

河底和岸壁水流剪切应力“标准断面”法^{*}

罗 优¹, 朱森林¹, 曹 兵², 蒋陈娟¹

(1. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009;
2. 东营市水务局, 山东 东营 257091)

摘要: 零剪切应力分割线法和分割线表观剪切应力法是计算河底和河岸水流剪切应力的两种常用方法。为简化分割线表观剪切应力经验表达式,提出了“动量传输-平衡偏离”(momentum transfer-equilibrium deviation, MTED)假设,认为表观剪切应力可由分割线一侧单位时间动量传输与其平衡值的差值来表示。为了确定平衡值,提出了标准断面的概念,所有矩形或者梯形断面都有对应的标准断面。基于 MTED 假设和标准断面的概念,建立了分割线表观剪切力以及河底和河岸剪切力占总剪切力比重的计算表达式。利用不同实验的 200 多个数据对不同的计算方法进行了对比分析,结果表明:该方法有效改善了计算精度,适用范围广,适用于矩形和梯形断面,以及河岸与河底糙率相同或不同的情况。

关键词: 表观剪切应力; 水流分区; 河底阻力; 河岸阻力; 动量传输; 糙率

中图分类号: O368; TV143 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.420048

A “Standard Cross-Section” Method for the Calculation of Riverbed and Bank Shear Stresses

LUO You¹, ZHU Senlin¹, CAO Bing², JIANG Chenjuan¹

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University,
Yangzhou, Jiangsu 225009, P.R.China;

2. Dongying Water Administration, Dongying, Shandong 257091, P.R.China)

Abstract: Seeking for the “zero shear stress dividing line” and quantifying the apparent shear stress at the interface between adjacent sub-regions are 2 main methods to calculate the riverbed and bank shear stresses. To simplify the empirical expression for apparent shear stresses along the dividing line, a “momentum transfer-equilibrium deviation” (MTED) assumption that the apparent shear stress can be calculated based on the deviation of momentum transportation from its equilibrium value, was proposed. A “standard cross-section” concept was applied to determine the equilibrium value. All the rectangular and trapezoidal cross-sections can be correlated with certain standard cross-sections. Based on the MTED assumption and the concept of standard cross-sections, the empirical expressions for the apparent shear stresses along the dividing line and the bed and bank boundary shear stresses, were established. More than 200 data from different lab experiments were used to verify different methods. The results show that, the proposed method improves the calculation accuracy and can be applied to both rectangular and trapezoidal cross-sections, as well as to both smooth and rough channels.

* 收稿日期: 2021-02-22; 修订日期: 2021-06-25

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(41806104)

作者简介: 罗优(1985—),男,讲师,博士(通讯作者。E-mail: luoyou@yzu.edu.cn)。

引用格式: 罗优,朱森林,曹兵,蒋陈娟. 河底和岸壁水流剪切应力“标准断面”法[J]. 应用数学和力学, 2021, 42(9): 915-923.

Key words: apparent shear stress; flow partitioning; riverbed resistance; river bank resistance; momentum transfer; roughness

引 言

在研究泥沙输运、河道迁移、环境负荷和湿地设计时,河道边界水流剪切应力的合理预估非常重要.河道边界剪切应力的分布,与河道横断面的形状、边界糙率分布以及 Froude 数 Fr 和 Reynolds 数 Re 等水力参数密切相关^[1-2],准确计算河道边界剪切应力具有较大挑战.

河道边界水流剪切应力的计算方法可分为四类:几何方法、实验数据回归分析法、湍流模型法和理论分析法.目前复杂的湍流模型需要引入较多的经验系数,但也不能保证获得比其他方法更准确的结果,对于工程设计而言也不经济^[3-4].几何方法一般不考虑其内在的物理机制,而且不适用于河岸和河底非均匀糙率的情况,例如混合垂直法(MPM)和湿周正交法(NDM)^[5].

实验数据回归分析法主要是基于对实验数据的回归分析建立经验表达式.在 20 世纪 80 至 90 年代,英国和其他欧洲国家开展了一系列系统性的单一河槽和复式河槽的水槽实验.Knight 等^[6]基于回归分析方法,给出了光滑矩形水槽边壁剪切力占总剪切力百分比的经验表达式.Flintham、Carling^[7]和 Yuen^[2]将 Knight 等的方法扩展到了研究梯形断面和非均匀糙率断面.近年来,实验数据分析新技术开始用于河道边界水流剪切应力的计算,例如, Khozani 等^[8]和 Martinez-Vazquez、Sharifi^[9]分别使用人工神经网络遗传算法和人脸识别技术预测了河道剪切应力分布.

