

沉积物选择性起动机理及其在砾石沉积 临界值分析中的应用*

李振林 秦蕴珊

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

Paul D. Komar

(美国俄勒冈州立大学海洋学院)

摘要 混合粒径条件下沉积物的起动机理不同于均匀粒径条件下沉积物的起动机理。混合粒径条件下沉积物的起动, 可由沉积物转动角 Φ 随相对粒径及颗粒形状而变化的依从关系进行解释。通过对砾石沉积物因不同粒径、形状而发生选择性起动的动力过程的分析, 得出了砾石沉积物转动角选择性起动的理论模式, 采用该模式来定量计算潮汐流和河流中砾石沉积物选择性起动的临界值, 计算结果和测量结果吻合, 从而证实了该模式的可靠性。

关键词 沉积物 选择性起动 运动机理

具有不同粒径、宽度及形状的沉积物在水流中的选择性起动是沉积物搬运研究中的一个十分重要的方面。选择性起动控制着沉积物的次序和分选作用, 因而控制着河流和海滩砂矿的形成^[1]。选择性起动, 近来还被用来解释河流和潮流中砾石沉积临界值同标准谢尔兹曲线之间的差异^[2]。本文首先对以转动角为基础, 沉积物因粒径、形状的不同而发生选择性起动的动力过程进行分析, 尔后以粒径、形状同选择性起动作用间的相互关系来直接计算混合粒径沉积物选择性起动的临界值, 而野外测量数值同这些计算值的比较则对转动角选择性起动的理论模式进行了验证。

一、沉积物起动临界转动角的分析

沉积物颗粒临界转动角的分析, 最早由 White 和 Bagnold 给出^[3]。下面只给出其简略推导过程。

如图 1 所示, 颗粒的临界起动与颗粒围绕其同下伏颗粒的支点 P 所发生的转动作用有关, 当水流施加的力矩大于颗粒本身重矩时, 颗粒即开始起动。水流的牵引力和颗粒在水中的重力可分别表示为 $f_d = \tau_0 A_p$ 和 $f_w = (\rho_s - \rho)gV_p$ 。式中 τ_0 为水流产生的底层应力; A_p 为颗粒在水流方向的投影面积; ρ_s 和 ρ 为颗粒和流体的密度; g 为重力加速度, V_p 为颗粒体积。当水流牵引力和颗粒重力矩相等时, 则有:

$$\tau_0 A_p \times BP = (\rho_s - \rho)gV_p \times AP \quad (1)$$

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 2047 号。图件由袁巍、严理绘制, 特此志谢。
接受日期: 1989 年 6 月 24 日。

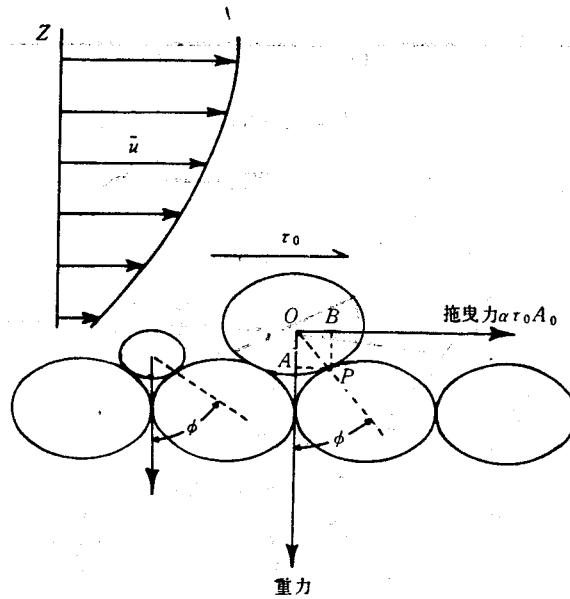


图 1 椭球状颗粒在 \bar{u} 和 τ_0 作用下转动角起动的临界状态

Fig. 1 Threshold critical condition of ellipsoids gravel pivoting angles under effect of current velocity \bar{u} and bottom tangential stress τ_0 . \bar{u} 为水流速度。

