单向流边界层泥沙起动规律

李寿千,陆永军,左利钦,黄伟昊,陆 彦

(南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏南京 210029)

摘要: Shields 曲线常用于表示泥沙起动的临界条件,基于边界层理论,对 Shields 曲线各个流区的线型进行了推证; 考虑粘结力的作用,对 Shields 参数及 Shields 曲线进行了修正,并给出修正 Shields 曲线表达式;在此基础之上,从 边界层角度重新阐述了 Shields 曲线。结果表明: Shields 曲线在光滑紊流及层流区呈直线分布,在过渡区与阻力系 数线型保持一致,在粗糙紊流区呈水平直线分布;修正后 Shields 曲线与原始 Shields 曲线在形式上保持一致,修正 Shields 曲线表达式与实测数据吻合较好,适用于粗、细颗粒泥沙起动条件的计算; Shields 曲线事实上代表了 Shields 参数与沙粒周围绕流流态的关系,同一颗粒处于不同流区起动时,其起动切应力不同。

关键词:单向流;边界层;泥沙起动;Shields曲线 中图分类号:TV 142⁺.1 文献标志码:A 文章编号:1001-6791(2013)06-0821-09

泥沙起动问题是河流、海岸泥沙运动的基本问题,关系着泥沙的推移和悬移。早在 1753 年, Brahms 就 提出了泥沙起动流速与泥沙重量的 1/6 成正比^[1]。19 世纪末,人们开始从力学平衡的角度,来重新考虑这 个问题。1936 年, Shields^[2]把当时正流行的量纲分析法应用到泥沙运动中去,提出了著名的 Shields 曲线, 该曲线至今仍被广泛应用。近年来,泥沙起动的研究主要集中于更符合天然实际的非均匀沙^[34]及粘性土的 起动条件^[5-6]这两个方面,取得了丰硕的成果。

对于单向流作用下的泥沙起动规律的研究,主要从泥沙颗粒的受力力学机理出发,据临界失稳条件,导 出作用于沙粒的临界有效流速,进而通过水力学理论,将其转化为垂线平均流速或切应力的形式。起动公式 主要有两种,一种以起动流速为表达形式,以沙莫夫(Shamov)公式^[7]和窦国仁公式^[8]为代表;另一种则以 起动切应力为表达形式,以Shields曲线^[2]为代表。其中,Shields曲线以其形式简单,物理意义明确,至今 仍被广泛采用。原始Shields曲线是在无黏性泥沙受力平衡的力学理论基础上,通过拟合实测数据而来。推 导在未区分床面不同水力光滑度情况下采用了同一流速公式,亦未考虑颗粒黏性。事实上,泥沙起动临界条 件显然与近底处颗粒的绕流状态有关。本文拟以边界绕流理论为基础,针对各种绕流状态的特点,对Shields 曲线进行讨论,并将其拓展至细颗粒泥沙情形。

1 Shields 曲线的力学基础及其存在的问题

1.1 Shields 曲线的力学基础

1936 年 Shields 即推导出泥沙起动 Shields 方程。首先从作用在床面泥沙颗粒力的平衡出发,推导出近底 处有效流速 u₀的计算公式:

$$\rho u_0^2 = \frac{4}{3} f \frac{(\gamma_s - \gamma) d}{C_D + f C_L} \tag{1}$$

通信作者: 陆永军, E-mail: yjlu@nhri.cn

收稿日期: 2012-12-31; 网络出版时间: 2013-09-12

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309. P. 20130912.1140.011.html

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2012CB417002); 国家自然科学基金资助 NSFC-NOW 项目 (中荷)(51061130546)

