

卵石河槽的水流阻力

Richard D. Hey 著

两个多世纪来,关于明渠恒定均匀流的平均流速与水流阻力的关系,曾提出过各种不同的公式,其一般表达式为:

$$V = CR^x S^y \quad (1)$$

式中: V 为完全紊流的平均速度; R 为水力半径; S 为河槽坡度; C 为谢才系数; x, y 为指数。根据对这些公式的综合分析,明槽阻力系数专题研究组推荐采用达西—韦斯巴什(Darcy—Weisbach)公式:

$$f = \frac{8gRS}{V^2} \quad (2)$$

其中, f 表示达西—韦斯巴什阻力系数; g 表示重力加速度。上式不同于经验的曼宁型公式,因其因次明确,具有充分的理论根据,且相对糙度不影响水力半径和坡度^[15]的指数^[21]。

应用达西—韦斯巴什公式预测或估算通过河槽的平均流速,取决于如何确定冲积河槽中影响水流阻力的因素。对于定床河槽,这些因素有:表面阻力、内部变形及激流阻力^[13]。表面阻力取决于表面材料和植物的糙度。由弯道、分散的弧石或残留的河床形态所产生的漩涡和副流,则形成内部变形阻力。激流阻力是流体内部加速和减速所耗损的能量。在动床条件下,水流阻力^[23]随床面形态的发展而增加。尽管对一定的床面形态,它也可以因流体紊动的削弱而减小。

顺直卵石河槽的表面阻力,可能是影响水流阻力的主要因素,因为激流阻力只有局部作用^[22],而又不存在河床形态影响,却相应削弱了内部变形阻力的影响。加之输砂率往往很低,或者只影响暴露在床面上那部分极细的泥砂,因此可以假定河床是固定的。在这些情况下,水流阻力基本上取决于水流几何因素,粗糙度的横向变化,以及卵石床面各级沉积物的粗糙度。

本文评价了这些因素对顺直卵石河床上的均匀阻力的影响,并提出了一个估算水流阻力的标准方法。

固定边界河槽中的水流阻力

库莱根(Kenlegan)^[11]按确定垂直于表面的流速分布的普兰提尔—冯卡曼(Prandtl—Von Karman)定律,推导出固定边界的粗糙河槽中,均匀而完全紊动水流的平均流速公式:

$$\frac{V}{V_*} = E + \frac{1}{K} \ln\left(\frac{R}{D}\right) \quad (3)$$

其中, V 为平均流速, V_* 为平均剪切速度(\sqrt{gRS}); K 为冯卡曼紊动交换常数; E 为一系数; D 为表面粗糙高度(The roughness heights)。由此得出:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{E}{\sqrt{8}} + \frac{2.30}{K\sqrt{8}} \log\left(\frac{R}{D}\right) \quad (4)$$

或其通式

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = C \log\left(\frac{aR}{D}\right) \quad (5)$$

其中, a 为 $E_K/2.30$ 的对数; $C = 2.30/K\sqrt{8}$, 上式通称为科尔布鲁克-怀特 (Colebrook-White) 公式。

断面形状对水流阻力的影响

通常假定不论河槽的尺寸和形状如何^[8,11]水力半径皆能有效地度量河槽的水力特性。但试验证明(表1)情况并不如此; 因为公式(5)的系数 a 取决于河槽形状。这些数据还表明系数 C 值颇较保守, 如果假定象园管及无限宽明渠中一样, 冯卡曼常数 $K = 0.4$ 也适用于体现三元流的多边形河槽。那末, 系数 C 值可采用 2.03, 系数 a 则随因数 E 而变化。