或者

$$\tau_t = (\rho_s - \rho)g \frac{V_p}{A_p} \times \frac{AP}{BP} \quad (2)$$

式中, τ_t 为临界状态下的水流应力, BP 和 AP 分别为牵引力和颗粒重力力臂。由图 1 可以得出, $BP/AP = \tan\Phi$, 这里 Φ 定义为顶层颗粒的转动角。大部分自然砾石的形状近似于三轴椭球体^[4], 因而 A_p 和 V_p 可分别表示为 $\frac{\pi D_s D_c}{4}$ 和 $\frac{\pi D_s D_b D_c}{6}$ 。 D_s, D_b, D_c 分别代表椭球状砾石的长、中、短轴直径。若把上述关系代入公式(2)可以得出:

$$\tau_t = k(\rho_s - \rho)g D_b \tan\Phi \quad (3)$$

公式(3)也可写成:

$$\theta_t = \frac{\tau_t}{(\rho_s - \rho)g D_b} = k \tan\Phi \quad (4)$$

式中, θ_t 为谢尔兹临界参数; k 为比例系数。文献[4]曾证明中轴直径 D_b 最接近于颗粒的等值粒径, 因而公式(3)和(4)中 τ_t 和 θ_t 对 D_b 的依从关系是合乎逻辑的。

标准谢尔兹曲线(图 2)是利用均匀粒径颗粒进行水槽实验而获得的。在均匀粒径条件下, 颗粒转动角往往被认为是 33° , 约等于沉积物的静止角。然而, 文献[8]利用砾石及文献[10]利用砂粒进行的转动角实验中发现, 在均匀粒径条件下的 Φ 并不是常数, 而是取决于颗粒的形状和粒径, 并得出了下述经验关系式:

$$\Phi = e(D_b/K_b)^{-f} \quad (5)$$

式中, K_b 为底层颗粒的平均粒径; e 和 f 为经验系数。公式(5)表明, 沉积颗粒的转动角

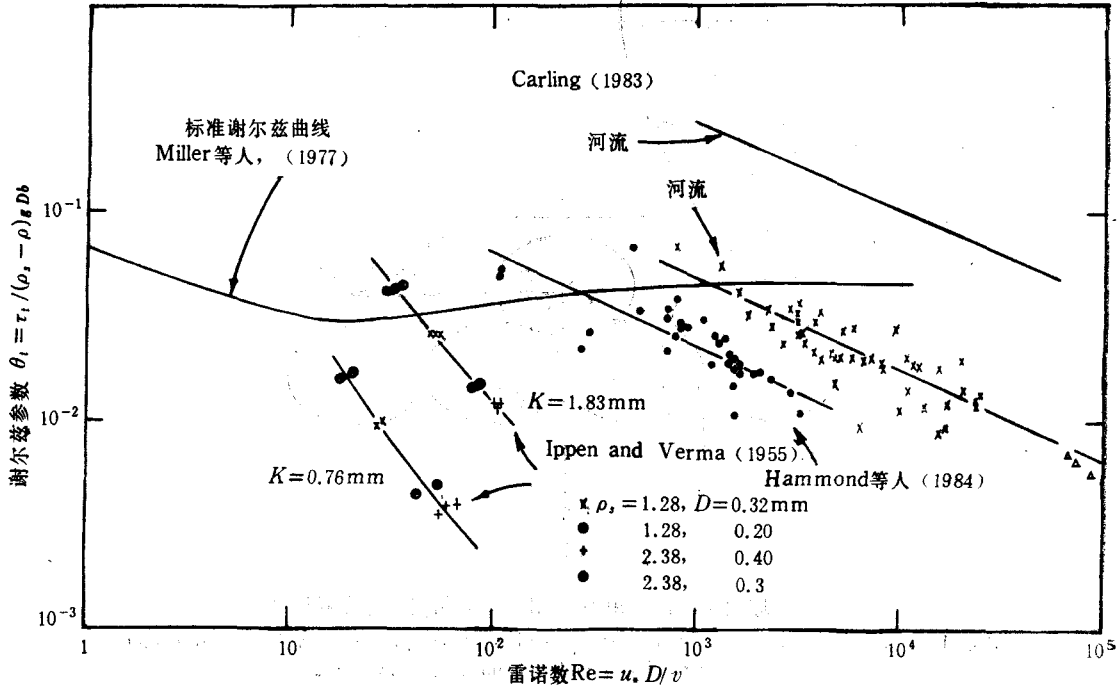


图 2 标准谢尔兹曲线及其同各测量结果的差异

Fig. 2 Difference of typical Shields' curve and experiment results

反比于 D_b/K_b 比值,因而 Φ 随 D_b 即 D_b/K_b 比值的增加而减小。文献[8]在利用砾石沉积进行的实验中发现 f 系数,也即 Φ 同 D_b/K_b 经验曲线的坡度自球体、椭球状砾石,棱角状

表 1 实验获得的 e 和 f 系数及相应的实验条件

Tab. 1 e and f coefficients from the experiment and relative experiment conditions

实验条件描述	e 系数	f 系数	来源
均匀砂粒球体	49.0	0.3	文献[10]
自然海滩砂	62.0	0.3	同上
粉碎石英岩砂	71.0	0.3	同上
均匀粒径球状砾石			
颗粒顶转动 $D/K \leq 1$	36.3	0.55	本文
颗粒顶转动 $D/K > 1$	36.3	0.72	本文
颗粒间转动	20.4	0.75	本文
自然椭球状砾石			
颗粒顶转动 $D_b/K_b \leq 1$	39.4	0.32	本文
颗粒顶转动 $D_b/K_b > 1$	39.4	0.53	本文
颗粒间转动	31.9	0.36	本文
棱角状砾石	51.3	0.33	本文
扁平状砾石	37.8	0.33	本文
迭瓦状砾石	63.6	0.32	本文

砾石到迭瓦状构造而依次减小,表明随着扁度、棱角度和组构对 Φ 影响的增强, Φ 随相对粒径比 D_b/K_b 变化的趋势减弱。在 $D_b/K_b = 1(\Phi = e)$ 的条件下,其结果证明 e 系数自球体、椭球状砾石,棱角状砾石及迭瓦状构造而逐渐增加,表明在均匀粒径条件下转动角 Φ 将随扁度、棱角度的增加及迭瓦构造的形成而增加。文献[8]和[10]实验获得的 e 和 f 系数及其实验条件列于表1。

根据公式(4),(5)及表1,在均匀粒径($D/K = 1$)的条件下,谢尔兹曲线不应只有一条,而是应该有一系列具有不同 θ_c 相互平行的谢尔兹曲线,从而反映出颗粒形状、棱角度及组构对谢尔兹系数 θ_c 的影响。文献[7]利用公式(4),(5)和表1,将不同形状、棱角度及组构下的 θ_c 值同球体颗粒间转动的 θ_c 值相比而进行归一,得出了一组谢尔兹曲线(图3)。