作者简介:李寿千(1986-),男,江苏徐州人,博士研究生,主要从事泥沙及河流海岸动力学研究。

E-mail: lishouqiansh@163.com

式中 d 为泥沙粒径; u_0 为作用于颗粒的有效流速, 取 y = Kd 处的流速, K 为常数; γ_s 、 γ 分别为沙粒及水的重度; C_D 、 C_L 分别为拖曳力和上举力系数,通常认为与沙粒雷诺数 $u_* d/\nu$ 相关, u_* 为摩阻流速, ν 为水流运动粘滞系数; f 为床面静摩擦系数,取为常数。然后,借助于爱因斯坦(Einstein)紊流流速分布公式^[9]:

$$\frac{u}{u_*} = 5.75 \, \lg 30.2 \, \frac{\chi y}{\alpha_1 d} \tag{2}$$

式中 χ 为沙粒雷诺数的函数; α_1 为常数 ($\alpha_1 \approx 2$),从而导出了 Shields 起动切应力公式:

$$\frac{\tau_{c}}{(\rho_{s} - \rho)gd} = f\left(\frac{u_{sc}d}{\nu}\right)$$
(3)

式(3) 左端即定义为 Shields 参数 ψ_{c} ; τ_{c} 为起动切应力; u_{*c} 为起动摩阻流速,并通过不同比重 4 种沙的试验 结果以及其他学者和研究机构的资料得出起动曲线,如图 1 所示。



沙粒雷诺数事实上表示了粒径与近壁层流层厚度的 比值,从边界层的角度来看,其表征沙粒周围不同的绕 流流态,不同的水流泥沙条件下,存在着紊流光滑区、 过渡区及粗糙区。由图 1 可知,双对数坐标条件下, Shields曲线在粗糙紊流区呈水平线趋势,在过渡区呈马 鞍形曲线,在光滑紊流区,曲线成为一条 45°的直线。应 该指出,光滑紊流区的曲线是由 Shields 从泥沙沉降时阻 力系数与绕流雷诺数之间的关系相类比推断得出,并没 有实验点据,White^[10]和 Mantz^[11]的粉沙实验资料表明这 一推论与事实不符,Shields 参数与沙粒雷诺数的 0.3 次 方成反比。

Yalin 和 Arahan^[12]用甘油溶液开展层流条件下的泥沙

起动结果表明(图1),层流中的泥沙起动规律不同于紊流条件,前者要求的剪应力一般较后者大。边界层的 视角下,由于光滑紊流区存在近壁层流层,床面颗粒附近的绕流流态与层流相一致,所以这两部分点群聚合 在一起。

1.2 存在问题

(1)理论问题 单向水流条件下的 Shields 曲线在不同水流泥沙条件下,因粒径与近壁层流层的厚度比 值不同而存在着紊流光滑区、过渡区及粗糙区,且 Shields 在把颗粒有效流速转化为切应力的过程中则借助 于爱因斯坦提出的紊流光滑、过渡及粗糙区统一流速分布公式(式(2))。但应当特别指出,爱因斯坦公式描述的是紊流核心区的流速分布,而在近壁层流层和过渡区并不适用。因此,如图2所示,对于粗糙紊流来 说,颗粒位于紊流核心区,将有效流速代入爱因斯坦公式推求切应力是合适的。对于过渡紊流来说,泥沙颗 粒位于紊流过渡区,爱因斯坦公式亦不适用,但当粒径稍大些时,紊流过渡区流速分布与核心区相比偏离较 小,此时采用爱因斯坦公式是可以接受的。然而对于光滑紊流区,颗粒完全受到了近壁层流层的遮蔽,其周 围流速分布符合层流条件,与紊流核心区的流速分布完全不同,因此将有效流速代入爱因斯坦公式来推求底 部切应力是不合适的。

(2) 线型的经验性 在证明 Shields 参数与沙粒雷诺数呈单值相关关系时,采用了理论推导,然而 Shields 参数与沙粒雷诺数的具体相关关系是通过实测数据经验拟合而获得,比如 Shields 曲线在层流区及光 滑紊流区呈直线趋势,过渡区呈马鞍型,粗糙紊流区呈水平线,而缺乏对各个流区段线型的理论推证。事实 上, Shields 曲线各流区的线型均有合理的理论依据,对此本文将基于边界层理论进行推证。

