

DOI: CNKI: 32-1309/P. 20110115. 2225. 007

# 基于等效粒径的无粘性泥沙起动条件对比研究

聂锐华, 王 涛, 黄 尔, 刘兴年

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

**摘要:** 通过将等效粒径引入非均匀沙起动条件表达式, 得到了基于等效粒径的非均匀沙起动条件统一表达式, 并从反映泥沙的非均匀性引起的荫蔽(暴露)作用与分选作用角度对当前有一定影响的非均匀沙起动条件的等效粒径表达式进行了对比研究。结果表明, 各家公式都能够反映泥沙的非均匀性引起的荫蔽(暴露)作用, 较粗泥沙颗粒的等效粒径小于其自身粒径, 容易起动, 较细泥沙颗粒的等效粒径大于其自身粒径, 较难起动。但是不同公式之间还是有一定的差异, 主要反映在细颗粒的荫蔽作用方面。不同公式区分非均匀沙颗粒间荫蔽(暴露)作用的特征粒径是不同的。韩其为、张启卫、刘兴年公式能较好的反映泥沙起动时的分选作用。对于细颗粒泥沙而言, Egiazaroff、Hayashi 与秦荣显公式在冲刷时体现由于床沙粒径不同而产生的分选作用相对较差。

**关键词:** 起动条件; 无粘性泥沙; 等效粒径; 荫蔽(暴露); 分选

**中图分类号:** TV147.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2011)01-0084-05

无粘性泥沙的起动作为研究泥沙输移、航道整治、河渠稳定设计、冲刷过程和模型设计等问题的基础, 是解决山区卵石河道泥沙问题必须面临的基本问题。国内外学者曾进行过大量的研究, 取得了许多成果。这些成果通常是将一些床沙起动的水流特性参数(流速、切应力、水流功率和流量)与推移质泥沙输移参数以公式或图表的形式联系起来<sup>[1-5]</sup>。当前, 许多学者继续推出新的公式, 而对于已有各家公式之间的差异及产生差异的原因研究相对较少, 这对泥沙研究中公式的选用带来了一定的难度。

聂锐华等<sup>[6]</sup>深入分析了泥沙起动的已有研究成果, 建立了3种常见泥沙起动条件的转换关系。在此基础上将收集到的几十个国内外的泥沙起动条件进行了对比, 得到了不同学者的泥沙起动条件的差异, 为合理选用泥沙起动条件提供了参考。Buffington 和 Montgomery<sup>[7]</sup>系统地分析了他们收集的80年的砾石河床河流起动研究的颗粒中值粒径量纲一临界切应力 $\tau_{c50}^*$ , 分析认为, 砾石河床河流明显缺乏一个普遍适用的 $\tau_{c50}^*$ 值, 这导致在特定应用中需要慎重选择适当的 $\tau_{c50}^*$ 。褚君达<sup>[8]</sup>曾整理分析了收集到的国内外24位学者的无粘性均匀沙无因次起动切应力资料, 为无粘性均匀沙的起动研究提供了参考。

本文通过将等效粒径引入非均匀沙起动条件表达式, 得到了基于等效粒径的非均匀沙起动条件统一表达式, 并从反映泥沙的非均匀性引起的荫蔽(暴露)作用与分选作用角度对当前有一定影响的非均匀沙起动条件的等效粒径表达式进行了对比研究。一方面丰富了非均匀沙起动条件的选择方法, 另一方面可为建立更适合实际需要的非均匀沙等效粒径表达式提供参考。

## 1 基于等效粒径的非均匀沙起动条件统一表达式

等效粒径的概念是刘兴年等<sup>[9]</sup>在研究非均匀沙起动时提出的。等效粒径是指具有一定暴露度的泥沙颗粒起动时的临界条件与某一粒径的泥沙颗粒完全暴露时的临界条件相等, 则将此完全暴露的泥沙颗粒的粒径称为该有一定暴露度的泥沙颗粒的等效粒径。刘兴年等<sup>[9]</sup>通过水槽试验和野外实测, 获得了非均匀沙部分

收稿日期: 2010-01-27; 网络出版时间: 2011-01-15

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20110115.2225.007.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50739002); 四川大学青年教师科研启动基金资助项目(2009SCU11070)

