

307-316

TV 142.1

## 细颗粒泥沙成团起动及其流速的研究

韩其为 何明民

(中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

**提要** 文中首先指出当水深很大时,考虑薄膜水附加下压力的起动流速公式计算的单颗细泥沙(粘土、粉土)的起动流速很大,甚至于远超过 3m/s,这与实际资料有相当出入。此外,实际现象还表明这些粘土及细颗粒起动时常常不是单颗的,而是成团进行。由此出发,再考虑粘着力及薄膜水附压力下分析了土块成团起动的临界条件,得到了成团起动的起动流速,同时对比了成团(包括成片)起动流速与单颗的起动流速,得出了临界水深  $H_K$ ,当  $H=H_K$  时,成团起动流速等于单颗的;当  $H < H_K$  时成团起动流速大于单颗的;当  $H > H_K$  时成团起动流速小于单颗的。在后一种条件下,将以成团起动为主。最后通过一些数据显示,对于粘土、粉沙,  $H_K$  随团块的当量粒径  $D_e$  减小、干容重减小、土块扁度加大、单颗泥沙直径减小而减小。同时在一定条件下  $H_K$  可以很小,已至为零;这表明成块起动可能发生在任何水深(包括水槽试验中)。

**关键词** 成团起动 细颗粒 临界水深 片状土块

细颗粒泥沙, 流速

单颗细沙起动研究中,除水深通过流速分布影响起动流速外,是否还存在其它与水深有关的影响存在争议。一种认为不存在其它影响<sup>[1]</sup>;另一种认为由于薄膜水单向压力传递,水深对薄膜水附加下压力有影响而牵连到起动流速<sup>[2-4]</sup>;第三种认为除流速分布影响外,尚有细颗粒处于粘性子层而阻力处于非平方区的考虑<sup>[5-6]</sup>。第三种看法没有得到阻力试验资料的支持,而且有的研究者给出的起动流速随水深变化极小<sup>[3]</sup>,目前很少有人接受。对于第一、二两种分歧的存在并不值得奇怪,这是因为细颗起动现象较为复杂,薄膜水附加下压力等机理深入揭示不够,因而未被普遍承认。另一方面考虑附加下压力后文献给出的起动流速受水深的影晌太大,特别是大水深尤其如此,例如当  $d=0.005\text{mm}$ ,  $H=30\text{m}$ , 分别得出  $V_K=6.78\text{m/s}$ 、 $3.54\text{m/s}$  及  $3.70\text{m/s}$ <sup>[2-4]</sup>,显然其值过大,不符合室内水槽及野外河道的粘土起动流速一般不超过 3m/s 的范围<sup>[1]</sup>。那末是否单颗起动流速公式中考虑水深影响的方次过高,根据作者最近分析长江宜昌站低输沙资料(相当于起动标准),水深对起动流速影响很大,当  $h=1-20\text{m}$  时,  $V_K=f(d)h^n$  中的指数  $n=0.352-0.64$ <sup>[7]</sup>。这显然不能解释为流速分布的影响,也不是文献[1]所能概括的。

其次粘土试验表明,起动时往往不是单颗的,大都是多颗成团进行,特别是干容重较小时尤其如此。这自然说明多颗成团起动流速小于单颗的。那末多颗泥沙成团起动时,起动流速如何确定?它与单颗起动流速关系如何?而且,既然细颗粒往往是多颗成团起动,说明即令水深影响大的单颗起动流速公式正确,但是用其确定多颗成团起动流速就不合适了,反之,这有可能证明单颗起动流速公式未必对大水深不正确,只是此时不该使用它。所有这些表明了研究多

\* 国家自然科学基金委员会和中国长江三峡工程开发总公司联合资助的国家自然科学基金重大项目。

收稿日期:1996-06-14;收到修改稿日期:1996-12-26。

① 张植堂,河流泥沙运动基本规律研究,长江科学院"河流泥沙研究的发展",长江科学院,23-47页。

② 韩其为,何明民,水深及干容重对起动流速的影响,中国水利水电科学研究院,1995年11月。

团泥沙成团起动流速及其单颗起动流速关系重要性,本文正是从此出发而开展的研究。

为便于与单个细颗粒起动流速等对比,现将以前研究成果概述如下<sup>[2]</sup>。单颗泥沙的瞬时起动底速为

$$V_{s,k} = \varphi(\Delta') \omega_1(H, d, \gamma_s) \quad (1)$$

此处  $\Delta'$  为泥沙在床面的相对位置,  $H$  为水深,  $d$  为单颗泥沙粒径,  $\gamma_s$  为泥沙比重。此外

$$\varphi(\Delta) = (2\Delta' - \Delta'^2)^{1/2} \times \left\{ \left( \frac{4}{3} - \Delta' \right) + \frac{1}{4} \left[ \frac{1}{3} + (2\Delta' - \Delta'^2)^{1/2} \right] \right\}^{-2} \quad (2)$$

$$\text{而 } \omega_1 = \left[ 3.33 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d + \frac{0.0465 \delta_1}{d} \left( 3 - \frac{t}{\delta_1} \right) \left( \frac{\delta_1^2}{t^2} - 1 \right) - 1.55 \cdot 10^{-7} \frac{H}{d} \left( 1 - \frac{t}{\delta_1} \right) \left( 3 - \frac{t}{\delta_1} \right) \right]^{1/2} \quad (3)$$

称为起动流速的特征速度,  $\gamma$  为水的比重,  $g$  为重力加速度,  $\delta_1 = 4 \times 10^{-7} \text{m}$  为薄膜水厚度, 而  $\frac{t}{\delta_1}$  为颗粒间的相对缝隙, 它决定于淤积物干容重, 即

$$\gamma_s' = \left[ 0.698 - 0.175 \left( \frac{t}{\delta_1} \right)^{1/2} \left( 1 - \frac{t}{\delta_1} \right) \right] \left( \frac{d}{d + 2t} \right)^3 \gamma_s \quad (4)$$