(3) 细颗粒泥沙的不适用性 应当指出,光滑紊流区的资料主要是欧美学者采用较粗天然沙在粘滞系数较大的甘油中试验获得,由于粗沙颗粒间粘结力可以忽略,符合 Shields 曲线的力学基础,因此针对甘油作用下粗颗粒泥沙起动,层流区或光滑紊流区的 Shields 曲线是合适的。

若作用流体为水流,床面颗粒为天然沙,此时位于层流区或光滑紊流区的起动泥沙粒径均较小,依据 Shields曲线的力学基础,若颗粒之间不存在粘结力,则层流区或光滑紊流区泥沙起动 Shields曲线仍然适用。 事实上,起动泥沙粒径较小时,颗粒之间的粘结力显著,泥沙起动切应力将明显加大,图3中窦国仁^[8]收集 的细颗粒泥沙起动实测资料也充分说明了这一点。因此从力学角度而言,Shields曲线不适用于细颗粒泥沙, 需要进一步改进。







2 基于边界层理论的 Shields 曲线线型推证

2.1 层流(光滑紊流)

通过力学平衡确定沙粒的有效流速公式适用于各个流区,层流条件下切应力的推求关键在于层流流速分 布及拖曳力、上举力系数的确定。层流条件下

$$\tau = \rho \nu \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y} \tag{4}$$

近底处可做假定

$$\tau = \rho u_*^2 = \rho \nu \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y} = \rho \nu \frac{u}{y}$$
(5)

因此可以得到近底处流速分布为

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u_* y}{\nu} \tag{6}$$

对于层流条件下的拖曳力及上举力系数,钱宁和万兆惠^[1]综合了前人的研究成果,认为床面沙粒的阻力系数和泥沙在自由沉降时的相应关系有一定的相似性,因此假定该关系在线型上仍然符合 Stokes 定律:

$$C_{\rm D} = a \left(\frac{u_0 d}{\nu}\right)^{-b} \qquad C_{\rm L} = c \left(\frac{u_0 d}{\nu}\right)^{-b} \tag{7}$$

式中 a、b、c均为常数。将式(6)代入式(7),得

$$C_{\rm D} = a \left(\frac{u_0 d}{\nu}\right)^{-b} = a \left(\frac{u_0}{u_*} \frac{u_* d}{\nu}\right)^{-b} = a \left(K \frac{u_* d}{\nu} \frac{u_* d}{\nu}\right)^{-b} = a K^{-b} \left(\frac{u_* d}{\nu}\right)^{-2b}$$
(8)

$$C_{\rm L} = c \left(\frac{u_0 d}{\nu}\right)^{-b} = c \left(\frac{u_0}{u_*} \frac{u_* d}{\nu}\right)^{-b} = c \left(K \frac{u_* d}{\nu} \frac{u_* d}{\nu}\right)^{-b} = c K^{-b} \left(\frac{u_* d}{\nu}\right)^{-2b}$$
(9)

联合式(1)、式(6)、式(8)和式(9),可得

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)d} = m \left(\frac{u_{sc}d}{\nu}\right)^{2b-2}$$
(10)

式中 $m = \frac{4}{3} f k^{b-2} \frac{1}{f c + a}$ 为常数。

式(10)表明,在层流区,Shields曲线在对数坐标上遵循着线性分布,实测点据也证实了这一点。依据 实测资料回归分析,m = 0.1,b = 0.85,从而可以进一步推断出,对于均匀颗粒而言,层流条件下床面的拖 曳力系数符合 $C_{\rm D} = a(u_0 d/\nu)^{-0.85}$ 的表达形式,a的取值有待于进一步研究。

光滑紊流及层流条件下泥沙起动时,沙粒周围的绕流流态均为层流,其流速分布及拖曳力、上举力系数 均应符合相同规律,上述理论分析结果完全适用于光滑紊流,因此光滑紊流条件下的 Shields 曲线与层流相 一致,实测数据也证实了这一点。