作者简介: 聂锐华(1978-), 男, 安徽岳西人, 讲师, 博士, 主要从事河流动力学研究。E-mail: scunie@163.com

可动与全部可动条件下的颗粒暴露度和粒径的相关关系, 提出了等效粒径表达式为

$$d_i^* = \begin{cases} d_i + A(d_A - d_i) & d_i \leq d_c^* \\ d_i + A(d_A - d_c^*) & d_i > d_c^* \end{cases} \quad (1)$$

式中  $d_i^*$  为非均匀沙中某一粒径  $d_i$  的等效粒径;  $A$  为表征床沙位置关系和上游泥沙补给条件的重要特征参数。  $A$  值越大, 粗化程度越强(上游泥沙补给不足), 细颗粒泥沙受到的荫蔽作用也越强, 一般  $A = 0 \sim 1$ ;  $d_A$  和  $d_c^*$  为床沙代表粒径和床沙位置调整的最大可动粒径, 分别由下式确定:

$$d_A = \sum_{i=1}^m d_i p_i + \sum_{i=m+1}^n d_c^* p_i, \quad d_c^* = \frac{\gamma h J}{0.024(\gamma_s - \gamma)} \quad (2)$$

式中  $p_i$  为  $i$  级粒径颗粒所占百分比;  $n, m$  分别为床沙的总分级数与  $d_i < d_c^*$  的分级数;  $\gamma_s, \gamma$  分别为泥沙与水的容重;  $h$  为水深,  $J$  为水面比降。分析式(1)可以发现, 当颗粒较细时, 等效粒径  $d_i^*$  要大于其自身粒径  $d_i$ ; 当颗粒较粗时, 则等效粒径  $d_i^*$  要小于其自身粒径  $d_i$ 。因此式(1)反映了非均匀沙中细颗粒受到荫蔽、粗颗粒受到暴露的特性。

由刘兴年定义的等效粒径可以得到

$$\tau_{ci} = \Theta_{ci}(\gamma_s - \gamma)d_i = \tau_c d_i^* = \Theta_c(\gamma_s - \gamma)d_i^* \quad (3)$$

式中  $\Theta_{ci}$  为非均匀沙中某一粒径  $d_i$  的无因次起动切应力;  $\Theta_c$  为均匀沙的无因次起动切应力;  $\tau_{ci}$  为非均匀沙中某一粒径  $d_i$  的起动切应力;  $\tau_c d_i^*$  为粒径为  $d_i^*$  的均匀沙的起动切力。可以得到基于等效粒径的非均匀沙起动条件统一表达式为

$$\Theta_{ci}/\Theta_c = d_i^*/d_i \quad (4)$$

## 2 非均匀沙起动条件的等效粒径表达式对比

现有的非均匀沙起动公式中, 一些研究者通过研究非均匀沙的床面特点来研究泥沙颗粒在床面的位置影响, 直接引入非均匀沙颗粒间荫蔽(暴露)作用, 通过暴露度来反映粗细颗粒之间的影响, 以爱因斯坦、韩其为和何明民、刘兴年、方红卫等为代表<sup>[10]</sup>。一些研究者将泥沙颗粒间的隐蔽与暴露作用归功于泥沙颗粒在床面上相互排列的位置变化, 引入附加阻力来反映颗粒不均匀性对起动条件的影响, 以张启卫、秦荣昱和王崇浩、何文社等为代表<sup>[10]</sup>。

根据韩其为的研究<sup>[11]</sup>, 垂线平均流速  $U$  与摩阻流速  $u_*$  之间有如下关系:

$$U = 6.5u_* \left( \frac{h}{d} \right)^{\frac{1}{4+\lg \frac{h}{d}}} \approx 6.5u_* \left( \frac{h}{d} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (5)$$

而摩阻流速  $u_*$  与切应力之间的关系为

$$u_*^2 = \frac{\tau}{\rho} \quad (6)$$

$U$  与  $u_*$  之间亦有如下关系:

$$U = 5.75u_* \lg \left( \frac{\alpha h}{d} \right) \quad (7)$$

式中  $\tau$  为切应力;  $d$  为颗粒粒径;  $h$  为水深;  $\alpha$  为系数。

因此, 选择当前有一定影响的非均匀沙起动条件表达式<sup>[10]</sup>, 根据式(4)~式(7), 可以得到不同作者的非均匀沙起动条件的等效粒径表达式(表1)。