过渡到以垂线平均速度表示的起动流速, 采用了推移质低输沙率理论关系及起动的数量标准, 得到<sup>[4,7]</sup>

$$V_s = \psi u_{s,k} = \frac{\psi}{3.73} \bar{V}_{s,k} = \frac{0.433}{3.73} \psi \omega_1 = 0.116 \psi \omega_1 \quad (5)$$

$$\text{其中 } \psi = \frac{V}{u_{s,k}} = 6.5 \left( \frac{H}{d} \right)^{\frac{1}{4} + \frac{1}{4} \frac{H}{d}} \quad (6)$$

此处  $V$  为(垂线)平均流速,  $u_{s,k}$  动力流速,  $u_{s,k}$  相应于起动时的动力流速。

## 1 细颗粒成团起动的瞬时起动流速

实际现象表明, 具有一定粘性的细颗粒泥沙起动时, 往往不是以单颗、而是以多颗成片(团)进行。开始是小片剥蚀, 使具有一定固结的粘土(淤泥)床面形成坑、槽、逐渐形成蜂窝状, 此时局部紊动加强, 旋涡大量产生, 对低凹处继续淘刷, 最后使凸出的粘土(淤泥)成较大的块状崩离, 经过一定时间滚动, 其中较硬者常被磨光成土“卵石”。河床中常见到的这种土卵石不仅有的是硬质粘土, 而且还有未固结干硬的淤泥。但是从平整床面的冲刷过程看, 诱发这种冲刷“雪崩”的是最早的成片剥蚀, 因此将粘土(淤泥)的起动, 定义为平整床面最早的成片剥蚀。下面从力学方面对此进行分析。

设在平整的粘土床面上, 考虑其中的一土块, 共有  $n$  个泥沙颗粒组成, 它的长和宽为  $a$ , 厚为  $c$ , 即其扁度

$$\lambda = a/c \quad (7)$$

$$\text{其重量为 } \frac{\pi}{6} \gamma_s \cdot D_0^3 = \gamma_s' \cdot c \cdot a^2 = n \gamma_s \frac{\pi}{6} d^3 \quad (8)$$

其中,  $D_0$  为土块的当量直径(重量相等的当量直径),  $\gamma_s$  为颗粒比重,  $\gamma_s'$  为表层土的干容重。由(8)式第一等号得

$$D_0 = \left( \frac{6}{\pi} \right)^{1/3} \left( \frac{\gamma_s'}{\gamma_s} \right)^{1/3} (ca^2)^{1/3} = \left( \frac{6}{\pi} \right)^{1/3} \left( \frac{\gamma_s'}{\gamma_s} \right)^{1/3} \lambda^{1/3} a = \left( \frac{6}{\pi} \right)^{1/3} \left( \frac{\gamma_s'}{\gamma_s} \right)^{1/3} \lambda^{1/3} c \quad (9)$$

同时由(8)式左、右两端还可给出

$$D_0/d = n \quad (10)$$

此六面体在上、下底面积的颗数  $n_1$  由  $a^2 = n_1(d - 2t)^2$  确定,即

$$n_1 = a^2 / (d - 2t)^2 \quad (11)$$

此处  $t$  为颗粒间缝隙的一半(图 1),与此相仿六面体四个侧面积上的颗粒  $n_2$  由  $ac = n_2(d + 2t)^2$  确定,即

$$n_2 = \frac{(ac)^2}{a^2 - 2t^2} = \frac{a}{d + 2t} \lambda^2 \quad (12)$$

此时土块的受力状态如图 2 所示,不失一般性,图中示出了  $c = (d - 2t)$ ,  $a = 4(d + 2t)$  的土块,其上的作用力有水流的升力  $F_L$ 、床面上的切应力  $\tau_B$ 、土块的重力  $G$ 、底面的粘着力  $F_{\mu 1}$  及附加下压力  $\Delta G$ 、四周的侧向粘着力  $F_{\mu 1}$  及  $F_{\mu 2}$  将通过摩擦系数  $f$  转换成铅垂向下的力,除右侧  $F_{\mu 2}$  外,这些力对于 0 点均有力矩,至于在单颗泥沙起动中较为重要的水流正面推力,此时因床面平整,数量可以忽略,至于其对 0 点之矩更不存在,欲求出土块起动翻转的条件可列出上述各力对 0 点之矩的平衡方程,

$$F_L \frac{a}{2} + \tau_B \frac{c}{2} = F_{\mu 1} \cdot \frac{a}{2} + F_{\mu 2} f a - F_{\mu 3} \cdot f \frac{a}{2} + \Delta G \frac{a}{2} - G \frac{a}{2} \quad (13)$$

此处  $F_{\mu 1}$  作用于土块底部,粘着力合力作用点位于土块重心,故对 0 点之力臂为  $a/2$ ;  $F_{\mu 2}$  作用于土块左侧粘着力合力,它通过摩擦系数  $f$  将其转换成重力方向的力,其作用点在左侧面重心,力臂为  $a$ ;  $F_{\mu 3}$  为作用在土块两侧的粘着力合力,它也要通过摩擦系数将其转换成与重力方向一致的力,力臂则为  $a/2$ . 各力的表达式如下

$$F_L = \frac{C_L \rho V_h^2 a^2}{2} \quad (14)$$

$$\tau_B = \tau_0 a^2 = \rho u_*^2 a^2 \quad (15)$$

$$F_{\mu 1} = n_1 P_{\mu d} = \left( \frac{a}{d + 2t} \right)^2 P_{\mu d} \quad (16)$$

$$F_{\mu 2} = n_2 P_{\mu d} = \frac{1}{\lambda} \left( \frac{a}{d + 2t} \right)^2 P_{\mu d} \quad (17)$$