2.2 粗糙紊流区

对于粗糙紊流区 Shields 曲线的线型,仍参照层流及光滑紊流区的推导方法,只是流速分布及拖曳力、 上举力系数采用粗糙紊流区成果,其中流速分布采用爱因斯坦公式,拖曳力、上举力系数采用常数,容易推 证出粗糙紊流区的 Shields 曲线为常数。单向流条件下试验数据显示,在雷诺数很大时,试验数据总体呈一 条水平带,上限为0.06,下限为0.04,证实了粗糙紊流区 Shields 参数保持为常数,通常可取为0.05。鉴于 前人已经进行了详细推证,不再赘述。

2.3 过渡区

图 4 单向流阻力系数 Fig. 4 Steady flow friction coefficient

> 阻力系数与床面的相对粗糙度及流态有关,通常有两种表 达形式,一种采用全水深范围参数即雷诺数和相对粗糙度来表 达,直观明了,便于查表应用;另一种则采用沙粒周围的绕流 流态即沙粒雷诺数来表达,如图4所示。事实上两者相统一。

Shields 参数又可以表达为

$$\frac{\tau_{\rm c}}{(\gamma_{\rm s} - \gamma)d} = \frac{0.5\lambda\rho U_{\rm c}^2}{(\gamma_{\rm s} - \gamma)d}$$
(11)

式中 λ 为阻力系数; U_e 为垂线平均起动流速, 这里 U_e 选用常用的并经过大量实测资料验证的沙莫夫 公式:

$$U_{\rm e} = 1.14 \sqrt{\frac{\gamma_{\rm s} - \gamma}{\gamma} g d} \left(\frac{d}{h}\right)^{1/6} \tag{12}$$

其适用范围为 d > 0.2 mm, h 为水深。式(12)代入式(11)得

$$\frac{\tau_{e}}{(\gamma_{s} - \gamma)d} = 0.65\lambda \left[\left(\frac{d}{h}\right)^{1/6} \right]^{2}$$
(13)

而又因为谢才系数为

$$C = A \left(\frac{h}{d}\right)^{1/6} \tag{14}$$

式中 A为常数,与床沙粒径、级配及排列情况有关。同时

$$\lambda = 8g/C^2 \tag{15}$$

因此联合式(13)~式(15),可得到

$$\frac{\tau_{\rm c}}{(\gamma_{\rm s} - \gamma)d} = 0.008 \, 3A^2 \lambda^2 \tag{16}$$

式(16)表明, Shields 参数事实上为阻力系数的一种表征形式, 显然 Shields 曲线(图1)与阻力系数

曲线(图4)在过渡区线型应当一致,图1及图4对比结果也表明了这一点。应当指出式(16)具体表达 式与选择的泥沙起动流速公式的形式有关,如选择岗恰列夫起动(Goncharov)公式^[13],得出的具体表 达式显然不同,然而结构形式仍然类似,即可以把 Shields 参数表达为阻力系数的函数,同样可以说明 上述结论。

$$U_{c} = 1.07 \lg \frac{8.8h}{d_{95}} \sqrt{\frac{\gamma_{s} - \gamma}{\gamma} gd}$$
(17)

式中 d₉₅表示粒配曲线上小于该粒径的泥沙在沙样总重中占 95%,该公式适用范围为 d = 0.08~1.50 mm。

3 考虑粘结力修正 Shields 曲线

在研究粘性泥沙起动问题时,需要区分两种情况,一种是在河床冲淤过程中自然沉积、新淤未久、尚未 密实的泥沙,这种情况可以按单颗粒泥沙处理,另一种为沉积日久、经过物理化学作用形成的固结粘性土, 这种情况泥沙通常以成片成团的进入运动状态,本研究针对新淤粘性土的情形。

3.1 考虑粘性力的 Shields 方程推导

参照 Shields 曲线的推导方法,考虑粘结力 N 的作用,依据泥沙受力平衡失稳条件,易推导出:

$$\rho u_0^2 = \frac{4}{3} \frac{f}{C_{\rm D} + fC_{\rm L}} \left[\left(\gamma_{\rm s} - \gamma \right) d + \frac{6}{\pi} \frac{N}{d^2} \right]$$
(18)