不同河槽断面形状的系数 a 值, 可从库莱根原来的分析^[11] 得出。他论证了对于固定边界上剪应力变化的修正与自由表面剪应力的修正均可以忽略。因此可假定水流是二元的, 且剪应力呈均匀分布。库莱根^[11] 的形状校正系数可用来确定不同断面的 a 值(表2), 当 C 值为 2.03 时, a 值介于 11.1 (无限宽水槽的值) 与 13.46 (园管值) 之间。为确定断面形状和系数 a ^[9] 的关系, 曾算出断面形状的各指数。 R/y 和 a (图1) 的唯一关系已找出。其中 y 是从湿周边至最大流速点的垂直距离, 除水流的宽深比很小外, 其值通常为最大水深值。这可由各种水槽断面转换为当位面来加以解释(图2)。假设水流是二元的, 并且假定每一情况下的粗糙高度、水力半径和坡度都是相同的, R/y 比值愈小, 则平均流速愈大。因为当最大流速点离固体边界的距离大于 R 之后, 过水面积所占比例增大。由于水流阻力随 R/y 的降低而降低, 它意味着系数 a 与 R/y 成反比。

表1 不同河槽形状的科尔布鲁克-怀特水流阻力公式系数的试验数据

水槽的形状 (1)	c (2)	a (3)	资料来源 (4)
园管	2.03	14.80	Nikuradse [19]
	2.03	14.83	Colebrook和white [5]
	2.03	13.46	Keulegan[11]用Bazin[3]资料
极宽的明渠	2.03	11.09	Keulegan[11]用Bazin[3]资料
矩形的明渠	2.00	11.55	Zegzhda[28]
梯形的明渠	2.03	12.27	Keulegan[11]用Bazin[3]资料

表2 不同河槽形状的科尔布鲁克-怀特水流阻力公式系数 α 的理论值

河槽形状 (1)	渠 宽	湿 周	水力半径R	α (5)
	平均渠深 (2)	水力半径 (3)	最大流速至湿周的 垂距 y (4)	
矩 形	2.000	8.000	0.500	13.460
	2.546	8.121	0.560	13.290
	4.000	9.000	0.660	12.880
	5.000	9.800	0.714	12.650
	6.666	11.260	0.771	12.340
	10.000	14.400	0.833	11.980
	20.000	24.200	0.909	11.540
	40.000	44.100	0.952	11.290
梯 形 (60°边墙)	3.480	6.924	0.500	13.460
	3.861	7.205	0.590	13.180
	5.150	8.142	0.687	12.760
	6.787	9.519	0.762	12.380
	8.448	11.122	0.808	12.130
	11.764	14.325	0.853	11.880
	21.748	24.196	0.922	11.480
	41.742	44.118	0.959	11.260
三角形 园弧形	2.546	6.280	0.500	13.460
	4.885	7.142	0.588	13.180
	7.066	8.640	0.621	13.060
	11.400	12.495	0.635	13.000
	14.940	15.870	0.636	12.995
	14.330	25.000	0.639	12.983
	28.350	28.750	0.640	12.980
	36.240	36.280	0.642	12.975
	62.430	62.687	0.644	12.960