理论分析方法起源于断面分区以简化复杂流动计算的思想.Leighly^[10]提出了横断面等流速线正交分割方法,但是分割线很难通过解析方法确定.Keulegan^[11]使用等分法将流动区域分为两个岸壁区和河床区,这种方法忽略了不均匀糙率和宽深比的影响.Einstein^[12]提出了分区等流速的假设,但是没有提供具体的分割方法,此方法也并没有考虑宽深比变化带来的影响.Yang 和 Lim 等^[13]认为 Einstein 划分思想暗示河道断面分区可能与剩余能量运输有关,并提出了“能量传输最小相对距离”的假设,用于确定零剪切应力分割线.零剪切应力分割线法已经被用来研究矩形和梯形明渠流动的岸壁和河床剪切应力^[13-15].尽管有证据表明存在零剪切应力的分割线,但在不同宽深比条件下二次流对零剪切应力分割线的影响仍不清楚^[16-17].对于粗糙边界,Yang 等^[18]使用粗糙高度作为特征长度确定零剪切应力分割线的做法,目前也并没有得到实验数据的验证.二次流和紊动剪切力是构成分割线上表观剪切应力的两个主要部分^[19].Guo 和 Julien^[20]使用两个综合的经验参数来计算分割线上表观剪切应力和光滑矩形边壁和河床剪切力.Kabiri-Samani 等^[21]和 Javid 等^[22]将 Guo 和 Julien 的方法扩展至梯形断面.此方法在光滑河槽计算精度较好,但目前还无法应用于粗糙河槽.

到目前为止,由于宽深比和非均匀糙率的影响,使得“零剪切应力”分割线很难准确确定,分割线上二次流和紊动引起的表观剪切应力也无法分开精确计算,非均匀糙率的影响使得分开计算更为复杂.采用综合的经验表达式计算表观剪切力是另一种切实可行的办法,在复式河道研究中已建立了不少滩槽垂向分割线表观剪切应力的经验表达式,这些表达式以相邻子区域间的流速差作为核心,以几何参数和水力参数作为系数^[23-26].然而,不同经验表达式中系数不同,几何参数和水力参数的选取仍有较大的主观性.

为避免盲目选择参数建立表观剪切应力经验表达式,本文提出了“动量传输-平衡偏离”(MTED)假设和“标准断面”的概念,建立了分割线表观剪切力、河床和岸壁剪切力占总剪切力比重的经验表达式,并利用实验数据对经验表达式进行了校验.

1 MTED 假设

既然目前无法分开精确计算二次流和紊动带来的表观剪切应力,那么采用经验表达式综合计算表观剪切应力就是另一种切实可行的办法.在复式河道研究中建立了不少滩槽分割线表观剪切应力的经验关系式,系数中几何参数与水力参数较多,且参数选择具有较大的主观性.本文为避免参数选择的任意性,提出 MTED 假设.图 1 是半个矩形断面示意图,分割线将半个断面划分为岸壁区和河床区.河床区由分割线、河底、水面线和中心线包围,各边界的剪切应力或者动量传输情况不同:由于对称性,中心线处的剪切应力为 0;

水面处剪切应力可以忽略; 分割线处动量传输包括由岸壁区向河床区单位时间 Δt 传输的方向指向下游的动量 M_w , 以及由河床区向岸壁区单位时间 Δt 传输的方向指向下游的动量 M_b ; 河床底部剪切应力为 τ_{bb} . 因此, 河床区受力平衡为

$$\gamma \frac{A_b}{2} S = \tau_{bb} \frac{P_b}{2} + \frac{M_b}{\Delta t} - \frac{M_w}{\Delta t}, \quad (1)$$

式中 γ, A, S, τ_b 和 P 分别表示单位水体重度、断面面积、水力坡度、边界剪切应力和湿周; 下标 w 和 b 代表岸壁区和河床区.

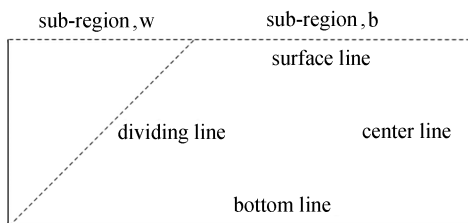


图 1 半个矩形断面示意图

Fig. 1 The schematic map showing the half of the rectangular cross-section

由方程(1)可知分割线表观剪切力为

$$\tau_a l_{wb} = M_b / \Delta t - M_w / \Delta t, \quad (2)$$

式中 τ_a 为分割线平均表观剪切应力, l_{wb} 为分割线长度.

根据 Darcy-Weisbach 方程易得

$$\tau_{bb} \frac{P_b}{2} = \frac{\rho}{8} \frac{P_b}{2} f_b u^2, \quad (3)$$

式中 ρ, u 和 f 分别表示水体密度、断面平均流速和 Darcy-Weisbach 阻力系数.

