0227)及大量起动(起动概率为 0.159)，分别为 3、2、1。

平均底速 \bar{u}_b 、摩阻流速 u_* 及切应力 τ 间的关系为

$$\frac{\bar{u}_b}{u_*} = \tau = \sqrt{\tau} \quad (3)$$

式中 λ 为参数，根据文献[5]的研究结果，可知 $\lambda = 3.73$ 。

3.2 起动模式

在起动概率相同时，滚动时的临界条件最小^[7]。由滚动平衡条件可知

$$F_D L_D + F_L L_L = W L_W \quad (4)$$

式中 L_D 、 L_L 及 L_W 分别为 F_D 、 F_L 及 W 的力臂。

整理式(1)~式(4)，可得无量纲临界切应力数 c 为

$$c = \tau / (\rho s - \rho) d = (1 + 3 \lambda \times 0.37)^2 A / (1 + 0.37 \lambda)^2 \quad (5)$$

式中 A 为综合系数， $A = \frac{4}{3} \frac{1}{(1 + 0.37 \lambda)^2} \frac{L_W}{C_D L_D + C_L L_L}$ 。对均匀沙，当颗粒暴露度最大时，即所研究的床面颗粒位于两个紧贴颗粒之上，此时 $L_L = L_W = 0.25 d$ ， $L_D = 0.577 d$ ，对个别起动状态($\lambda = 3$)，经计算可得 $A = 0.021$ ；当颗粒完全隐蔽时，即所研究颗粒的最低点与其相邻下游颗粒的最低点位于同一水平面时，暴露度最小，此时的拖曳力、上举力系数及力臂如何取值？笔者认为可继续采用单个球体颗粒完全暴露时的参数值，但此时的粒径应采用其等效粒径 d^* 。

$$d_i^* = d_i \left[1 + \frac{d_m}{d_i} \right] \quad (6)$$

式中 d_i 为所研究的第 i 级颗粒的粒径； d_m 为床沙的平均粒径； β 为相对暴露系数，一般取 $\beta = 0 \sim 1$ 。当颗粒暴露度最大时， $\beta = 0$ ；当颗粒暴露度最小时，即完全隐蔽时， $\beta = 1$ 。等效粒径 d_i^* 相当于粒径为 d_i 的颗粒在目前所处位置的情况下，与完全暴露在床面上的粒径为 d_i^* 的单个颗粒的效果相同，即起动粒径相同。

由式(5)及式(6)可得起动时临界无量纲临界切应力数 c 为

$$c = \frac{\tau}{(\rho s - \rho) d_i} = \frac{0.0935}{(1 + 0.37 \lambda)^2} \left[1 + \frac{d_m}{d_i} \right] \quad (7)$$

本文对均匀沙的 c 进行了计算。当颗粒完全暴露时，取 $\beta = 0$ ，按式(6)计算可得泥沙颗粒的等效粒径 $d^* = d$ 。对个别起动取 $\lambda = 3$ ，按式(7)即可计算出 $c = 0.021$ 。而完全隐蔽时，取 $\beta = 1$ ，则可计算出 $c = 0.042$ 。取 $\lambda = 3$ ，则可计算少量起动时的 c 值，现将计算结果列于表 1。从表 1 可知，在同一起动状态条件下， c 的取值并

表 1 τ_c 与起动状态和颗粒位置的关系Table 1 Relationship between τ_c incipient motion status and location of grain

颗粒相对位置	d^*	个别起动 τ_c	少量起动 τ_c
完全暴露	0	d	0.021
完全隐蔽	1	$2d$	0.042

非为一个常量,而是位于一个区间,它随颗粒在床面的相对位置而变。然而在具体实验中使用时必须与颗粒在床面的位置相联系。如所研究颗粒的顶部位于同一水平面,则在起动标准一定时,完全隐蔽的颗粒起动时的 τ_c 值最大。

4 结 语

对起动标准进行了回顾,分析了部分起动标准的不足。说明在制定起动标准时,应同时考虑水流条件及颗粒在床面的位置。在水流强度一定时,对于同一起动状态,由于颗粒在床面位置的变化,对同一粒径泥沙颗粒来说,其起动标准不是一个常量,而是在一个区间变化。

采用力学原理与概率相结合的方法,对泥沙颗粒滚动起动模式的临界条件进行了推导。通过理论分析得到了相应起动状态下的临界切应力系数取值,对个别起动状态为 0.021~0.042,少量起动状态为 0.041~0.062。

在探讨起动标准时,应考虑颗粒在河床表面的相对位置,尤其在水流强度较小时。其临界条件的选取,对输沙率影响较大,这可从清水冲刷过程中得到证明,输沙率越来越小,对同一粒径泥沙颗粒来说,其起动条件变得越来越大。

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. 230 - 231.
- [2] Yalin M S. Mechanics of sediment transport[M]. Pergamon Press, 1972. 74 - 110.
- [3] 冷魁. 非均匀沙卵石起动流速及输沙率的试验研究[D]. 武汉:武汉水利电力大学,1993.
- [4] 范诺尼 V A 主编. 泥沙工程[M]. 北京:水利出版社,1981. 73 - 126.
- [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. 104 - 109.
- [6] 谢鉴衡. 河流泥沙运动工程学(上册)[M]. 北京:水利电力出版社,1983. 37 - 56.
- [7] Sung-Uk Choi, Seungjoo Kwak. Probabilistic analysis of incipient motion of sediment stochastic hydraulics 2000[R]. Balkema, rotterdam. 2000. 317 - 323.

Study on standards for incipient motion of sediment^{*}

HE Weir-she, FANG Duo, CAO Shu-you, YANG Ju-rui, LIU Xing-nian

(State Key Hydraulics Laboratory of High Speed Flows, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The shortage of the current standards for estimating the incipient motion of sediment particles is analyzed in this paper. The standards for estimating incipient motion of sediment not only should consider the condition of river flow, but also consider the relative location of sediment grains within riverbed. The condition of incipient motion for one diameter grain is not a constant, but a variant located in a region and varying with the relative expose degree of the grain. The formula for calculating the conditions of threshold motion is obtained according rolling mode based on force and momentum balances, and the value of dimensionless critical shear stress of each status is calculated theoretically.

Key words: sediment; incipient motion standards; critical shear stress

* The project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 59890200).