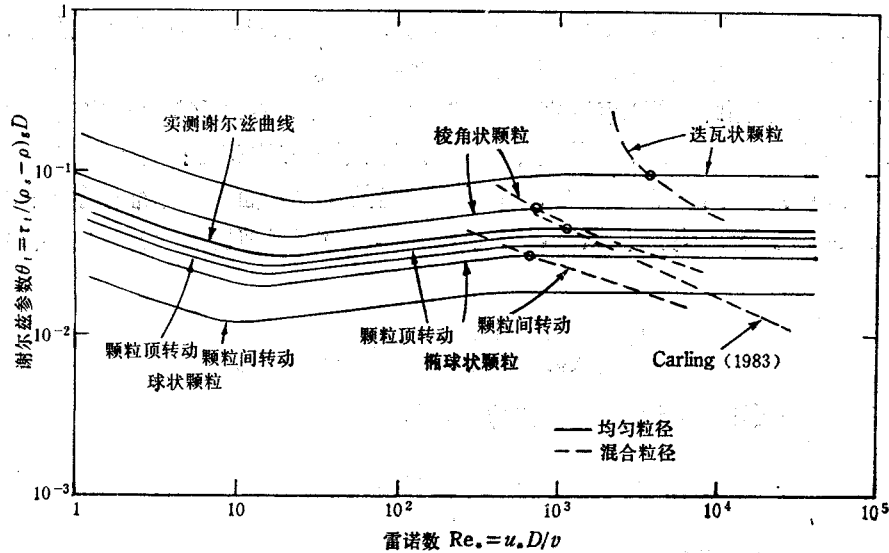


图3 颗粒粒径、形状及迭瓦构造对沉积物临界谢尔兹参数的影响^[7]

Fig. 3 Effect of grain size, shape and imbrication structure on sediment critical Shields' coefficients^[7]

由图3可知,在均匀粒径条件下形状、棱角度及组构不同的颗粒具有不同的谢尔兹曲线,球体、椭球状砾石,棱角状砾石及迭瓦状砾石的谢尔兹曲线,在垂向上由下向上依次平行排列。因此在同一粒径条件下,沉积物颗粒可按形状、棱角度及构造发生选择性起动。

二、由沉积物转动角计算谢尔兹临界参数的方法

若将公式(5)代入公式(4),则可得出:

$$\theta_c = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho)gD} = k \tan[e(D_b/K_b)^{-f}] \quad (6)$$

公式(6)可用来直接由 D_b/K_b 计算临界谢尔兹参数 θ_c 。在运用公式(6)之前,必须求得公式中几个参数,即比例系数 k 、参数 e 和 f 以及底层砾石沉积物的平均中轴粒径 K_b 。

表 1 表明, 参数 f 将取决于颗粒的形状和棱角度。对于棱角状砾石, f 约等于 0.33; 而对于磨圆较好的椭球状砾石, f 等于 0.53 ($D_b/K_b \geq 1$) 和 0.32 ($D_b/K_b < 1$)。参数 e 则主要取决于颗粒的大小和形状, 例如表 1 给出自然砂的 e 参数为 62.0, 球状砾石的 e 参数为 36.3; 而对椭球状砾石来说, e 约等于 39.4。因而知道了沉积物粒径、形状和磨圆度, 便可由表 1 得知相应的 e 和 f 参数。

如果将测量到的谢尔兹临界参数 θ_c 和雷诺数 Re 绘于标准谢尔兹曲线中, 选择性起动条件下的 θ_c/Re 关系将同均匀粒径条件下的标准谢尔兹 θ_c/Re 曲线相交叉。在这一交叉点上可以认为 $D_b/K_b = 1$, 而 K_b 则一般假定为底层沉积物的平均中轴直径, 这一假定已由 Day(1980) 的动力水槽的实验所证实^[9]。所以 K_b 可以由沉积物的粒度资料获得。在 K_b 已知条件下, 表 1 可用来查得相应的 e 值。当 $D_b/K_b = 1$ 时, 砾石沉积物的 θ_c 值约等于一个常数值 $\theta_c = 0.045$, 因而将 $D_b/K_b = 1$, e 值以及 $\theta_c = 0.045$ 代入公式(6)即可得到比例系数 k , 从而公式(6)可用来计算混合粒径条件下 ($D_b/K_b \neq 1$) 沉积物选择性起动的谢尔兹参数 θ_c 以及相应的水流应力。

由于本文是利用野外测量到的选择性起动数据来验证公式(6)所给出的混合粒径沉积物选择性起动转动角模式, 因而 K_b 和 k 也可以由下述方法获得: 首先把选择性起动条件下测量到的 θ_c 值绘于谢尔兹图中, 由测量得出的谢尔兹曲线同标准谢尔兹曲线相交, 而在此交点处 D_b 等于 K_b 。根据 $u_{*c} = \sqrt{\tau_c/\rho}$ (u_{*c} 为临界剪切流速), 公式(6)可改写成:

$$\theta_c = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho)gD_b} = \frac{\rho u_{*c}^2}{(\rho_s - \rho)gD_b} \quad (7)$$