动量传输与紊动切应力、二次流有关, 而岸壁与河床交汇区二次流是由紊动切应力不均衡引起^[27], 因此本文假设动量传输与紊动切应力成比例. 紊动强度可参考 Nezu^[28] 提出的经验表达式:

$$\sqrt{u_i'^2} / u_* = D_{u_i} \exp\left(-\lambda_{u_i} \frac{y}{h}\right), \quad (4)$$

式中 u_* 表示摩阻流速; i 代表三个不同方向, x, y 和 z ; D_{u_i} 和 λ_{u_i} 是经验参数.

参考方程(4), 紊动切应力可表示为摩阻流速的函数:

$$\tau'_{yx} = -\rho \overline{u'_x u'_y} = \phi \rho u_*^2, \quad (5)$$

式中 ϕ 为比例系数.

结合方程(4)和(5), 可假设单位时间动量传输为

$$M_b / \Delta t = \frac{\rho L}{8} f_b u_b^2, \quad (6)$$

式中 L 代表特征长度, 此特征长度与分割线选取有关, 比如, 当分割线为水面时, $L = 0$, 当分割线位置不变、断面边界条件不变时, L 的值将保持不变; u_b 是河床区流速, 由河床区边界糙率和水力半径计算得到.

假设在某平衡状态下河床区与岸壁区之间的动量交换 $M_w = M_{be}$, 在该平衡状态下:

$$\gamma \frac{A_b}{2} S_e = \frac{\rho}{8} \frac{P_b}{2} f_{be} u_{be}^2 + \frac{M_{be}}{\Delta t} - \frac{M_w}{\Delta t}, \quad (7)$$

式中下标 e 代表平衡状态.

利用式(7)中的假设将方程(2)中的 M_w 替换为 M_{be} , 结合式(6)并考虑到平衡状态时 L 的值与实际状态时一致, 可得分割线表观剪切力的表达式为

$$\tau_a l_{wb} = \frac{\rho L}{8} (f_b u_b^2 - f_{be} u_{be}^2). \quad (8)$$

将式(3)和(8)代入式(1),并引入河床区面积占总面积的比重 $a_b = A_b/A$, 可得分割线表观剪切力占总剪切力的比重:

$$F_a = \frac{\tau_a l_{wb}}{\gamma AS} = \frac{a_b}{2} \frac{\frac{\rho L}{8}(f_b u_b^2 - f_{be} u_{be}^2)}{\frac{\rho}{8} \frac{P_b}{2} f_b u^2 + \frac{\rho L}{8}(f_b u_b^2 - f_{be} u_{be}^2)} = \varphi_b a_b V_{be}, \quad (9)$$

式中 φ_b 和 V_{be} 的表达式分别为

$$V_{be} = 1 - \frac{f_{be}}{f_b} \left(\frac{u_{be}}{u_b} \right)^2,$$

$$\varphi_b = \frac{L/P_b}{(u/u_b)^2 + LV_{be}/(P_b/2)},$$

V_{be} 是反映实际状态偏离平衡参考状态程度的参数,当造成河床区流速与平衡流速偏离的原因是水力半径不同时,基于 Darcy-Weisbach 方程可得到

$$V_{be} = 1 - R_{be}/R_b. \quad (10)$$

当合理选择分割线使得分割线处平均表观剪切应力较小时, $u/u_b \approx 1$, 此时系数 φ_b 主要为特征长度 L 的函数,可以根据实验数据进行确定.在 F_a 确定后,岸壁剪切力和河床剪切力占总剪切力的比重为

$$\begin{cases} F_w = a_w + 2F_a, \\ F_b = a_b - 2F_a. \end{cases} \quad (11)$$

在 F_w 和 F_b 确定后,岸壁和河床平均水流剪切应力就可以确定.基于 MTED 假设建立的表观剪力经验方程(8)与原有的复式河道滩槽垂直分割线表观剪力经验表达式有两点不同: 1) 原有经验表达式大多是基于动量传输理论^[29-31]或者能量概念^[32-33],利用的是相邻子区域间的流速差,而方程(8)利用的是相同子区域流速与参考流速的差异; 2) 原有经验表达式中的流速为实际流速,而方程(8)使用的是子区域单独计算的流速.利用两个子区域实际流速差描述分割线表观剪切应力时,蕴含着相邻两子区域平均流速相等则分割线表观剪切力为0的假设,这种假设不一定对所有情况合理.而式(8)并没有这样的假设,只是借助了平衡参考流速这样一个概念,利用子区域单独计算的流速对平衡参考流速的偏离来计算分割线表观剪切力.对于流速偏离平衡参考值带来的两个子区域间水体的相互作用及其对分割线表观剪切力计算的影响,则可通过式中特征长度 L 或式(9)中系数 φ_b 来反映.