### 2.1 颗粒荫蔽(暴露)作用

首先从反映泥沙的非均匀性引起的荫蔽(暴露)作用角度对不同非均匀沙起动条件的等效粒径表达式进行了对比研究。按表1所列不同公式的等效粒径表达式计算得到不同公式的分组等效粒径与颗粒粒径的比值, 如表2所示。各家公式的参数取值参考文献[10]。从表2可以看出, 不同公式计算出来的等效粒径都能

表 1 不同起动条件相应的等效粒径表达式

Table 1 Expressions of equivalent grain size of different incipient motion conditions

作者	等效粒径表达式	作者	等效粒径表达式
Egiazaroff (1965)	$d_i^* = \frac{1.639d_i}{[\lg(19d_i/d_m)]^2}$	Hayashi, et al (1980)	$d_i^* = \begin{cases} d_m & d_i/d_m \leq 1 \\ d_i \left( \frac{\lg 8}{\lg(8d_i/d_m)} \right)^2 & d_i/d_m > 1 \end{cases}$
陈媛儿与谢鉴衡 (1998)	$d_i^* = \frac{0.445d_i (d_i/d_m)^{1/4}}{[\lg(7.55d_i/d_m)]^2}$	张启卫 (1992)	$d_i^* = d_i \left( 1 + 0.07 \frac{d_m}{d_i} \ln \frac{d_m}{d_i} \right)$
秦荣昱与王崇浩 (1996)	$d_i^* = 0.4d_i \left( 1 + 1.75 \frac{d_m}{d_i} \right)$	韩其为与何明民 (1999)	$d_i^* = d_i \left[ \frac{F_b^{-1}(0.3 \times 10^{-6}, d_i/d_m)}{F_b^{-1}(0.3 \times 10^{-6}, 1)} \right]^2$
孙志林与谢鉴衡 (1997)	$d_i^* = \left( \frac{d_m}{d} \right)^{1/2} \sigma_\varepsilon^{-1/4} d_i$	刘兴年, 等 (1986)	$d_i^* = \begin{cases} d_i + A (d_\lambda - d_i) & d_i \leq d_c^* \\ d_i + A (d_\lambda - d_c^*) & d_i > d_c^* \end{cases}$

够反映泥沙的非均匀性引起的荫蔽(暴露)作用,较粗泥沙颗粒的等效粒径小于其自身粒径,容易起动,较细泥沙颗粒的等效粒径大于其自身粒径,较难起动。从不同公式计算出来的等效粒径反映泥沙的非均匀性引起的荫蔽(暴露)作用效果来看, Egiazaroff、Hayashi 与秦荣昱公式基本相当,韩其为、张启卫与刘兴年公式基本相当;但是不同公式之间还是有一定的差异,主要反映在细颗粒的荫蔽作用方面。

表 2 不同公式的分组等效粒径与颗粒粒径比值

Table 2 Comparison of different formulas between equivalent grain size and particle size

$d_i/d_m$	不同公式的 $d_i^*/d_i$							
	Egiazaroff	Hayashi	韩其为	陈媛儿	秦荣昱	张启卫	孙志林	刘兴年
0.25	3.58	4.00	1.16	4.13	3.20	1.39	1.68	1.53
0.50	1.71	2.00	1.08	1.12	1.80	1.10	1.19	1.08
1	1.00	1.00	1.00	0.58	1.10	1.00	0.84	0.88
3	0.53	0.65	0.86	0.32	0.63	0.97	0.49	0.95
5	0.42	0.56	0.77	0.27	0.54	0.98	0.38	0.97
7	0.36	0.52	0.71	0.24	0.50	0.98	0.32	--
9	0.33	0.49	0.65	0.23	0.48	0.98	0.28	--