$$F_{\mu 3} = 2n_2 P_{\mu d} = \frac{2}{\lambda} \left( \frac{a}{d + 2t} \right)^2 P_{\mu d} \quad (18)$$

$$\Delta G = n_1 \Delta G_d = \left( \frac{a}{d + 2t} \right)^2 \Delta G_d \quad (19)$$

$$G = \frac{\pi}{6} (\gamma_s - \gamma) D_0^3 \quad (20)$$

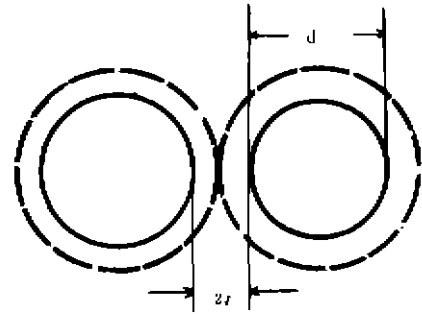


图 1 泥沙颗粒及薄膜水示意图  
Fig. 1 Sketch of particle and film water

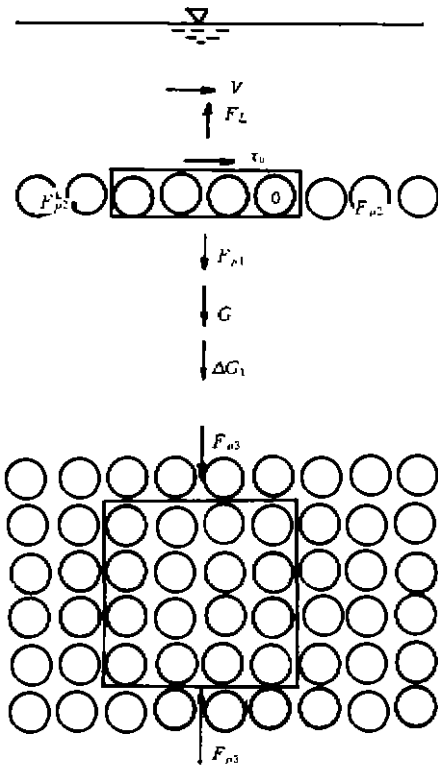


图 2 细颗粒成层起动受力图  
Fig. 2 Force acted at the layered soil while incipient motion

上述各式中  $C_L$  为升力系数, 取为 0.1,  $\rho$  为水的密度,  $\tau_0$  为水流底部切应力,  $u_*$  为动力流速,

$$P_{n,s} = \frac{\pi}{2} q_n \frac{\delta_0^2}{\delta_1^2} d \left[ \frac{\delta_1^2}{t^2} - 1 \right] \quad (21)$$

为两颗泥沙正接触(一颗起动泥沙与一颗床面泥沙的正接触)时的粘着力<sup>[2]</sup>

$$\Delta G_t = \frac{\pi}{2} k_2 \gamma H d \delta_1 \left( 1 - \frac{t}{\delta_1} \right) \quad (22)$$

为两单颗泥沙间正接触时的附加下压力<sup>[2]</sup>, 此处  $\delta_0$  为水分子直径取为  $\delta_0 = 3 \times 10^{-10}$  m,  $q_n = 1.3 \times 10^9$  kg/m<sup>2</sup>,  $k_2 = 2.285 \times 10^{-6}$ 。将上述各式代入(11)式, 遂有

$$\begin{aligned} \frac{C_L \rho}{4} V_{k,s}^2 a^3 - \frac{\rho}{2} u_{*,s}^2 a^2 c = \frac{\pi}{6} (\gamma_s - \gamma) D_n^3 \frac{a}{2} + \frac{a}{2} \left( \frac{a}{d+2t} \right)^2 \left[ \frac{\pi}{2} k_n \gamma H d \delta_1 \left( 1 - \frac{t}{\delta_1} \right) \right] \\ - \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{a}{d+2t} \right)^2 a + \frac{f}{\lambda} \left( \frac{a}{d-2t} \right)^2 a + \frac{f}{\lambda} \left( \frac{a}{d+2t} \right)^2 a \right] \cdot \left[ \frac{\pi}{2} q_n \frac{\delta_0^2}{\delta_1^2} d \left( \frac{\delta_1^2}{t^2} - 1 \right) \right] \quad (23) \end{aligned}$$

由于在等式(23)中,  $V_{k,s}, u_{*,s}$  为起动临界值, 故式中  $V_{k,s}$  为瞬间底速计的起动速度, 即瞬时起动底速。为了方便, 将动力流速  $u_{*,s}$  换算成瞬时起动底速。按照作者研究<sup>[1]</sup>, 单颗泥沙刚好处于起动临界状态时, 其瞬时起动流速按(1)式对床面位置平均有

$$V_{k,s} = \bar{\varphi} \omega_1 = 0.916 \omega_1 \quad (24)$$

另一方面, 按照水槽试验起动标准<sup>[2]</sup>

$$\bar{V}_{k,s} = 0.433 \omega_1 \quad (25)$$

$$\text{则} \quad V_{k,s} = 2.12 \bar{V}_{k,s} = 2.12(3.73 u_{*,s}) = 7.91 u_{*,s} \quad (26)$$

这是指单颗瞬时起动流速与  $u_{*,s}$  的关系, 取其比值  $V_{k,s}/u_{*,s} = 7.91$  对多颗也是适用的, 从而利用此式及(7)式使(23)式左端变为

$$\frac{C_L \rho}{4} V_{k,s}^2 a^3 - \frac{\rho}{2} u_{*,s}^2 a^2 c = \frac{C_L \rho}{4} V_{k,s}^2 a^3 [1 + 0.3197 \lambda^3] \quad (27)$$