2 标准断面的概念及表观剪切应力的经验表达式

基于 MTED 假设建立的表观剪切应力经验表达式中涉及平衡状态下的参考流速,因此,在计算时需要确定平衡状态.如图2所示,假定存在一个标准断面,两条零剪切力分割线从水面一点连接到两个底角端点,所有断面都有对应的标准断面,并可由标准断面通过垂向或者水平向拉伸获得.本文用下标0代表标准断面: H_0, A_0, P_{w0} 和 P_{b0} 分别代表标准断面水深、断面面积、岸壁部分湿周和河床部分湿周;河床区和岸壁区的水力半径分别为 $H_0/2$ 和 $H_0 k_0/2$; θ_0 是分割线与河床底的交角,由岸壁与河床区水力半径比例 k_0 确定.

对于光滑的或者均匀糙率的标准断面, Yang-Lim 方法、Keulegan 方法和 Einstein 方法是一致的,即 $k_0 = 1$; 对于岸壁与河床糙率不一致的标准断面,这三种方法 k_0 值并不相同,具体见式(12)^[11-12,18]:

$$k_0 = \begin{cases} k_{sw}/k_{sb}, & \text{Yang-Lim method,} \\ f_{w0}/f_{b0}, & \text{Einstein method,} \\ 1, & \text{Keulegan method,} \end{cases} \quad (12)$$

式中 k_{sw} 和 k_{sb} 分别表示河岸和河床 Nikuradse 当量粗糙高度.

Keulegan 等分方法并不适合非均匀糙率断面; Einstein 方法中的子区域等流速假设与宽深比较大时岸壁区流速小于主流区的实际情况不符合; Yang-Lim 方法提出的以边界粗糙高度作为特征长度确定分割线的做法并没有得到实验数据的验证.本文参考 Einstein 方法,假设标准断面零剪切力分割线 k_0 与阻力系数有关:

$$k_0 = (f_{w0}/f_{b0})^\omega, \tag{13}$$

式中 ω 为经验参数,由实验数据确定.采用适用范围涵盖水力光滑区到粗糙区的 Einstein 公式^[34] 计算标准断面 Darcy-Weisbach 阻力系数 f_{w0} 和 f_{b0} , 公式中调整系数由 Silva 和 Bolisetti^[35] 提出的方法确定,计算时水力半径统一取 $H/2$.

当 $k_0 - \cos \theta > 0$ 时,标准断面的宽深比为

$$P_{b0}/P_{w0} = k_0 - \cos \theta; \tag{14}$$

当 $k_0 - \cos \theta \leq 0$ 时, $\theta_0 \geq \pi/2$, 岸壁区面积比重往往较小,此时认为分割线表观剪切应力为 0.对于水平拉伸断面,河床区水力半径大于标准断面,河床区流速 $u_b > u_{b0}$; 对于垂向拉伸断面,岸壁区水力半径大于标准断面,岸壁区流速 $u_w > u_{w0}$.参照方程(9)和(10),以标准断面为参考,可得分割线处表观剪切力占总剪切力的比重为

$$F_a = \begin{cases} 0, & k_0 - \cos \theta \leq 0, \\ \varphi_b a_b (1 - 0.5H_0/R_b), & P_b/P_w \geq k_0 - \cos \theta > 0, \\ -\varphi_w a_w (1 - 0.5H_0k_0/R_w), & P_b/P_w < k_0 - \cos \theta, \end{cases} \tag{15}$$

式中 R_b 和 R_w 分别代表河床区和岸壁区水力半径.