虽然库莱根^[11]承认在多边形水槽内的水流是三元的, 并且剪应力系不均匀分布, 鉴于理论和实践通常较为一致的情况来看, 他的简化假定似乎可以接受。

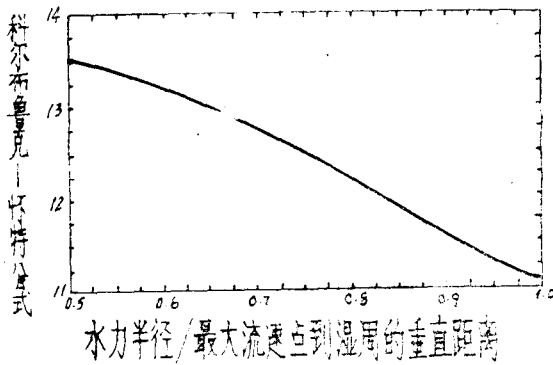


图1 水槽的水力形状系数 (R/y) 与科尔布鲁克-怀特水流阻力公式的系数 a 值的一般关系

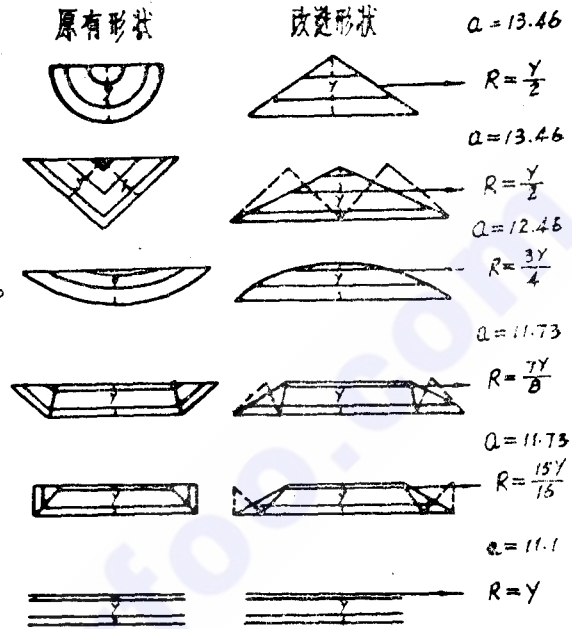


图2 当给定水力半径时 (均匀的床面与边岸材料) 断面形状对科尔布鲁克-怀特水流阻力公式的系数 a 的影响。

断面粗糙高度的变化 对水流阻力的影响

在天然河槽中，通常河床与河岸的结构组成有相当大的差异。在确定断面的综合粗糙高度时，重新确定水力半径不仅可能，而且必要，因为糙度单元 (The roughness elements) 沿着湿周不再是均匀分布的⁽⁹⁾。

为了说明断面粗糙高度的变化对水流阻力的影响，若以梯形截面为例，其中 D_b 、 D_r 和 D_l 分别代表河床、右岸和左岸的粗糙高度 (图 3 a)。对于剪应力均布的二元水流垂直于表面的对数流速梯度，亦取决于粗糙高度。取对应于床面和边岸的流速相等，诸点的轨迹线作为床面和边岸的分界线。在这个边界线上，最大流速点由下式定义：

$$\text{和 } \frac{D_l}{D_b} = \frac{y_l}{y_b} \quad (6)$$

$$\frac{D_r}{D_b} = \frac{y_r}{y_b} \quad (7)$$

其中： y_b 、 y_l 、 y_r 分别表示最大流速点至床面、左岸和右岸的垂直距离，如此就能够作出床面与边岸过流面积之间的分界线 (图 3 a)。为了估算河槽的水流阻力，必须使边岸的粗糙高度与河床质粗糙高度标准统一化。若床面粗于边岸，可用减小边岸的有效水力长度来达到。若边岸比床面粗糙则

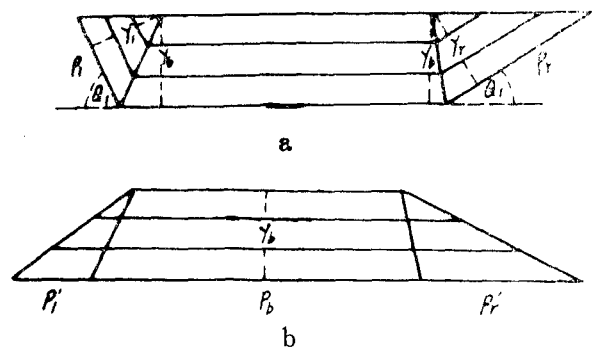


图3 在具有不同的床面与边岸粗糙高度的梯形河槽中的流速分布
a 理论分布、均匀剪应力和二元流；
b 换算的分布、标准的流速梯度。

相反, 从而使得床面过流面积与边岸过流面积上具有共同的流速梯度 (图 3 b)。断面及这一有效水力半径, 便能应用于科尔布鲁克-怀特和达西-韦斯巴什公式之中。图 3 a 和 b 中边岸过水面积的等式, 左岸和右岸的有效湿周 (P'_L 和 P'_r) 可由上式得出:

$$P'_L = \frac{y_L}{\sin \theta_L} \quad (8)$$

$$\text{和 } P'_r = \frac{y_r}{\sin \theta_r} \quad (9)$$

其中: θ_L, θ_r 分别为左、右岸的坡角。

因此整个河槽的有效湿周 (P') 应为

$$P' = P_b + P'_L + P'_r \quad (10)$$

其中: P_b 表示床面的湿周, 而有效水力半径 R' 为

$$R' = \frac{A}{P'} \quad (11)$$

断面的水流阻力由下式确定:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \log \left(\frac{aR'}{D_b} \right) \quad (12)$$