再将其代入(23)式, 并利用(9)式化简后将  $C_L = 0.1, q_n, k_2$  以及  $\delta_0, \delta_1$  代入, 则上式为

$$\begin{aligned} V_{k,s}(D_n) = \left\{ \frac{1}{1 - 0.3197 \lambda^3} \cdot \left[ 196.2 \left( \frac{\pi}{6} \right)^2 \left( \frac{\gamma_s'}{\gamma_s} \right)^2 \gamma_s \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) D_n^3 + \right. \right. \\ \left. \left. \frac{0.676 \times 10^7 (1 + 4f\lambda^3) \left( \frac{\delta_1^2}{t^2} - 1 \right) - 2.817 \times 10^7 \left( 1 - \frac{t}{\delta_1} \right) \frac{H}{d} \right] \right\} \quad (28) \end{aligned}$$

式中的有关单位以 m, s 计。从上式看出, 除决定单颗泥沙起动流速的  $d, \gamma_s, H$  及  $\gamma_s$  (或  $\frac{t}{\delta_1}$ ) 外, 对于多颗泥沙成片起动尚需增加了土块当量粒径  $D_n$  及形状  $\lambda$ 。可见式(26)、(27)考虑的因素是颇为全面的。

### 3 多颗成团起动瞬时底速与单颗的对比

为了对比方便, 现在仅考虑  $\varphi$  对  $\Delta'$  的平均值  $\bar{\varphi} = 0.916$ , 作为泥沙在床面位置影响其起动流速  $V_{k,s}$ 。这表示研究的单颗泥沙的瞬时起动速度是处于平均位置的值, 对此显然是可以接受

[1] 韩其为, 何明民. 水深及干容重对起动流速的影响. 中国水利水电研究院, 1995.

[2] 韩其为, 何明民. 滩泥沙起动标准. 中国水利水电科学研究院, 1995.

的. 此时(3)式代入(24)式, 遂有

$$V_{b,k}(d) = 27.41 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} d - \frac{0.1561 \times 10^{-7}}{d} \left( 3 - \frac{t}{\delta_1} \right) \left( \frac{\delta_1^2}{t^2} - 1 \right) + 1.301 \cdot 10^{-7} \left( 1 - \frac{t}{\delta_1} \right) \left( 3 - \frac{t}{\delta_1} \right) \frac{H}{d} \quad (29)$$

式中的有关单位以 m, s 计, 此处以  $V_{b,k}(d)$  表示单颗泥沙起动的瞬时底部流速, 为区别起见用  $V_{b,k}(D_0)$  表示多颗成片起动的瞬时底部流速. 现在分析两者的关系. 在图 3 中给出了  $\gamma_s = 2.65 \text{t/m}^3$ ,  $d = 0.005 \text{mm}$ ,  $\frac{t}{\delta_1} = 0.375$ , 单颗起动流速与水深的关系  $V_{b,k}(d) - H$ . 与此同时, 在图中同时还给出  $\lambda = 2$ ,  $\frac{t}{\delta_1} = 0.375$  下不同  $D_0$  时, 多颗成片起动流速  $V_{b,k}(D_0) - H$  关系. 从图中可见, 每一  $V_{b,k}(D_0) - H$  曲线与  $V_{b,k}(d) - H$  曲线均相交. 设交点纵坐标为  $H_k$ , 当在交点以下, 即  $H < H_k$ ,  $V_{b,k}(D_0) > V_{b,k}(d)$ ; 当在交点以上  $H > H_k$ ,  $V_{b,k}(D_0) < V_{b,k}(d)$ ; 交点处,  $V_{b,k}(D_0) = V_{b,k}(d)$ . 称交点水深为临界水深, 即  $V_{b,k}(D_0) = V_{b,k}(d)$  时的水深. 从图中还可看出, 临界水深随着  $D_0$  的加大而加大, 这是显然的. 需要强调的是水深加大,  $V_{b,k}(d)$  增加快的原因是其薄膜附加下压力占的比例要大.

令  $V_{b,k}(D_0) = V_{b,k}(d)$ , 则

$$H_k = \left[ 1.301 \left( 1 - \frac{t}{\delta_1} \right) \left( 3 - \frac{t}{\delta_1} \right) - 2.817 \left( 1 - \frac{t}{\delta_1} \right) \cdot \frac{1}{1 + 0.3197 \lambda^{-1}} \cdot \left( 1 + \frac{2t}{d} \right)^{-2} \right]^{-1} \cdot \left\{ 10^7 \left[ 196.2 \frac{r_s - r}{r} \left( \frac{\pi}{6} \right)^{1/2} \left( \frac{r_s'}{r_s} \right)^{3/2} \lambda^{-2} D_0 \cdot \frac{1}{1 + 0.3197 \lambda^{-1}} - 27.14 \frac{r_s - r}{r} d \right] d - 0.676 \left( 1 - \frac{4f}{\lambda} \right) \left( \frac{\delta_1^2}{t^2} - 1 \right) \cdot \frac{1}{1 + 0.3197 \lambda^{-1}} \cdot \left( 1 + \frac{2t}{d} \right)^{-2} - 0.1561 \left( 3 - \frac{t}{\delta_1} \right) \left( \frac{\delta_1^2}{t^2} - 1 \right) \right\} \quad (30)$$

此式的有关单位仍以 m, s 计. 现在分析两种特殊情形:

(1) 摩擦系数  $f = 0.4$ ,  $\gamma_s = 2.65 \text{t/m}^3$ ,  $d = 0.005 \text{mm}$ ,  $\lambda = 2$ ,  $\frac{t}{\delta_1} = 0.375$  ( $\gamma_s' = 1.236 \text{t/m}^3$ ), 即  $t = 1.5 \times 10^{-7} \text{m}$ , 此时上式简化为

$$H_k = 5437 D_0 + 4.072 \quad (31)$$

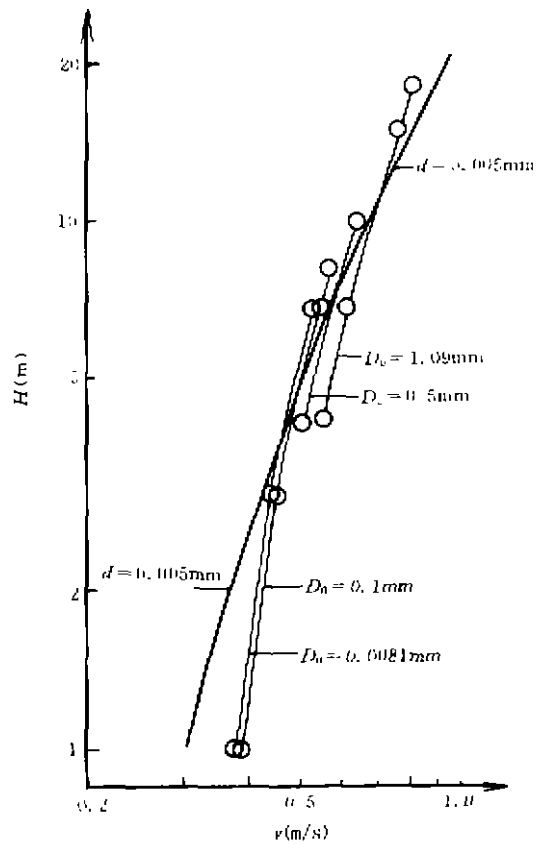


图 3 细颗粒成团起动流速与单颗的对比  
Fig. 3 Comparison of incipient motion with single particle and aggregated particles

(2)  $d=0.001\text{mm}$ ,  $\lambda=4$ ,  $\frac{t}{\delta_1}=0.375$ , ( $\gamma'_c=0.67\text{t/m}^3$ ),  $t=1.5 \times 10^{-7}\text{m}$ . 此时有

表 1 不同大小土块临界水深

Tab. 1 Critical water depth for different size lump

$d=0.001\text{mm}$		$d=0.005\text{mm}$	
$D_0(\text{mm})$	$H_c(\text{m})$	$D_0(\text{mm})$	$H_c(\text{m})$
0.0396	0.569	0.0081	4.12
0.05	0.584	0.05	4.34
0.1	0.601	0.1	4.62
0.5	0.732	0.5	6.79
1.0	0.895	1.0	9.51
1.32	1.00	1.09	10.00
2	1.22	2	14.95
3	1.55	3	20.39
5	2.21	5	31.26

$$H_c = 327.6D_0 + 0.568 \quad (32)$$

上述两式的有关量的单位仍以 m 计, 其部分数字结果如表 1 所示. 表 1 中的临界水深为大小不同土块瞬时起动底速恰好等于单颗泥沙瞬时起动底速时的水深. 从表中看出对于  $d=0.001\text{mm}$  泥沙, 当水深  $H > 1\text{m}$  时, 有  $D_0 < 1.32\text{mm}$  的不同大小土块的瞬时起动流速均小于单颗的, 显然此时已经是土块起动代替了单颗的. 与此相仿, 对于  $d=0.005\text{mm}$  泥沙, 当水深  $H > 4.62\text{m}$  或  $H \geq 10\text{m}$  时, 也有  $D_0 < 0.1\text{mm}$  或  $D_0 < 1.09\text{mm}$  的大小不同土块起动代替了单颗起动.

### 3 片状土块起动时临界水深及起动速度

实际表明, 粘土土块起动时多为片状. 片状土块最小的厚度应仅为一颗粒, 即  $c = (d + 2t)$ . 此时(9)式为

$$D_{0,m} = \left[ \frac{6}{\pi} \right]^{1/3} \left( \frac{\gamma'_c}{\gamma_c} \right)^{1/3} \lambda^2 d \left( 1 + \frac{2t}{d} \right) \quad (33)$$

这种土块以下将称为片状土块, 其当量粒径记作  $D_{0,m}$ . 它的典型组合为 4 个颗粒组成一片 ( $\lambda=2$ ); 16 个颗粒组成一片 ( $\lambda=4$ ) 等. 将(33)式代入(30)式, 并考虑天然沙取  $\gamma_c=2.65\text{t/m}^3$ , 遂有

$$H_c = \frac{10^7 \left[ \frac{323.7 \left( \frac{\gamma'_c}{\gamma_c} \right) \left( 1 + \frac{2t}{d} \right) - 45.2}{(1 + 0.3197\lambda^2)} \right] d^2 + \left[ \frac{0.676(1 - \frac{4f}{\lambda})(\frac{\delta_1^2}{t^2} - 1)}{(1 + 0.3797\lambda^2)(1 + \frac{2t}{d})^2} - 0.1516 \left( 3 - \frac{t}{\delta_1} \right) \left( \frac{\delta_1^2}{t^2} - 1 \right) \right]}{\left[ 1.301 \left( 1 - \frac{t}{\delta_1} \right) \left( 3 - \frac{t}{\delta_1} \right) - \frac{2.187 \left( 1 - \frac{t}{\delta_1} \right)}{(1 + 0.3197\lambda^2)(1 + \frac{2t}{d})^2} \right]} \quad (34)$$

此式的有关单位仍以 m, s 计. 在表 2 中列出了  $\lambda=2$ ,  $\frac{t}{\delta_1}=0.375$ , 即  $t=1.5 \times 10^{-7}\text{m}$ , 不同粒径泥沙的片状土块的  $\gamma'_c$ ,  $D_{0,m}$  及临界水深  $H_c$ . 从表中看出临界水深随单颗泥沙的粒径加大而增加. 在常规干容重 ( $\frac{t}{\delta_1}=0.375$ ) 下, 有下述结果: 1) 对于粘土 ( $d < 0.005\text{mm}$ ),  $H > 4.12\text{m}$  时; 2) 对于细粉土 ( $0.005-0.010\text{mm}$ ),  $H > 5.18\text{m}$  时; 3) 对于粗粉土 ( $0.01-0.05\text{mm}$ ),  $H > 10.30\text{m}$