对于层流及光滑紊流情形,爱因斯坦公式已经不再适用,下述将选择合适的流速分布公式把近底有效流 速转化为切应力。便于与不考虑粘性情形相区分,下述推导中分别采用 τ_{ex} 及 u_{*ex} 表示考虑粘结力情形下泥 沙起动切应力及摩阻流速。对于层流区或光滑紊流区流速分布,通过式(6)可知,满足:

$$\frac{u}{u_*} = f_1\left(\frac{\chi_1 y}{d}\right) \tag{19}$$

式中 $\chi_1 = u_* d/\nu_\circ$

对于过渡区及粗糙紊流区,爱因斯坦公式仍然适用,满足:

$$\frac{u}{u_*} = f_2\left(\frac{\chi_2 y}{d}\right) \tag{20}$$

式中 χ_2 亦为 $u_* d/\nu$ 的函数。因此全流区流速分布满足:

$$\frac{u}{u_*} = f_3\left(\frac{\chi_3 y}{d}\right) \tag{21}$$

式中 χ_3 为 $u_* d/\nu$ 的函数。若取 y = d 时, $u = u_0$, 则容易导出:

因此对于粘性泥沙而言,易得

$$\frac{\tau_{cz}}{(\gamma_{s} - \gamma)d + \frac{6}{\pi}\frac{N}{d^{2}}} = \frac{4}{3}\frac{f}{C_{D} + fC_{L}}\frac{1}{f_{3}^{2}(\chi_{3})} = f_{4}\left(\frac{u_{*cz}d}{\nu}\right)$$
(23)

式(23)左端表示考虑粘性后的 Shields 参数,定义为修正 Shields 参数 ψ_z 。泥沙起动稳定力表现为 $(\gamma_s - \gamma)d + \frac{6 N}{\pi d^2}$,当粒径较小时,粘性力显著,粒径较大时,粘性项趋于0,式(23)退化为无粘性情形:

$$\frac{\tau_{\rm c}}{(\gamma_{\rm s} - \gamma)d} = \frac{4}{3} \frac{f}{C_{\rm D} + fC_{\rm L}} \frac{1}{f_3^2(\chi_3)} = f_4\left(\frac{u_{\rm *c}d}{\nu}\right)$$
(24)

对比分析式(23)和式(24),可以得出 ψ_z 与 $u_{*ex}d/\nu$ 的关系遵循着 ψ_c 与 $u_{*ex}d/\nu$ 的关系,因此修正后的 Shields曲线从形式上仍然遵循着原始 Shields曲线的规律。然而其本质上存在着不同,针对同一粒径细颗粒 泥沙,考虑粘结力后, $u_{*ez}d/\nu > u_{*e}d/\nu$, 而 $\psi_z < \psi_e$, 在 Shields 曲线上体现为对应点据右移。同时,根据图 3 中粘性颗粒点据偏离原始 Shields 曲线的情况,可以得出上述修正的效应主要体现在光滑紊流区,因此修正 后的 Shields 曲线仍然遵循着原始 Shields 曲线的流区划分标准。

3.2 粘性力选择

细颗粒泥沙所受的作用力比较复杂,目前对粘结力成因的认识还不一致。张瑞瑾等^[14]、窦国仁^[15]认为 粘结力是由于束缚水不传递静水压力所引起,而唐存本^[16]有不同的观点,认为粘结力主要是由于沙粒表面 与粘结水之间的分子引力造成的,窦国仁^[8]则认为粘结力应由水对床面颗粒的下压力及颗粒间的分子粘结 力两部分组成。虽然各家单位面积的粘结力具体表达式不尽相同,但均能够反映粒径越小粘结力越大的物理 图式,并通过调整公式中待定参数,均使得泥沙起动流速代表的曲线通过试验点据的中心。总体而言,正确 的粘结力结构形式保证了曲线的线型趋势,而待定参数的调整保证了曲线绝对值的大小。基于上述讨论,综 合考虑前人的研究成果,采用如下粘结力表达形式^[8]:

$$N = k(\gamma h d\delta + d\varepsilon) \tag{25}$$

式中 δ 为与沙粒缝隙大小有关的特征厚度,取值为 0. 213 × 10⁻⁶m; ε/ρ 为粘结力参数,取值为 2. 56 × 10⁻⁶ m³/s²; k 为常数。单位面积粘结力表达式为

$$p = \frac{k(\gamma h d\delta + d\varepsilon)}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{4k(\gamma h \delta + \varepsilon)}{\pi d}$$
(26)