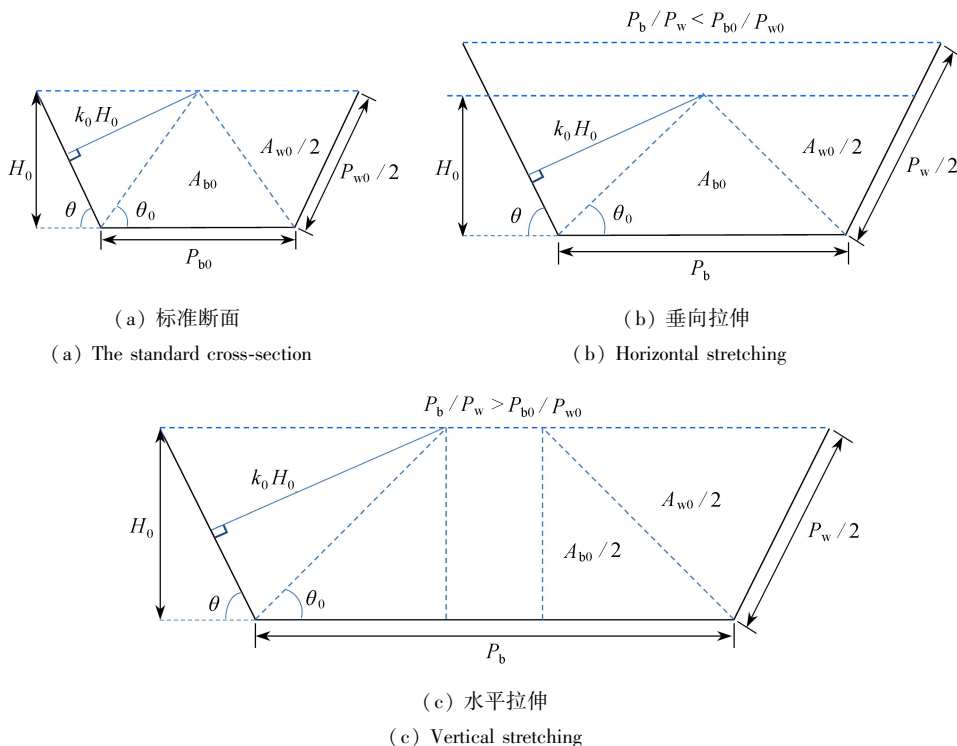


图 2 标准断面及其水平和垂向扩展

Fig. 2 The standard cross-section and its vertical and horizontal stretchings

3 经验系数的确定和不同方法的对比

对于光滑水槽, $k_0 = 1$, 方程(15)只有 φ_b 或 φ_w 一个经验系数,因而可以通过光滑或者均匀糙率水槽试验数据确定;在确定 φ_b 和 φ_w 后,利用非均匀糙率水槽实验数据得到 k_0 表达式中 ω 的经验值.本文中使用的平滑或均匀糙率水槽实验数据包括矩形断面数据(S90)^[6, 36]、 $\theta = 45^\circ$ 梯形断面数据(S45)^[2, 37] 和 $\theta = 68^\circ$ 梯形数据(S68)^[7];使用的粗糙水槽实验数据包括矩形断面数据(R90)^[38-40]、 $\theta = 68^\circ$ 梯形断面数据(R68)^[7] 和 $\theta = 45^\circ$ 梯形断面数据(R45)^[41].

由实验数据确定 $k_0 = (f_{w0}/f_{b0})^{0.55}$, $\varphi_b = 0.5a_w$ 和 $\varphi_w = 0.6a_b$, 代入经验系数后,可得岸壁剪切力比重的表达式为

$$F_w = \begin{cases} a_w, & k_0 - \cos \theta \leq 0, \\ 2a_w - a_w^2 [1 + P_b / (P_w k_0)], & P_b / P_w \geq k_0 - \cos \theta > 0, \\ 1 - 2.2a_b + 1.2a_b^2 [1 + k_0 P_w / P_b], & P_b / P_w < k_0 - \cos \theta. \end{cases} \quad (16)$$

当 $P_b / P_w \geq k_0 - \cos \theta$ 时,对于规则的矩形和梯形断面, a_w 的表达式为

$$a_w = \frac{k_0}{2P_b / P_w + \cos \theta};$$

当 $P_b / P_w < k_0 - \cos \theta$ 时,对于规则的矩形和梯形断面, a_b 的表达式为

$$a_b = \frac{(P_b / P_w)^2}{2P_b / P_w + \cos \theta} \frac{1}{k_0 - \cos \theta}.$$