假定非均匀沙中  $d_i = d_m$  的颗粒,其等效粒径为反映泥沙的非均匀性引起的荫蔽(暴露)作用的特征粒径。分析发现不同公式区分非均匀沙颗粒间荫蔽(暴露)作用的特征粒径是不同的。Egiazaroff、Hayashi、韩其为、张启卫公式中,特征粒径等于非均匀沙的平均粒径,也就是说非均匀沙中  $d_i = d_m$  的颗粒与粒径为  $d_m$  的均匀沙的起动条件是相同的;换句话说,这些公式认为非均匀沙的非均匀性对非均匀沙中  $d_i = d_m$  的颗粒没有影响,这一点值得商榷。陈媛儿、孙志林、刘兴年公式给出的特征粒径小于床沙平均粒径,表明这些公式将非均匀沙的非均匀性对非均匀沙中  $d_i = d_m$  的颗粒的影响考虑为暴露作用。秦荣昱公式给出的特征粒径大于床沙平均粒径,表明秦荣昱公式将非均匀沙的非均匀性对非均匀沙中  $d_i = d_m$  的颗粒的影响考虑为荫蔽作用。到底该将非均匀沙的非均匀性对非均匀沙中  $d_i = d_m$  的颗粒的影响考虑为暴露作用还是荫蔽作用,这一点在以后的工作中值得进一步研究。

## 2.2 床沙分选作用

其次从反映泥沙的非均匀性引起的分选作用角度对不同非均匀沙起动条件的等效粒径表达式进行了对比研究。按表 1 所列不同公式的等效粒径表达式计算得到不同公式的分组等效粒径与颗粒平均粒径的比值,如表 3 所示。各家公式的参数取值参考文献[10]。从表 3 可以看出,不同公式计算出来的等效粒径在反映泥沙的非均匀性引起的分选作用是不同的。从各家公式计算出来的等效粒径体现冲刷时水流对床沙的分选作用来看, Egiazaroff、Hayashi 与秦荣昱公式基本相当,韩其为、张启卫、刘兴年公式基本相当。其中,韩其为、张启卫、刘兴年公式能够较好的体现冲刷时水流对床沙的分选作用。对于细颗粒泥沙而言, Egiazaroff、Hayashi 与秦荣昱公式给出的等效粒径都比较大,几乎与床沙平均粒径相同,尤其是 Hayashi 公式,其等效粒径

与床沙平均粒径相同, 因此这 3 个公式在冲刷时体现由于床沙粒径不同而产生的分选作用相对较差。

表 3 不同公式的分组等效粒径与颗粒平均粒径比值

Table 2 Comparison of different formulas between equivalent grain size and particle median size

$d_i/d_m$	不同公式的 $d_i^*/d_m$							
	Egiazaroff	Hayashi	韩其为	陈媛儿	秦荣昱	张启卫	孙志林	刘兴安
0.25	0.89	1.00	0.29	1.03	0.80	0.35	0.42	0.38
0.50	0.86	1.00	0.54	0.56	0.90	0.55	0.59	0.54
1	1.00	1.00	1.00	0.58	1.10	1.00	0.84	0.88
3	1.59	1.96	2.59	0.96	1.90	2.92	1.46	2.85
5	2.10	2.82	3.84	1.34	2.70	4.89	1.88	4.85
7	2.54	3.62	4.99	1.71	3.50	6.86	2.22	--
9	2.96	4.38	5.88	2.07	4.30	8.85	2.52	--

实际工作中从床沙的分选作用角度来选择适宜的泥沙起动条件最值得关注的问题是河床的粗化细化过程。天然河流可能处于冲刷状态, 亦可能处于淤积状态, 亦可能处于冲淤交替状态。即由于来水来沙条件的不同, 河床组成的不同, 水流可能对床沙的分选作用强烈; 亦有可能有分选作用, 但是不强烈; 亦有可能推移质级配与床沙级配完全一致, 根本不存在分选。

### 3 结 论

(1) 通过将等效粒径引入非均匀沙起动条件表达式, 得到了基于等效粒径的非均匀沙起动条件统一表达式  $\theta_{ci}/\theta_c = d_i^*/d_i$ 。

(2) 对 8 家非均匀沙起动条件的等效粒径表达式的对比研究表明, 各家公式都能够反映泥沙的非均匀性引起的荫蔽(暴露)作用, 较粗泥沙颗粒的等效粒径小于其自身粒径, 容易起动, 较细泥沙颗粒的等效粒径大于其自身粒径, 较难起动。从各家公式计算出来的等效粒径反映泥沙的非均匀性引起的荫蔽(暴露)作用来看, Egiazaroff、Hayashi 与秦荣昱公式基本相当, 韩其为、张启卫、刘兴安公式基本相当。但是不同公式之间还是有一定的差异, 主要反映在细颗粒的荫蔽作用方面。不同公式区分非均匀沙颗粒间荫蔽(暴露)作用的特征粒径是不同的。