表 2 不同粗细泥沙片状土块起动临界水深

Tab. 2 Critical water depth of incipient motion for layered soil with different particle size

$d(\text{mm})$	$(1 + \frac{2t}{d})$	$\gamma'_c(\text{t/m}^3)$	$D_{0,m}(\text{mm})$	$H_c(\text{m})$
0.001	1.30	0.67	0.00612	1.04
0.004	1.075	1.185	0.00648	3.73
0.005	1.06	1.236	0.0081	4.12
0.01	1.03	1.347	0.0162	5.18
0.05	1.006	1.446	0.081	10.30

时,几乎均以多颗成片起动进行。

表3 不同干容重、不同扁度、片状土块起动临界水深

Tab. 3 Critical water depth of incipient motion for layered soil with different dry density and lump ellipticity

$\frac{t}{\delta_1}$	$\left(1 - \frac{2t}{d}\right)$	$\gamma_s'$ ( $t/m^3$ )	$\lambda=2$		$\lambda=4$		$\lambda=20$	
			$D_{0.5}$ (mm)	$H_k$ (m)	$D_{0.5}$ (mm)	$H_k$ (m)	$D_{0.5}$ (mm)	$H_k$ (m)
0.200	1.032	1.408	0.00523	12.10	0.0131	9.72	0.00382	6.90
0.375	1.075	1.236	0.00810	4.12	0.0128	3.35	0.0376	2.42
0.500	1.080	1.140	0.00803	2.65	0.0127	2.18	0.0372	1.61
0.800	1.128	0.970	0.00795	1.51	0.0126	1.32	0.0369	1.07

为研究扁度  $\lambda$  和干容重对成块起动的临界水深的影响,按照(34)式计算了  $d=0.005\text{mm}$ ,  $\lambda=2, 4, 20$  及  $\frac{t}{\delta_1}=0.2, 0.375, 0.500, 0.8$  等各条件下的  $H_k$ , 如表3所示。可以看出:当单颗泥沙粒径固定,则随  $\lambda$  的增加,  $H_k$  减小,随着干容重减小,  $H_k$  也减小;对于  $d=0.005\text{mm}$  的单颗泥沙,当干容重较小时,临界水深可降至1m左右,可见在天然河道,特别在水库细颗粒淤积处,当泥沙起动时多颗成片进行是较为普遍的形式。

在表(4)中按照(34)式计算了  $d=0.001\text{mm}$ ,  $\lambda=4$  不同干容重泥沙起动时的临界水深。可见对于这种泥沙,当干容重很小时,片状土块的临界水深很小,几乎为零。当然  $H_k$  为负值的物理意义是对于任何水深,单颗起动流速不可能小于多颗片状土块的起动流速。换句话说,当  $d=0.001\text{mm}$ , 且干容重很小时,单颗泥沙起动几乎不存在,均是多颗成片进行。

表4  $d=0.001\text{mm}$  时片状土块起动临界水深

Tab. 4 Critical water depth of incipient motion for layered soil with  $d=0.001\text{mm}$

$\frac{t}{\delta_1}$	$1 + 0.8 \frac{t}{\delta_1}$	$\gamma_s'$ ( $t/m^3$ )	$\lambda=4$	
			$D_{0.5}$ (mm)	$H_k$ (m)
0.200	1.16	0.992	0.00402	3.70
0.375	1.30	0.670	0.00394	0.560
0.500	1.40	0.524	0.00393	0.174
0.700	1.56	0.369	0.00389	0.0255
0.800	1.64	0.316	0.00388	-0.0258

#### 4 片状土块起动时垂线平均流速与单颗的对比

在表5中列出了单颗泥沙  $d=0.005\text{mm}$ ,  $\frac{t}{\delta_1}=0.2, 0.375, 0.500, 0.8$ ,  $\lambda=4$  在不同水深条件下按上述有关公式计算的片状土块瞬时起动底速  $V_{k,k}(D_0)$  和垂线平均起动底速  $V_k(D_0)$ , 及单颗瞬时起动底速  $V_{k,k}(d)$  和垂线平均起动流速  $V_k(d)$ 。其中  $V_{k,k}(D_0)$  按(28)式计算,  $V_{k,k}(d)$  按(29)计算,  $V_k(d)$  按(5)、(3)式计算, 而  $V_k(D_0)$  由于暂时未将  $V_{k,k}(D_0)$  和低输沙率联系起来, 难以直接给出计算的公式, 但可以按  $V_{k,k}(d)$  与  $V_k(d)$  的比值进行, 即

$$V_k(D_0) = V_{k,k}(D_0) \frac{V_k(d)}{V_{k,k}(d)} = \frac{0.116}{0.916} \varphi V_{k,k}(D_0) = 0.127 \varphi V_{k,k}(D_0) \quad (35)$$

从表5可见:(1)以起动临界水深为界,当  $H < H_k$  时,  $V_k(D_0) > V_k(d)$ ; 当  $H > H_k$  时,  $V_k(D_0) < V_k(d)$ ; 而当  $V_k(D_0) = V_k(d)$  时, 则  $H = H_k$ 。这一点与瞬时起动底速规律一致。(2)在表中所示  $H > H_k$  的范围, 片状土块起动流速  $V_k(D_0)$  仅为  $V_k(d)$  的80%—90%。(3)如以  $d=$