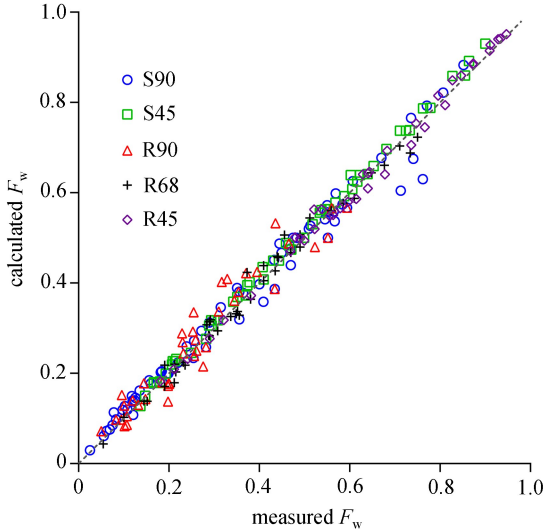


图3 计算结果与实验数据对比

Fig. 3 Comparison between the calculated results and measured data

计算结果与实测数据对比见图3。

目前只有少数几种方法能够用于河床与河岸糙率不同的情况,其中, Yang-Lim 方法和 Flintham-Carling 方法引入相对粗糙高度 k_{sw} / k_{sb} 描述非均匀糙率的影响,但 Yang-Lim 方法并没有给出基于相对粗糙度的经验表达式^[7, 15]; Einstein 方法是基于子区域流速相等的假设,适用于光滑和粗糙河槽,式(17)和(18)建立了两个反映计算精度的参数 P_ε 和 E_N , 其中 P_ε 为误差绝对值小于 ε 数据数量占数据总量的百分比, E_N 代表相对误差的平均值.表1统计了本文方法、Flintham-Carling 方法和 Einstein 方法在不同工况的计算精度.结果表明:本文提出的方法计算精度最高,绝对误差小于 0.03 和 0.06 的比重分别为 84.2%和 96.5%,所有工况平均相对误差绝对值 $|E_N| \leq 5.5\%$. R90 实验水槽岸壁光滑、当量粗糙度为 0.001 5 mm,相对粗糙度 $1 \leq k_{sb} / k_{sw} \leq 10^4$, 相对粗糙度变幅较大,这可能是 Flintham-Carling 方法对于 R90 的计算结果误差大的原因.Einstein 方法计算结果存在系统性偏差,所有工况 $E_N = 9.3\%$, 岸壁区剪切力比重偏大.

$$P_\varepsilon = P(|F_{wc} - F_{wm}| \leq \varepsilon), \quad (17)$$

$$E_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{F_{wci} - F_{wmi}}{F_{wmi}} \right) \times 100\%, \quad (18)$$

式中 N 表示特定工况下的数据总数,下标中加 c 和 m 分别代表计算值和实验值。

表1 不同方法计算精度统计参数对比

Table 1 The comparison of calculated accuracies of different methods

case	proposed method			Einstein method			Flintham-Carling method		
	$P_{0.03} / \%$	$P_{0.06} / \%$	$E_N / \%$	$P_{0.03} / \%$	$P_{0.06} / \%$	$E_N / \%$	$P_{0.03} / \%$	$P_{0.06} / \%$	$E_N / \%$
case S90(69 values)	79.7	95.7	5.5	49.3	95.7	15.6	84.1	94.2	0.8
case S45(56 values)	96.4	100	3.0	32.1	85.7	12.3	66.1	100	5.9
case S68(15 values)	93.3	100	-2.3	80	100	3	93.3	100	-1.6
all smooth cases	87.9	97.9	3.7	45.7	92.1	12.9	77.9	97.1	1.8
case R90(50 values)	63.4	85.4	5.5	51.2	90.2	7.2	9.8	19.5	-54.7
case R45(38 values)	89.5	100	0.2	52.6	97.4	5.2	68.4	97.4	0.2
case R68(41 values)	87.8	100	-1	90.2	100	2.7	92.7	100	0.1
all rough cases	80	95	1.5	65	95.8	5	56.7	71.7	-18.7
all cases	84.2	96.5	1.6	54.6	93.8	9.3	68.1	85.4	-7.6

目前已有多种方法能够用于计算光滑矩形水槽岸壁和河床剪切应力,其中有些方法可以扩展到梯形断

面^[5]。这些方法包括基于最小能量输运距离假设的 Yang-Lim 方法和将 Guo-Julien 方法扩展到梯形断面的 Javid-Mohammadi 方法^[22]。从图 4 可以看出,除 Einstein 方法和 Yang-Lim 方法外,其他三种方法对 S90 和 S68 河床相对剪切应力 $\tau_b/(\gamma HS)$ 的计算结果与实验数据基本一致;Yang-Lim 方法对 S68 的计算结果在 $B/H > 3$ 时偏大;Einstein 方法对 S90 和 S68 的计算结果在 $B/H > 5$ 时偏小。

随着相对粗糙度 K_{sb}/K_{sw} 的不断增大,岸壁剪切力占比逐渐减小,本文方法和 Einstein 方法计算结果都反映出与实验结果相近的趋势(图 5)。当 $B/H \leq 3$ 时,两种方法计算结果相近;当 $B/H \geq 5$ 时, $K_{sb}/K_{sw} < 9\ 000$ 时,本文方法计算结果小于 Einstein 方法。结合表 1、图 4 和图 5 可以看出,本文方法克服了宽深比较大时 Einstein 方法分区流速相等假设的局限性。

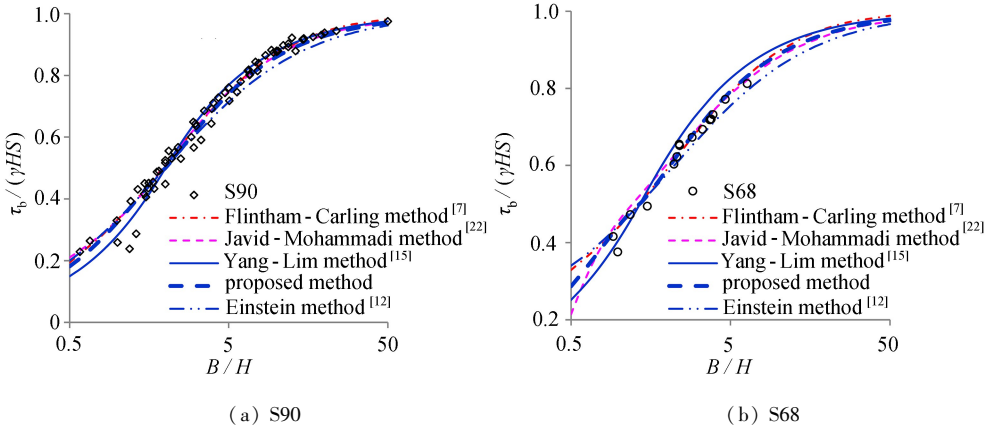


图 4 光滑断面河床相对剪切应力 $\tau_b/(\gamma HS)$ 计算结果与实验数据对比

Fig. 4 Comparison of $\tau_b/(\gamma HS)$ between calculated results and measured data for smooth cases