由于 $Re = \frac{u_{*c}D}{\nu}$ (这里 ν 为运动度粘度), 因而,

$$\theta_c = \frac{\rho(Re\nu)^2}{(\rho_s - \rho)gD_b^3} \quad (8)$$

对公式(8)中的 D_b 求解:

$$D_b = K_b = \left[\frac{\rho(Re\nu)^2}{(\rho_s - \rho)g\theta_c} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

所以, 如果两谢尔兹曲线交点处坐标 Re 和 θ_c 已知的话, 公式(9)即可用来计算 K_b 。文献[10]在对均匀粒径 ($D_b/K_b = 1$) 条件下转动角 Φ 同中轴直径 D_b 间相互关系所进行的研究中得出, 椭球状砾石的转动角同 D_b 的关系:

$$\Phi = e = 44.17 \times (D_b)^{-0.09} \quad (10)$$

在 $D_b/K_b = 1$ 的交叉点处, 公式(6)可变为:

$$\theta_c = k \tan(e) \quad (11)$$

由于 e 参数可由 D_b (这里 $D_b = K_b$) 及公式(10)得出, 而 θ_c 即为谢尔兹图中交叉点处的 θ_c , 因而 k 则可由下式求得:

$$k = \frac{\theta_c}{\tan(e)} \quad (12)$$

通过上述方法, 公式(6)中的四个参数 k , e , f 和 K_b 均已求得, 由公式(6)描述的沉积物转动角选择性起动模式即可用来计算不同粒径 D_b 下沉积物选择性起动的临界谢尔

兹参数 θ_c 。而由公式(6)计算得出的数值又可同实际测量到的 θ_c 值相比较, 从而对这一模式做进一步的验证。

三、沉积物选择性起动转动角模式的应用

在计算 θ_c 和 Re 值时, Hammond 等人(1984)所用的颗粒粒径为等值粒径 $D = (D_L D_s)^{1/2}$, 式中的 D_L 和 D_s 分别为沉积物颗粒的长轴和中轴直径。对沉积物转动角进行的实验表明, D_L 的影响可以忽略不计^[9], 因而我们只用 Hammond 等人的 D_s 数据对 θ_c 和 Re 重新进行了计算, 所得出的 θ_c/Re 经验曲线见图 4。指数回归分析给出:

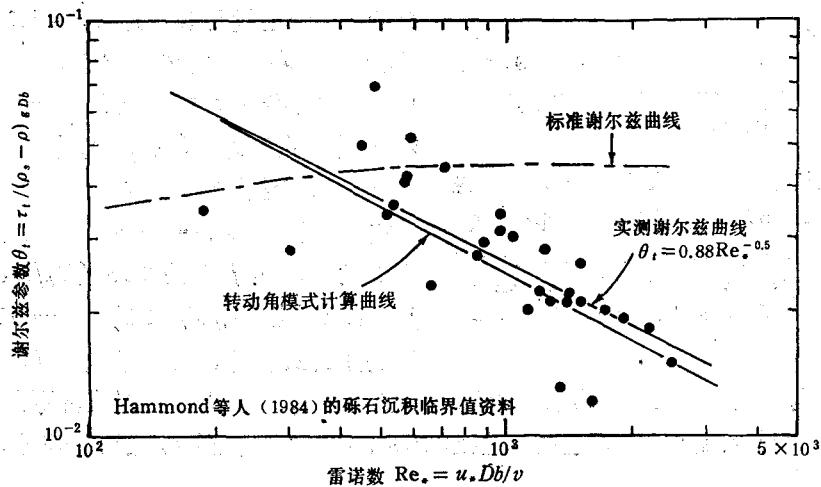


图 4 Hammond 等人测量获得的潮流中砾石沉积选择性起动谢尔兹曲线同标准曲线的偏差

Fig. 4 Deviation of gravel selective entrainment Shields' curve in tidal current from Hammond' measurements and typical Shields' curve