其中: 系数 a 在给定 R'/y_b 后, 可从图 1 查得。用有效水力半径 R' , 代入达西-韦斯巴什公式中, 便可确定水流的平均流速:

$$f = \frac{8gR'S}{V^2} \quad (13)$$

此外, 与床面和边岸的过流面积有关的水流摩阻系数 (f_b, f_L 和 f_r) 应为:

$$\text{河床: } \frac{1}{\sqrt{f_b}} = 2.03 \log \left(\frac{aR_b}{D_b} \right) \quad (14)$$

其中: R_b 表示床面水力半径 (A_b/P_b), 系数 a 由 R_b/y_b 确定 (图 1)。

$$\text{左岸: } \frac{1}{\sqrt{f_L}} = 2.03 \log \left(\frac{aR'_L}{D_b} \right) \quad (15)$$

$$\text{或 } \frac{1}{\sqrt{f_L}} = 2.03 \log \left(\frac{aR_L}{D_L} \right) \quad (16)$$

其中: R_L 表示左岸的水力半径 (A_L/P_L); R'_L 是边岸糙度河床质标准化后水力半径的有效值 (A_L/P'_L); 由 (R'_L/y_b) 和 R_L/Y_L (图 1) 可分别确定系数 a 值。

$$\text{右岸: } \frac{1}{\sqrt{f_r}} = 2.03 \log \left(\frac{aR'_r}{D_b} \right) \quad (17)$$

$$\text{或 } \frac{1}{\sqrt{f_r}} = 2.03 \log \left(\frac{aR_r}{D_r} \right) \quad (18)$$

其中: R_r 表示右岸的水力半径 (A_r/P_r); $R'_r = (A_r/P'_r)$ 为与床面糙率等效的有效值; 系数 a 分别由 (R'_r/y_b) 和 (R_r/y_r) 确定 (图 1)。

这类方法, 可用以确定边壁的校正程序。与范诺尼和布鲁克斯 (Vanon 和 Brooks) 所提出的方法不同的是, 它勿须:

- 1) 了解河槽内的平均流速;

- 2) 假定边壁的水流阻力, 常由一般管流公式求得;
- 3) 忽略断面粗糙度的变化对其水力半径和水流阻力的影响。

非均匀沉积物对粗糙高度的影响

均匀材料的粗糙高度很简单地等于沉积物的粒径; 而非均匀沉积的有效粒径, 则超过其平均粒径。习惯上采用 $D_{50} \sim D_{90}$ (50%~90%的河床沉积物小于或等于给定粒径) 来确定非均匀砂的粗糙高度。通常与中轴粒径有关 [6, 16, 13]。

利奥波德 [Leopold 等^[12]采用沃尔曼 (Wolman)^[27]的数据]、利梅里诺斯 (Limerinos)^[14]曾经提出粗床质河槽的水流阻力公式。利奥波德、沃尔曼和米勒 (Miller)^[12]给出的公式为:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.0 + 2.03 \log \left(\frac{d}{D_{84}} \right) \quad (19)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \log \left(\frac{3.11d}{D_{84}} \right) \quad (20)$$

利梅里诺斯^[14]的公式是:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.16 + 2.03 \log \left(\frac{R}{D_{84}} \right) \quad (21)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 + \log \left(\frac{3.72R}{D_{84}} \right) \quad (22)$$

上式中: d 表示平均水深; D_{84} 为卵石的中值粒径。在公式(19)和(20)中, 它表示该粒径占了小于或等于84%的河床宽度^[27]而在公式(21)和(22)中则表示84%的河床沙小于或等于该粒径^[26]。