前已推证出修正后的 Shields 曲线形式仍然遵循着原始 Shields 曲线的规律,通过对窦国仁^[8]收集的单向 流作用下实测点据拟合,发现 *k* = 0.016 时实测数据与修正 Shields 曲线吻合较好,拟合结果如图 5 所示。则 考虑粘结力的 Shields 方程为

$$\psi_{z} = \frac{\tau_{ez}}{(\gamma_{s} - \gamma)d + 0.016\left(\frac{\gamma h\delta}{d} + \frac{\varepsilon}{d}\right)} = \frac{4}{3} \frac{f}{C_{D} + fC_{L}} \frac{1}{f_{3}^{2}(\chi)} = f\left(\frac{u_{*ez}d}{\nu}\right)$$
(27)

3.3 粘结力的合理性评估

图 6 给出了不同水深、不同粒径条件下粘结力在稳定力(重力 + 粘结力)中的比重,易知,当 *d*≥1 mm 时,重力是泥沙颗粒稳定的主要因素;当 *d*≤0.01 mm 时,粘结力是主要因素;当 0.01 ≤ *d*≤1 mm 时,重力 和粘结力皆不可忽略,与唐存本^[16]结果相符合。针对现有水深(*h*<1 m)较小时的试验数据,易得当 *d*≥0.1 mm 时,可以忽略粘性的影响,与图 3 实测点据结果相一致。因此粘结力表达式基本合理,可用于修正 Shields 参数。



Fig. 5 Modified Shields curve

图 6 粘结力在稳定力(重力 + 粘结力)中的比重 Fig. 6 Comparison of gravity and viscosity

3.4 修正 Shields 曲线表达式

根据上述讨论,给出修正 Shields 曲线的表达式(图 5):

$$\psi_{z} = \begin{cases} 0.1Re_{z}^{-0.3} \\ \exp(-0.02\ln^{3}Re_{z} - 0.27\ln^{2}Re_{z} + 1.02\ln Re_{z} + 2.27) \\ 0.05 \end{cases}$$

式中
$$Re_{*z} = \frac{u_{*cz}d}{\nu}$$
, $\psi_z = \frac{\tau_{cz}}{(\gamma_s - \gamma)d + 0.016(\frac{\gamma h\delta}{d} + \frac{\varepsilon}{d})}$

窦国仁^[8]给出了粗细颗粒均适用的临界起动切应力 的表达式,并给出泥沙起动切应力的实测数据,选择窦国 仁公式、原始 Shields 曲线与本研究公式进行对比。图 7 对 比结果表明,原始 Shields 曲线不能够用于粘性显著的细颗 粒泥沙起动条件的判别,本研究基于边界层理论提出的修 正 Shields 曲线与实测资料及前人的研究结果均吻合较好, 可用于粗细颗粒泥沙起动临界条件的计算。





4 边界层视角下(修正)Shields 曲线

在边界层视角下,泥沙颗粒周围水体存在层流、过渡区及紊流流态,Shields曲线事实上表征了泥沙起 动切应力与颗粒周围的绕流流态的关系,同一颗泥沙,不同绕流状态下起动切应力不同,将从两个方面来 阐述。