$$\theta_c = 0.88(Re)^{-0.51} \quad (13)$$

该经验曲线同 Miller 等人的标准谢尔兹曲线在 $\theta_c = 0.043$ 和 $Re = 380$ 处相交, 利用上述 θ_c 和 Re 以及 $\nu = 0.014 \text{ cm}^2/\text{s}$, $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ 和 $\rho_s = 2.75 \text{ g/cm}^3$, 公式(9)得出 $K_b = 0.75 \text{ cm}$ 。由于 Hammond 等人曾将这些砾石描述为椭球状, 而在潮流作用下具有较好磨圆度, 根据表 1 及公式(10), 可以得出其 e 值约为 45.3° , f 值为 0.53 (当 $D_b/K_b \geq 1$) 和 0.32 (当 $D_b/K_b < 1$)。若把上述 $e = 45.3^\circ$ 和 $\theta_c = 0.043$ 代入公式(12), 则可得出 $k = 0.043$ 。利用上述得出的各参数及公式(6)所表示的沉积物转动角选择性起动模式可定量地计算谢尔兹参数 θ_c 。计算结果与实际测量结果的比较绘于图 5。显而易见, 实际测量结果同模式预测结果吻合较好。在谢尔兹参数较小时, 二者吻合较好, 随 θ_c 的增加, 吻合性变差。公式(6)给出的计算曲线与实际测得的谢尔兹曲线也相互吻合(图 4)。

图 5 中计算数值同测量数值的偏差, 很可能是由平均粒径 K_b 的采用所导致。对于每一测量得到的 θ_c 值而言, K_b 应是位于起动颗粒之前并与之相接触的砾石的中轴直径。而在利用公式(6)进行的计算中, K_b 则是整个底层沉积层的平均中轴直径, 这一平均中轴直径同各个具体的平均中轴直径是不完全相等的。因而, 尽管公式(6)的计算结果同实

际测量的结果大体趋一致,但它们之间的偏差还是存在的。

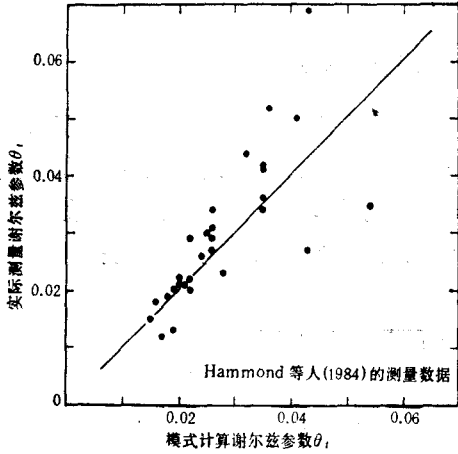


图5 转动角选择性起动模式计算得出的谢尔兹参数同 Hammond 等人实际测量数值的比较
 Fig.5 Comparison between Shields' parameter from predicted by pivoting selective entrainment analysis and Hommond' measurements

在分析中,我们采用了文献[2],[3]在测量中所获得的原始平均中轴粒径 D_s 和切应力 τ_s ; 而在计算雷诺数 Re 时,我们则选择了 $\nu = 0.013\text{cm}^2/\text{s}$ 作为运动粘度的平均值。测量得出的 Re 和 θ_s 值均以谢尔兹图的形式绘于图 6 中。指数回归分析给出的结果同测量到的结果与测量到的 θ_s-Re 曲线并不十分吻合,因而图中较为吻合的曲线由目测绘出,该曲线可表示为 $\theta_s = 3.28(Re)^{-0.57}$ (图 6)。在描述河流中沉积物时,Carling 指出,砾石沉积物的形状以扁圆状为主(占 57.6%),次为球状(占 22.8%)^[2]。因而利用本文第二节给出的相同方法,我们得出底层平均中轴直径 $K_b = 20\text{cm}$ 。由公式(10)及表 1 则可得出 f 应为 0.53 ($D_b/K_b \geq 1$) 和 $f = 0.32$ (当 $D_b/K_b < 1$), $e = 41.5^\circ$ 。最后利用公式(12),可得出 $k = 0.051$ 。利用