0.005mm 代表粘土,而  $\frac{t}{\delta_1} = 0.2$  (相应的  $\gamma_s = 1.408t/m^3$ ) 为密实情况,则当水深在 10m 内时,片状土块起动流速一般在 3m 以下,或在 3m 左右,这与室内试验与野外测量数据一致。

表 5 片状土块垂线平均起动流速与单颗对比

Tab. 5 Comparison of incipient velocity averaged of single particle in vertical direction with layered soil

$\frac{t}{\delta_1}$	$H$ (m)	$\gamma_s$ (t/m <sup>3</sup> )	$D_0$ (mm)	$V_{k,1}(D_0,t)$ (m/s)	$V_{k,1}(d)$ (m/s)	$\gamma$	$\sigma_0$ (m/s)	$V_c(d)$ (m/s)	$V_c(D_0)$ (m/s)
0.2	6.00	1.408	0.031	0.794	0.748	26.06	0.817	2.74	2.63
	9.723			0.881	0.881	26.55	0.962	2.96	2.96
	12.00			0.931	0.953	26.76	1.041	3.23	3.11
	20.00			1.086	1.173	27.27	1.280	4.05	3.75
0.375	1.00	1.236	0.0128	0.354	0.305	24.15	0.333	0.933	1.08
	3.346			0.440	0.440	25.46	0.480	1.42	1.32
	6.00			0.520	0.554	26.06	0.604	1.85	1.72
	9.00			0.598	0.659	26.48	0.719	2.21	2.01
	15.00			0.729	0.831	26.99	0.907	2.84	2.49
0.500	0.50	1.140	0.0127	0.238	0.200	23.36	0.218	0.510	0.705
	2.177			0.307	0.307	25.00	0.335	0.973	0.973
	4.00			0.368	0.392	25.64	0.427	1.27	1.19
	8.00			0.424	0.533	26.36	0.582	1.78	1.42
0.800	0.5	0.970	0.0126	0.112	0.099	23.36	0.108	0.293	0.331
	1.316			0.138	0.138	24.45	0.151	0.428	0.428
	3.00			0.182	0.192	25.34	0.214	0.629	0.584
	6.00			0.240	0.309	26.36	0.338	1.05	0.800
	12.00			0.326	0.426	26.76	0.441	1.27	1.10

## 5 成块起动流速的验证

细颗粒成块(片)起动的试验资料较少,而且由于起动后相当一部分颗粒转为悬浮,使水流浑浊,观测起来也颇为困难。此处仅搜集到黄岁梁,陈稚聪等人利用塑料沙做的试验<sup>[1]</sup>。塑料沙  $D_{10} = 0.028\text{mm}$ , 密度  $1.05\text{g/cm}^3$ 。试验水槽宽 0.5m, 长 17m。试验前搅拌均匀的塑料沙浆倒入槽中,静置沉积,以形成槽内 5cm 厚的沙层,然后上覆清水,待水下固结。水下固结试验共进行 3 次,第一次固结 12d (相应干容重  $0.603\text{g/cm}^3$ ),第二次固结 125d (相应干容重  $0.648\text{g/cm}^3$ ),第三次固结 185d (相应干容重  $0.659\text{g/cm}^3$ )。每次固结后,放三种水深做起动流速试验。试验中观察到“当水下固结 12d 时,塑料沙是呈现一丝丝、一缕缕的起动破坏,水下固结时间增加时,如固结 185 天时,塑料沙呈现一小团、一小块的起动破坏”<sup>[1]</sup>。因此可以认为在本项试验中,细颗粒起动时,处于单颗与成团起动的临界状态,或者说两者都能起动。当固结时间短时,以单颗起动为主,从而出现一丝丝、一缕缕的破坏,而当固结时间长时,则开始有成团、成块起动。当然此时也会有单颗起动,只是目标不如成团、成块明显、观察时不易醒目罢了。

[1] 黄岁梁,陈稚聪,府仁寿,模型沙性质的试验研究,清华大学水利水电工程系泥沙研究室,1996。



表 5 成块起动流速检验

Tab. 6 Verification of incipient velocity of layered soil

原始数据				$\phi$	成块运动 $D_0$ (mm)	成块运动		单颗起动	
$H$ (m)	$V_s$ (m/s)	$\gamma_s$ (t/m <sup>3</sup> )	$\frac{t}{\delta_1}$			$V_{s,k}(D_0)$ (m/s)	$V_s(D_0)$ (m/s)	$\omega_1$ (m/s)	$V_s(d)$ (m/s)
1.1	0.073	0.603	0.20	18.07	0.300	0.0248	0.0625	0.0285	0.0502
1.1	0.124	0.648	0.072	18.07	0.337	0.0550	0.126	0.0507	0.106
1.4	0.152	0.659	0.05	18.07	0.338	0.0754	0.173	0.0681	0.143
2.5	0.086	0.603	0.20	18.81	0.300	0.0324	0.0774	0.0346	0.0756
2.5	0.143	0.648	0.072	18.81	0.337	0.0575	0.137	0.0531	0.120
2.5	0.175	0.659	0.05	18.81	0.338	0.0773	0.185	0.0715	0.156
11.5	0.106	0.603	0.20	19.39	0.300	0.0366	0.0904	0.0412	0.0924
11.5	0.155	0.648	0.072	19.39	0.337	0.0606	0.137	0.0603	0.136
11.5	0.192	0.659	0.05	19.39	0.338	0.0797	0.196	0.0757	0.170