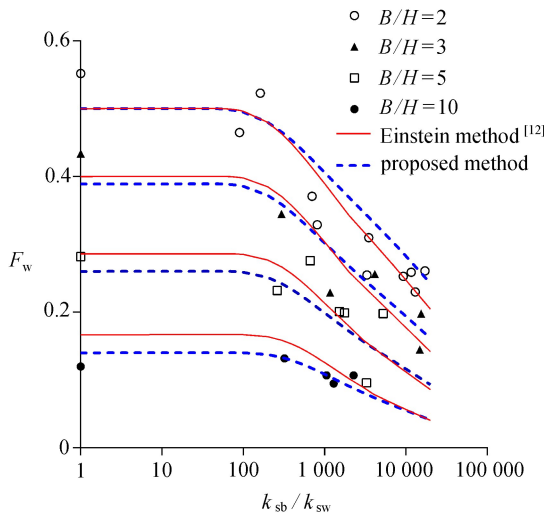


图 5 不同相对粗糙度条件下两种计算方法的对比

Fig. 5 Comparison of 2 different methods with different relative roughnesses

4 结 论

本文基于 MTED 假设和标准断面的概念建立了分割线表观剪切力和岸壁水流剪切力占总剪切力比重的经验公式,可用于岸壁和河床平均水流剪切应力的估算。

1) 本文的经验公式中表观剪切应力计算与已有经验表达式不同,采用的是相同子区域计算流速与参考流速的差异,而不是相邻区域流速差,且流速是子区域单独计算的,没有考虑相邻子区域的相互作用。

2) 标准断面中零表观剪切力分割线由 k_0 确定,通过实验数据验证确定 $k_0 = (f_{w0}/f_{b0})^{0.55}$,这与 Einstein 等流速假设 ($k_0 = f_{w0}/f_{b0}$) 略有不同。采用相对粗糙度反映非均匀糙率的影响或者确定 k_0 ,可能会带来较大

误差。

3) 本文方法克服了 Einstein 方法在较大宽深比时岸壁剪切力比重偏大、河床相对剪切应力偏小的局限性,适用范围更广,且计算精度良好。

致谢 本文作者衷心感谢美国克拉克森大学吴伟明教授对本论文提出的宝贵意见和建议。

参考文献(References):

- [1] RAJARATNAM N, MURALIDHAR D. Boundary shear stress distribution in rectangular open channels[J]. *La Houille Blanche*, 1969, **1**(6): 603-610.
- [2] YUEN K W H. A study of boundary shear stress, flow resistance and momentum transfer in open channels with simple and compound trapezoidal cross sections[D]. PhD Thesis. Birmingham: University of Birmingham, 1989.
- [3] CACQUERAY N D, HARAGREAVES D M, MORVAN H P. A computational study of shear stress in smooth rectangular channels[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2009, **47**(1): 50-57.
- [4] ANSARI K, MORVAN H P, HARGREAVES D M. Numerical investigation into secondary currents and wall shear in trapezoidal channels[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, **137**(4): 432-440.
- [5] KHODASHENAS S R, ABDERREZZAK K E K, PAQUIER A. Boundary shear stress in open channel flow: a comparison among six methods[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2008, **46**(5): 598-609.
- [6] KNIGHT D W, DEMETRIOU J D, HAMED M E. Boundary shear in smooth rectangular channels[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1984, **110**(4): 405-422.
- [7] FLINTHAM T, CARLING P. The prediction of mean bed and wall boundary shear in uniform and compositely rough channels[C]//*International Conference on River Regime, Hydraulics Research Limited*. Wallingford, Oxon, UK, 1988.
- [8] KHOZANI Z S, BONAKDARI H, ZAJI A H. Using two soft computing methods to predict wall and bed shear stress in smooth rectangular channels[J]. *Applied Water Science*, 2017, **7**(7): 3973-3983.
- [9] MARTINEZ-VAZQUEZ P, SHARIFI S. Modelling boundary shear stress distribution in open channels using a face recognition technique[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2017, **19**(2): 157-172.
- [10] LEIGHTLY J B. Toward a theory of the morphologic significance of turbulence in the flow of water in streams [J]. *Progress in Physical Geography*, 1932, **6**(1): 1-22.
- [11] KEULEGAN G H. Laws of turbulent flow in open channels[J]. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1938, **21**: 708-741.
- [12] EINSTEIN H A. Formulas for the transportation of bed load[J]. *Transactions of ASCE*, 1942, **107**(1): 561-597.
- [13] YANG S Q, LIM S Y, GUO J. Mechanism of energy transportation and turbulent flow in a 3D channel[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, **125**(3): 684-692.
- [14] YANG S Q, LIM S Y. Boundary shear stresses distributions in smooth rectangular open channel flows[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Maritime and Energy*, 1998, **130**(3): 163-173.
- [15] YANG S Q, LIM S Y. Boundary shear stress distributions in trapezoidal channels[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2005, **43**(1): 98-102.
- [16] HAN Y, YANG S Q, DHARMASIRI N, et al. Experimental study of smooth channel flow division based on velocity distribution[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, **141**(4): 06014025.
- [17] HAN Y, YANG S Q, SIVAKUMAR M, et al. Flow partitioning in rectangular open channel flow[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, **2018**: 6491501.
- [18] YANG S Q, YU J X, WANG Y Z. Estimation of diffusion coefficients, lateral shear stress, and velocity in open channels with complex geometry[J]. *Water Resource Research*, 2004, **40**(5): W05202. DOI: 10.1029/2003WR002818.
- [19] SHIONO K, KNIGHT D W. Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, **222**: 617-646.