(3) 对 8 家非均匀沙起动条件的等效粒径表达式的对比研究表明, 韩其为、张启卫、刘兴安公式能较好的反映泥沙起动时的分选作用。对于细颗粒泥沙而言, Egiazaroff、Hayashi 与秦荣昱公式在冲刷时体现由于床沙粒径不同而产生的分选作用相对较差。

#### 参考文献:

- [1] LICK W, JIN L, GAILANI J. Initiation of movement of quartz particles[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(8): 755-761.
- [2] CAO Zhi-xian, PENDER G, MENG Jian. Explicit formulation of the shields diagram for incipient motion of sediment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(10): 1097-1099.
- [3] DE LINARES M, BELLEUDY P. Critical shear stress of bimodal sediment in sand-gravel rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 133(5): 555-559.
- [4] SARMIENTO O A, FALCON M A. Critical bed shear stress for unisize sediment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 132(2): 172-179.
- [5] MARSH N A, WESTERN A W, GRAYSON R B. Comparison of methods for predicting incipient motion for sand beds[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(7): 616-621.
- [6] 聂锐华, 刘兴安, 曹叔尤, 等. 无粘性泥沙起动条件对比研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(5): 584-587. (NIE Rui-hua, LIU Xing-nian, CAO Shu-you, et al. Comparison study on incipient motion conditions for cohesionless sediment [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(5): 584-587. (in Chinese))

- [7] BUFFINGTON J M, MONTGOMERY D R. A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies with special reference to gravel-bedded rivers[J]. *Water Resource Research*, 1997, 33(8):1993-2029.
- [8] 褚君达. 无粘性泥沙的起动条件[J]. *水科学进展*, 1993, 4(1):37-43. (CHU Jun-da. Conditions of incipient motion of non-cohesive sediments[J]. *Advances in Water Science*, 1993, 4(1):37-43. (in Chinese))
- [9] 刘兴年. 非均匀沙推移质输沙率及其粗化稳定[D]. 成都: 成都科技大学, 1986. (LIU Xing-nian. Non-uniform bed load transport rate and coarsening stabilization [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1986. (in Chinese))
- [10] 聂锐华. 非均匀沙卵石推移质输移复杂特性研究[D]. 四川大学博士论文, 2010. (NIE Rui-hua. Study on the complicated properties of nonuniform gravel bedload transport[D]. Chengdu: Sichuan University, 2010. (in Chinese))
- [11] 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. (HAN Qi-wei, HE Ming-min. The incipinet mechanism and velocity of sediment[M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese))

## Comparison study on the conditions for incipient motion of cohesionless sediment based on the concept of equivalent grain size \*

NIE Rui-hua, WANG Tao, HUANG Er, LIU Xing-nian

(*State Key Laboratory of Hydraulic and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China*)

**Abstract:** A uniform expression is presented to describe the incipient motion of nonuniform sediment based on the concept of equivalent grain size. Using eight formulas, a comparison study is conducted to explore the issues of hiding and exposure and the aspects of sediment sorting due to heterogeneity. Results show that the hiding and exposure effect is well described in the modeling of nonuniform sediment transport by all eight formulas. Coarse sediment is usually underrepresented by its equivalent particle size, which can artificially ease the condition for incipient motion of coarse sediment. The opposite is true for fine sediment. However, there are still some differences among the formulas, mainly in dealing with the hiding effect of fine sediment. Different formulas use different feature sizes to simulate the hiding and exposure effect of nonuniform sediment. Among those, HAN Qi-wei, ZHANG Qi-wei and LIU Xing-nian formulas can better handle the sorting function for sediment incipient motion. For fine sediment, the performance of Egiazaroff, Hayashi and QIN Rong-yu formulas is less satisfactory due to clear-water scouring.

**Key words:** incipient motion; cohesionless sediment; equivalent grain size; hiding and exposure; sorting

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50739002).