试验的 9 个资料如表 6 所示, 由于是塑料沙, 粘着力很小, 按作者验证, 塑料沙, 其粘着力仅为天然沙的  $\frac{1}{200}$ , 因此对片状土块, 将式 (33) 代入式 (28) 起动有底速为

$$V_{s,k}(D_0) = \left\{ \frac{1}{1 + 0.3197\lambda^2} \cdot \left[ 196.2 \left( \frac{\gamma_s'}{\gamma_s} \right) \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} d \left( 1 - \frac{2t}{d} \right) + \frac{0.338 \times 10^{-9}}{\left( 1 + \frac{2t}{d} \right)^2 d} \right. \right. \\ \left. \left. \left( 1 + 4 \frac{f}{\lambda} \right) \left( \frac{\delta_1^2}{t^2} - 1 \right) + \frac{2.817 \times 10^{-7}}{\left( 1 + \frac{2t}{d} \right)^2} \left( 1 - \frac{t}{\delta_1} \right) \left( \frac{H}{d} \right) \right] \right\}^{1/2} \quad (36)$$

对于  $d=0.028\text{mm}$ ,  $\gamma_s=1.05\text{t/m}^3$ ,  $\lambda$  取为 20 的片状土块, 则

$$V_{s,k}(D_0) = \left[ \frac{2.704 \times 10^{-4} \frac{\gamma_s'}{\gamma_s} \left( 1 + \frac{2t}{d} \right) + \frac{0.1283 \times 10^{-4}}{\left( 1 + \frac{2t}{d} \right)^2} \left( \frac{\delta_1^2}{t^2} - 1 \right) + \right. \\ \left. 99.0 \times 10^{-4} \left( 1 - \frac{t}{\delta_1} \right) \frac{H}{\left( 1 + \frac{2t}{d} \right)^2} \right]^{1/2} \quad (37)$$

相应的垂线平均起动速度  $V_s(D_0)$  按式 (35) 给出, 此时对于单颗起动速度, 按式 (3),  $\omega_1$  为

$$\omega_1 = \left[ 0.4533 \times 10^{-4} + 3.321 \times 10^{-6} \left( 3 - \frac{t}{\delta_1} \right) \left( \frac{\delta_1^2}{t^2} - 1 \right) + 5.536 \times 10^{-2} H \left( 1 - \frac{t}{\delta_1} \right) \left[ 3 - \frac{t}{\delta_1} \right] \right]^{1/2} \quad (38)$$

其中已将  $d=0.028\text{mm}$  代入, 此式及式 (37) 中有关单位均取 m·s, 至于以垂线平均流速表示的单颗起动速度  $V_s(d)$  与瞬时起动底速的关系前面已指出按式 (5) 给出, 这样计算的单颗起动流速的  $\omega_1$ ,  $V_s(d)$  及多颗成片起动的  $V_{s,k}(D_0)$  及  $V_s(D_0)$  亦列如表 6 中, 从表中看出, 对于 9 次试验资料, 计算的单颗起动流速均小于实测流速, 但差别不大, 可以认为尚处于起动, 而片状土块水深为 0.044m 时, 起动流速大于实测的, 而当水深为 0.075m 及 0.115m 时, 两者相近, 综合起来看, 可以认为在试验中水流速度已达到单颗起动流速, 故总是有单颗泥沙起动, 而对于片状土块, 当水深为 0.044m 时, 成片起动流速略高于实际流速, 故成片起动少; 当水深为 0.075m 及 0.115m 时, 成片起动流速与实际流速接近, 故有土块起动, 尚需说明的是, 表 6 中

的片状土块其当量直径为  $0.3-0.338\text{mm}$ ,而成片的面积为  $(0.563\text{mm})^2-(0.561\text{mm})^2$ ,即相当于 400 个  $0.028\text{mm}$  的泥沙排成一块,每边 20 颗,而厚度则为一个颗粒厚  $d(1-2t)$ 。由此可见,成片起动时目标是较大的,容易观察到。

### 参 考 文 献

- 1 唐存本,泥沙起动规律.水利学报,1963,(2):4-12
- 2 窦国仁,论泥沙起动流速.水利学报,1969,(4):44-59
- 3 武汉水利电力学院,河流动力学.北京:中国工业出版社,1960,44-60
- 4 韩其方,泥沙起动规律及起动流速.泥沙研究,1962,(2):11-26
- 5 ИИ.Трени,Динамика рус.ных потоков. ГИ.шпергоиздат,1957,116-126
- 6 李保如,泥沙起动流速的计算方法.泥沙研究,1964,(4):71-79.
- 7 韩其方,何明民.论泥沙起动标准.见:三峡水利枢纽工程应用基础研究,第一卷.北京:中国科学技术出版社,1996,7-18

## THE INCIPIENT MOTION AND VELOCITY OF AGGEGATED FINE PARTICLES

Hang Qiwei

He Mingmin

(China Institute of Water Resources & Hydroelectric Power Research, Beijing 100044)

### Abstract

Under deep water, the incipient velocity calculated from the formulae for single fine particle under cohesive force and additional pressure of film water is much larger than real one and even more than  $3\text{m/s}$  in some cases. Besides, in the nature, sometimes, the fine sediment is aggregated as soil lump or layered soil, not in single particle to start moving. In this paper, the critical condition of incipient motion for the aggregated soil under cohesive force and additional pressure of film water is studied, and the incipient velocity is derived. The critical depth  $H_c$  is introduced after comparing the incipient motion of single particle with that of lump and layered soil. In the cases of  $H$  (water depth)  $> H_c$ ,  $H = H_c$  or  $H < H_c$ , the incipient velocity for single particle may be greater than, equal to or less than that of aggregated soil, respectively. When  $H > H_c$ , the incipient soil is mainly in aggregated structure. The calculation reveals that  $H_c$  reduces with the decrease of  $D_s$ , the size of soil lump, dry density and single particle size, and with the increase of lump ellipticity under certain conditions. In some cases,  $H_c$  may be very small and even zero, so that in incipient motion, the sediment will be aggregated in lump or layered soil under any water depth. The formulae for aggregated fine particles have been verified in laboratory, and show good agreement with the observed data.

**Key Words** Incipient motion of lump, fine particle, critical depth, layered soil