- [20] GUO J, JULIEN P Y. Shear stress in smooth rectangular open-channel flows[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, **131**(1): 30-37.
- [21] KABIRI-SAMANI A, FARSHI F, CHAMANI M R. Boundary shear stress in smooth trapezoidal open channel flows[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **139**(2): 205-212.
- [22] JAVID S, MOHAMMADI M. Boundary shear stress in a trapezoidal channel[J]. *International Journal of Engineering*, 2012, **25**(4): 323-332.
- [23] WORMLEATON P R, MERRETT D J. An improved method of calculation for steady uniform flow in prismatic main channel/flood plain sections[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1990, **28**(2): 157-174.
- [24] PRINOS P, TOWNSEND R D. Comparison of methods for predicting discharge in compound open channels [J]. *Advances in Water Resources*, 1984, **7**(4): 180-187.
- [25] MORETA P J, MARTIN-VIDE J P. Apparent friction coefficient in straight compound channels[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2010, **48**(2): 169-177.
- [26] CHEN Z, CHEN Q, JIANG L. Determination of apparent shear stress and its application in compound channels[J]. *Procedia Engineering*, 2016, **154**: 459-466.
- [27] BRUNDRETT E, BAINES W D. The production and diffusion of vorticity in duct flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1964, **19**: 375-394.
- [28] NEZU I. Turbulent structures in open-channel flows[D]. PhD Thesis. Japan: Kyoto University, 1977.
- [29] HUTHOFF F, ROOS P C, AUGUSTIJN D C, et al. Interacting divided channel method for compound channel flow[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, **134**(8): 1158-1165.
- [30] YANG K, LIU X, CAO S, et al. Stage-discharge prediction in compound channels[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, **140**(4): 06014001.
- [31] TANG X. A new apparent shear stress-based approach for predicting discharge in uniformly roughened straight compound channels[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2019, **65**: 280-287.
- [32] YANG Z, GAO W, HUAI W. Estimation of discharge in compound channels based on energy concept[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2012, **50**(1): 105-113.
- [33] TANG X. An improved method for predicting discharge of homogeneous compound channels based on energy concept[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2017, **57**: 57-63.
- [34] EINSTEIN H A. The bedload function for sediment transportation in open channel flows; 1026[R]. Technical Bulletin, 1950.
- [35] SILVA D A M F, BOLISSETTI T. A method for the formulation of Reynolds number functions[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2000, **27**(4): 829-833.
- [36] SECKIN G, SECKIN N, YURTAL R. Boundary shear stress analysis in smooth rectangular channels[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2006, **33**(3): 336-342.
- [37] GHOSH S N, ROY N. Boundary shear distribution in open channel flow[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1970, **96**(4): 967-994.
- [38] KNIGHT D W, MACDONALD J A. Hydraulic resistance of artificial strip roughness[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1979, **105**(6): 675-690.
- [39] KNIGHT D W, MACDONALD J A. Open channel flow with varying bed roughness[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1979, **105**(9): 1167-1183.
- [40] KNIGHT D W. Boundary shear in smooth and rough channels[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1981, **107**(7): 839-851.
- [41] ALHAMID A I. Boundary shear stress and velocity distribution in differentially roughened trapezoidal open channels[D]. PhD Thesis. Birmingham: University of Birmingham, 1991.