上述 e, f, K_b 和 k 值及公式(6)描述的沉积物选择性起动模式,可对临界谢尔兹参数 θ_s 进行计算。同样当这些计算得出的 θ_s 值绘于图 7 中同测量到的 θ_s 值相比较时,二者十分

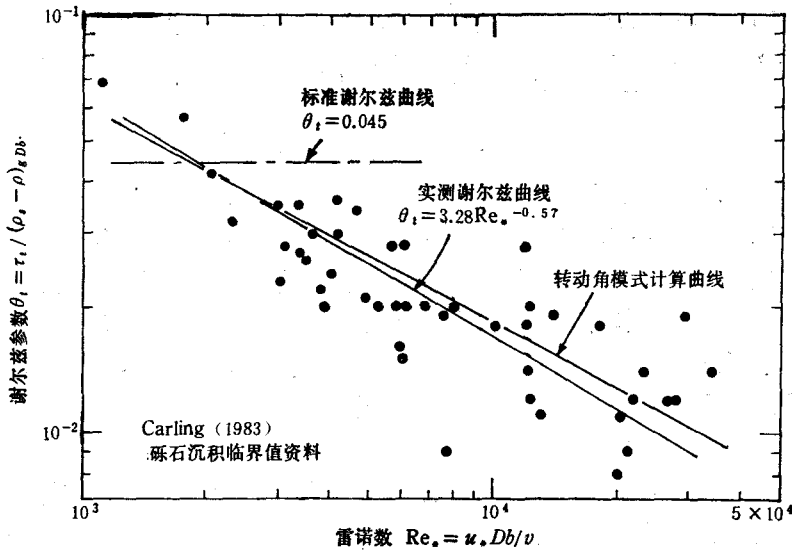


图 6 Carling 测量得到的河流中砾石沉积物选择性起动谢尔兹曲线同标准谢尔兹曲线的偏差

Fig. 6 Deviation of gravel selective entrainment Shields' curve in river from Carling' measurements and typical Shields' curve

吻合(图7)。若将计算结果绘于图6给出的谢尔兹图中时,由公式(6)给出的计算曲线与实际测量到的曲线也十分一致(图6)。

根据以上对 Hammond 等人 and Carling 对砾石沉积物选择性起动临界资料的分析,可以看出沉积物转动角随粒径的变化可很好地解释他们所发现的 θ_c 值同标准谢尔兹曲线的偏差,从而为混合粒径条件下沉积物的选择性起动建立了一个基本的模式。

四、结 语

1. 在均匀粒径和混合粒径条件下,沉积物起动的机理不相同。混合粒径条件下,沉积物的起动可由转动角 Φ 随相对粒径 D_s/K_s 的变化模式所控制。沉积物选择性起动的转动角模式可由公式(6)给出。

2. 如果沉积物的粒度和形状资料已知的话,公式(10)和表1可用来求得 K_s , e 和 f 系数。若假定均匀粒径 ($D_s/K_s = 1$) 砾石具有常数 $\theta_c = 0.045$,则由公式(6)可得出系数 k ,从而公式(6)所表示的转动角模式可用来计算混合粒径条件下,砾石沉积选择性起动的临界谢尔兹参数 θ_{c0} 。

3. 利用 Hammond 等人 and Carling 在潮流和河流中获得的砾石沉积物选择性起动临界值资料,对公式(6)描述的模式进行了验证,公式(6)的计算结果同测量结果相吻合,从而为混合粒径条件下砾石沉积物的选择性起动建立了一个基本的模式。