层流条件下,由于沙粒雷诺数不再表征粒径与近壁层流厚度比值的概念,不再受到流区界限的限制,因此按照理论推证出的线型可以将其延伸,即得到完整的层流 Shields 曲线(图 5)。延伸后的层流 Shields 曲线 与紊流 Shields 曲线相比较,在 Re_{*z} <1 时层流曲线与紊流情形重合,1≤Re_{*z} <35 时层流曲线位于紊流之上, Re_{*z} ≥35 层流曲线位于紊流之下。在使用时应当依据泥沙起动时的周围水体绕流状态来选取合适的曲线,因 为即使针对同一颗泥沙,同一种流体,不同的动力条件可能导致泥沙在不同绕流状态下起动。比如,粒径为 0.2 mm 的泥沙在单向流和振荡流下起动时颗粒周围绕流分别处于紊流和层流状态^[17]。图 8 给出了按照图 5 改写的不同粒径的泥沙层流和紊流情形下起动切应力,易知,针对同一颗泥沙,若泥沙起动时处于不同的绕 流状态,则其起动切应力不同。

通过一组特殊实验亦容易说明此问题。针对同一种泥沙,开展一系列不同流体(密度相同,粘滞系数不同)条件下的泥沙起动实验,通过调整流体粘滞系数使得泥沙起动时处于不同的绕流状态。若假定泥沙起动







切应力在任何情形均保持不变,则 Shields 参数保持不变, 上述系列实验结果绘于 Shields 曲线图中呈现为水平直线, 显然与现有的 Shields 曲线的线型相矛盾,说明假定不成 立,不同绕流状态,将导致起动切应力的不同。

因此,在边界层的视角下,针对某一粒径泥沙, Shields曲线事实上表征了起动切应力与沙粒周围绕流状态的关系,在应用时应特别注意边界层流态对应关系。 至此上述已经理论推证出 Shields曲线各个流区的线型, 考虑粘性修正了 Shields曲线,并从边界层的角度阐述了 Shields曲线的意义,为 Shields曲线推广至波浪及波流情 形奠定了理论基础。

5 结 论

(1) Shields 曲线理论推导中,在光滑紊流区,引入 爱因斯坦公式不再恰当;现有的 Shields 曲线是通过实测数据经验拟合获得,各个流区的线型缺乏理论推证; 同时 Shields 曲线力学基础建立在无粘性沙之上,针对粘结力显著的细颗粒泥沙不再适用。

(2) 基于层流条件下流速分布及拖曳力、上举力系数与沙粒雷诺数的关系,推导出双对数坐标条件下 Shields 曲线在层流区的线型呈线性,且基于泥沙起动的实测资料,得出了层流条件下均匀床面拖曳力、上 举力系数表达式。

(3) 基于沙莫夫泥沙起动流速公式推导出 Shields 参数事实上为阻力系数的一种表征形式;结合边界层 阻力系数规律,推证出 Shields 曲线过渡区线型应当与阻力系数线型相一致,呈马鞍型。

(4)考虑粘结力修正后的 Shields 曲线与原始 Shields 曲线保持相同,适用于无粘性及粘性泥沙,修正 Shields 曲线的表达式与实测资料吻合较好。

(5)边界层的视角下,Shields曲线事实上表征了泥沙起动切应力与颗粒周围的绕流流态的关系,同一颗泥沙,不同绕流流态下起动切应力不同,在使用Shields曲线时应注意边界层的一一对应。