虽然河床质粒径的这两种度量法的推导和表达方式各不相同, 他们都应当得出一致的结果, 因为把公式(19)和(20)变换为公式(21)和(22)时所需的校正系数消除了。在这些公式中, 通常认为宁可用短轴, 而不用中轴来确定粗糙高度, 因为颗粒短轴也许对表面摩阻力起着较大作用。然而利梅里诺斯^[14]指出这在道理上不会有任何改进, 因此提倡用中轴来确定粗糙高度, 主要是由于它较容易测量, 并且在过去发表的资料中通常都以这种方式来表示粗糙高度。

在公式(20)和(22)中, 对数项内的系数3.72和3.11表明用 D_{80} 是低估了非均匀卵石的粗糙高度的, 因为科尔布鲁克-怀特公式中系数 a 应当介于11.1与13.46之间。假定所测量的河槽的平均值为11.75, 代表一个宽深比为15.0的矩形河槽, 于是公式(20)就成为:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \log \left(\frac{11.75d}{3.78D_{84}} \right) \quad (23)$$

公式(22)就成为:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \log \left(\frac{11.75R}{3.16D_{84}} \right) \quad (24)$$

这些公式表明粗卵石和漂石的粗糙高度大约是粒径 D_{84} 的3.5倍。这点已由巴尔克哈姆

(Burkham) 和道迪(Dawdy)^[4] (图 4) 搜集的资料所证明。对于天然卵石, 这大约相当于 D_{84} 的粒径, 它在床面上难以显露出来。巴尔克哈姆和道迪^[4]通过外延利梅里诺斯关于 D_{16} — D_{84} 范围内沉积物级配对水流阻力估算中的标准误差的影响成果, 也得出了类似的结论。这些高百分率量测产生的取样误差似乎大了, 因此建议采用 $3.5D_{84}$ 来确定非均匀卵石河床沉积物的粗糙高度。通过大糙度单元的形状, 排列方式和分布密度对水流阻力影响的研究, 其结果会合理一些。奥洛克林 (O' Loughlin) 和麦克唐纳 (Macdonald)^[20]用立方体和球形材料进行室内试验, 寻求这些单元的粗糙高度、粒径及分布密度与糙率的关系, 密度(λ)定义为 ($N/F; B$), 其中 B 为单元的迎水面的面积, 而 N/F 为单元数/单位河床面积。当 (λ) = 0.1 时球体和立方体单元的粗糙高度大约为单元糙度的 3.5 倍。这就可以解释卵石河床的粗糙高度为何大约为 $3.5D_{84}$ 的原因。在这些情况下, 较大糙度单元^[17,18] 的下游尾部漩涡干扰的损失, 可能是增加它们的有效尺寸的原因。

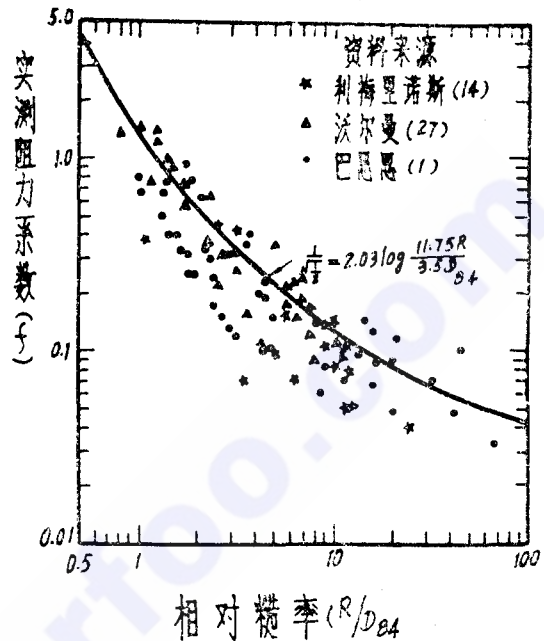


图 4 摩阻系数(f)和相对糙度 R/D_{84} 的关系,
取粗糙高度为 $3.5D_{84}$ [据巴尔克哈姆和道迪^[4]]。

卵石床面河槽的阻力公式

理论探讨和经验证据, 能够明确地研究出断面形状, 床面与边岸的糙度变化和非均匀砂对卵石床面的河流的水流阻力的影响。对于这种类型的河流, 这里建议一个更为普遍的水流阻力公式:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \log \left(\frac{aR'}{3.5D_{84}} \right) \quad (25)$$