4. 公式(6)给出的转动角模式同实际测量结果仍有一定偏差,笔者认为这一偏差可能是由对水流上举力的忽略所导致。

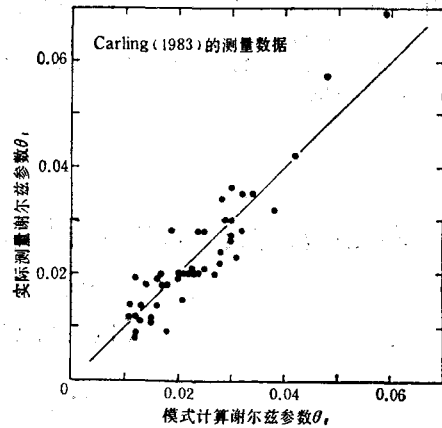


图7 选择性起动模式计算得出的谢尔兹参数临界值同 Carling 实际测量数值的比较
Fig. 7 Comparison between Shields' critical parameter predicted by selective entrainment and Carling's measurements

参 考 文 献

- [1] Bagnold, R. A., 1941, *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, Methuen, London, 265pp.
- [2] Carling, P. A., 1983, Threshold of coarse sediment transport in broad and narrow natural streams, *Earth Surf. Proc. and Landf.*, 8: 1—18.
- [3] Carling, P. A. and Reader, N. A., 1982, Structure, composition and bulk properties of upland stream gravels, *Earth Surf. Proc. and Landf.*, 7: 349—365.
- [4] Cui, B. and Komar, P. D., 1984, Size measures and the ellipsoidal form of clastic sediment particles, *J. Sedim. Petrol.*, 54: 783—797.
- [5] Day, T. J., 1980, A study of initial motion characteristics of particles in graded bed material, *Geol. Surv. Can. Curr. Res.*, 801A: 281—286.
- [6] Komar, P. D. and Wang, C., 1984, Processes of selective grain transport and the formation of placers on beaches, *J. Geol.*, 92: 637—655.
- [7] Komar, P. D. and Li, Z., 1986, Pivoting analyses of the selective entrainment of sediments by shape and size with application to gravel threshold, *Sedimentol.*, 33: 425—436.
- [8] Li, Z. and Komar, P. D., 1986, Laboratory measurements of pivoting angles for applications to selective entrainment of gravel in a current, *Sedimentol.*, 33: 413—423.

- [9] Li, Z., 1985, Pivoting Angles of Gravel and Their Application in Sediment Threshold Studies, M. S. Thesis, Oregon State University, 90pp.
- [10] Miller, R. L. and Byrne, R. J., 1966, The angle of repose for a single grain on a fixed rough bed, *Sedimentol.*, 6: 303—314.
- [11] Slingerland, R. L., 1984, Role of hydraulic sorting in the origin of fluvial placers, *J. Sedim. Petrol.*, 54: 137—150.

MECHANISM OF SEDIMENT SELECTIVE ENTRAINMENT AND APPLICATION TO GRAVEL THRESHOLD ANALYSIS

Li Zhenlin, Qin Yunshan

(*Institute of Oceanography, Academia Sinica, Qingdao, 266071*)

Paul D. Komar

(*College of Oceanology, Oregon State University, U. S. A.*)

ABSTRACT

Entrainment mechanism of sediment with mixed grain sizes is different from that of uniform grain size. The variations of the pivoting angles with grain size and shape can be employed to explain this sediment entrainment under mixed grain sizes. General selective entrainment processes according to particle size and shape are analysed. Based on these analyses, a mathematical model is obtained which can be expressed as:

$$\theta_s = k \tan [e(D_s/K_b)^f]$$

where θ_s is Shields entrainment function, D_s is the diameter of the top particle under entrainment, K_b is the mean grain size of the bottom grains and k , e and f are coefficients determined by flow and sediment characteristics. When this model is applied to predict gravel selective entrainment in river flows and tidal currents, the calculated values show good agreement with the measured values.

Key words Sediment, Selective entrainment, Entrainment mechanism