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. (CHIEN Ning, WAN Zhaohui. Mechanics of sediment transport
 [M]. Beijing: Science Press, 1983. (in Chinese))
- [2] SHIELDS A. Anwendung der aechlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung auf die geschiebewegung [R]. Berlin: Mitteilung 26, Preussische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, 1936.
- [3] 李文萍,曹叔尤,刘兴年. 泥沙颗粒形状对非均匀沙起动条件的影响[J]. 水科学进展, 2007, 18(3): 342-345. (LI Wenping, CAO Shuyou, LIU Xingnian. Effect of grain shape on incipient motion of non-uniform sediment [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(3): 342-345. (in Chinese))
- [4] 马爱兴, 陆彦, 陆永军, 等. 明渠非恒定流流速分布及推移质运动研究进展[J]. 水科学进展, 2012, 23(1): 134-142. (MA Aixing, LU Yan, LU Yongjun, et al. Advances in research on velocity distribution and bed load transport in unsteady open-channel flow [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(1): 134-142. (in Chinese))
- [5] 洪大林, 缪国斌, 邓东升, 等. 粘性原状土起动切应力与物理力学指标的关系[J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 774-779.
 (HONG Dalin, MIAO Guobin, DENG Dongsheng, et al. Relation of starting shear stress and physical and mechanical indexes of cohesive undisturbed soil [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(6): 774-779. (in Chinese))
- [6] 庞启秀,白玉川,杨华,等. 淤泥质浅滩泥沙临界起动切应力剖面的确定[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 249-255. (PANG Qixiu, BAI Yuchuan, YANG Hua, et al. Critical stress profile for incipient sediment motion on muddy shoals [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 249-255. (in Chinese))
- [7] SHAMOV G I. Fluvial Sediments [M]. Leningrod: Gidrometeo Izdat, 1959. (in Russian)
- [8] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究, 1999(6): 1-9. (DOU Guoren. Further study on sediment incipient velocity[J]. Journal of Sediment Research, 1999(6): 1-9. (in Chinese))
- [9] EINSTEIN H A. The bed load function in open channel flows [R]. Washington: Technical Bulletin No. 1026, United States Department of Agriculture, 1950.
- [10] WHITE S J. Plain bed thresholds for fine grained sediments [J]. Nature, 1970, 228(5267): 152-153.
- [11] MANTZ P A. Incipient transport of fine grains and flakes by fluids-extended Shields diagram [J]. Journal of Hydraulic Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1977, 103(HY6): 601-616.
- [12] YALIN M S, ARAHAN E K. Inception of sediment transport [J]. Journal of Hydraulic Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1979, 105(HY11): 1433-1443.
- [13] GONCHAROV V N. Basic river dynamic [M]. Leningrad: Hydro-Meteorological Press, 1962. (in Russian)

- [14] 张瑞瑾,谢鉴衡,陈文彪. 河流动力学[M]. 北京:中国工业出版社, 1961. (ZHANG Ruijin, XIE Jianheng, CHEN Wenbiao. River dynamics [M]. Beijing: China Industry Press, 1961. (in Chinese))
- [15] 窦国仁. 论泥沙起动流速[J]. 水利学报, 1960(4): 44-60. (DOU Guoren. Averaged velocity for sediment incipient motion
 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1960(4): 44-60. (in Chinese))
- [16] 唐存本. 泥沙起动的规律[J]. 水利学报, 1963(2): 1-12. (TANG Cunben. Averaged velocity for sediment incipient motion
 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1963(2): 1-12. (in Chinese))
- [17] KOMAR P D, MILLER M C. Sediment threshold under oscillatory waves [C]// Proceeding of the14th Conference on Coastal Engineering. Copenhagen: ASCE, 1974 (II):756-775.

Incipient sediment motion in steady boundary layers *

LI Shouqian, LU Yongjun, ZUO Liqin, HUANG Weihao, LU Yan

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering Science, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The Shields curve is often used to judge the criterion for incipient sediment motion. The curve for all the flow regimes is derived on the basis of the boundary layer theory. The Shields parameter and curve are modified in order to take into account the effect of viscosity. The modified curve is then re-explained from the viewpoint of boundary layer. Results show that the curve's shape exhibits a linear distribution in the smooth turbulent and laminar regime. In the transition regime, the curve is similar to that representing the friction law for steady flow, and finally becomes a horizontal curve in the rough turbulent regime. The modified Shields curve keeps the consistent shape with the original one. The modified curve is applicable to predict the incipient motion of both fine and coarse sediment particles. The prediction agrees well with measured data. In fact, the Shields curve represents the relationship between the threshold bed shear stress and the flow status around the particle. The threshold bed shear stress of one particle is different under different flow regime conditions.

Key words: steady flow, boundary layer, sediment incipient motion, Shields curve

^{*} The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (No. 2012CB417002) and the National Natural Science Foundation of China (No. 51061130546).