应用这个公式有两个实际困难: 第一由于对植物表面的粗糙高度不够了解, 而对于非均匀的糙度分布又无法进行校正。不过大多数天然河流宽度/平均水深比皆大于15, 根据河床质粒径大小, 假定一均匀粗糙高度, 可能不会发生太大的误差。

在这些情况下确定水流的阻力公式为

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \log \left(\frac{aR}{3.5D_{84}} \right) \quad (26)$$

第二是如何选择计算断面的问题, 严格说来, 该公式仅适用于等速流情况。因天然河道滩槽相连, 一般皆是非均匀的。这个公式只能适用于浅滩段; 因为其流速和水深是由河段的流量、几何尺寸和糙度特征所控制。但在深槽段, 因为流态受下游回水影响就会发生较大误

差。

为了评价卵石河槽水流阻力的估算方法，曾搜集了英国的21处资料。在小流量情况下对河槽纵横断面进行测量，并采用沃尔曼(26)框格取样法测定河床质粒径级配。对每一流量过程依次测量水面坡降、水位和流量。这些数据皆用于计算水流阻力(公式26)和推算出实测的水流阻力(公式2)以资比较。在估算实测水流阻力时，把该断面纵向水面坡降代入达西-韦斯巴什公式；因为其确定值不存在任意性。在河段上测出的坡降并不反映该河段的水力条件。浅滩和深槽河段所得的成果。如表3和4，测得的水流阻力与相对糙度的关系如图5。

在浅滩河段，计算与实测的水流阻力之间的差值，其标准差为±12.7%，较之利梅里诺斯的±19%略有改善。这种方法考虑了断面形状对水流阻力的影响。因此上述改善是意料之中的。由于流量估算的标准误差为±4.7%。所以这就为卵石河槽水流阻力和流量的预估，提供了一个实用的解法。

反之，深槽段估算的标准误差：水流阻力是±153.7%，而流量是30%。这样大的误差，部分是由于回水的影响，它使流量为零时，出现了一个残余水深，同时控制了水面比降。

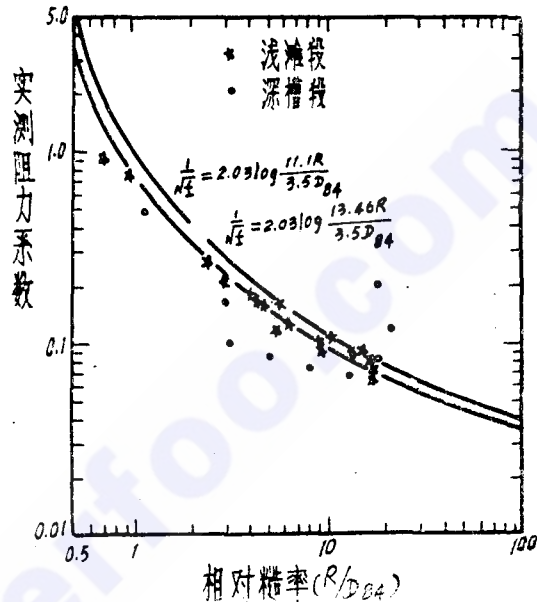


图5 在浅滩和深槽段中摩阻系数(f)和相对糙度(R/D₈₄)间的关系

結 論

1. 均匀材料固定粗糙边界所形成的顺直规则河槽，它的紊流阻力可由科尔布鲁克-怀特公式确定：

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \log \left(\frac{aR}{D} \right) \tag{27}$$

其中：f为阻力系数，R为水力半径，D为护面材料的粗糙高度；a为系数，随过水断面几何形状而变化。

2. 过水断面形状对水流阻力的影响由系数a确定。a值的范围介于11.1与13.46之间，其实际数值依断面的水力因素(R/y)而定，其中y为最大流速点至湿周的垂直距离，除了又窄又深的河槽外，y值通常是最大水深。

3. 在床面与岸壁的粗糙高度不一致的情况下，科尔布鲁克-怀特公式需要加以修正。这时水力半径R的经典定义已不再适用。在这类情况下需要推出一个有效水力半径(R')使岸

表3 浅滩段测量的和计算的水流特性

河流 (1)	断面 (2)	测量值										计算值				误差百分率	
		流量Q (米 ³ /秒) (3)	水力半径 R(米) (4)	最大水深 M(米) (5)	床沙粒径 D ₈₄ (米) (6)	水面坡度 s (7)	水流阻力 f (8)	系数 α (9)	水流阻力 f _c (10)	流量Q _c (米 ³ /秒) (11)	水流阻力f 误差百分率 (12)	流量Q 误差百分率 (13)					
Wye	1	0.995	0.243	0.330	0.250	0.00300	0.751	12.53	0.827	0.947	10.12	-4.82					
	2	5.760	0.323	0.400	0.078	0.00666	0.178	12.15	0.181	5.689	1.69	-0.72					
	3	84.872	1.379	2.102	0.080	0.00300	0.075	12.92	0.074	85.081	-0.53	0.25					
	5	6.965	0.368	0.551	0.065	0.00401	0.153	12.88	0.140	7.289	-8.37	4.65					
		15.290	0.613	0.822	0.065	0.00233	0.092	12.32	0.105	14.320	14.13	-6.34					
Dulas	A	1.192	0.141	0.270	0.200	0.03100	0.928	13.40	1.293	1.009	39.33	-15.35					
	H	13.100	0.447	0.592	0.095	0.00750	0.159	12.43	0.162	12.960	2.80	-1.07					
Severn		28.300	0.514	0.866	0.095	0.00753	0.114	13.16	0.142	25.320	25.09	-1.05					
	K	12.500	0.465	0.637	0.046	0.00095	0.107	12.55	0.100	12.950	-6.73	3.60					
		23.900	0.666	0.866	0.046	0.00090	0.089	12.34	0.083	24.690	-6.74	3.31					
	L	12.100	0.434	0.724	0.069	0.00631	0.125	13.15	0.126	11.910	3.20	-1.57					
	N	2.660	0.146	0.290	0.050	0.00610	0.209	13.44	0.220	2.593	5.26	-2.52					
		17.400	0.460	0.650	0.050	0.00310	0.101	12.54	0.105	17.075	3.96	-1.87					
	O	2.660	0.245	0.440	0.100	0.00350	0.261	13.25	0.256	2.667	-0.77	0.26					
		17.400	0.427	0.847	0.100	0.00680	0.170	13.44	0.164	17.716	-3.53	0.18					
Tweed	L	189.820	2.225	3.430	0.160	0.00250	0.088	12.95	0.083	195.160	-5.68	2.81					
	P	141.783	1.910	2.438	0.114	0.00281	0.079	12.28	0.078	143.06	-1.27	0.90					

注: 1米=3.28英尺 1米³=35.71英尺³

表4 在深槽段测量的和计算的水流特性

河流 (1)	断面 (2)	测量值						计算值			误差百分率	
		流量Q (米 ³ /秒) (3)	水力半径 R(米) (4)	最大水深 M(米) (5)	床沙粒径 D ₈₄ (米) (6)	水面坡度 s (7)	水流阻力 f (8)	系数 a (9)	水流阻力 f _c (10)	流量Q _c (米 ³ /秒) (11)	水流阻力f 误差百分率 (12)	流量Q 误差百分率 (13)
Wye	4	3.690	0.310	0.620	0.096	0.00188	0.100	13.46	0.203	2.584	104.02	-29.27
	6	444.310	3.405	4.660	0.200	0.00100	0.066	12.58	0.076	415.300	15.15	-6.53
Dulas	B	0.847	0.155	0.310	0.140	0.02250	0.478	13.46	0.613	0.748	28.13	-11.60
		5.741	0.422	0.839	0.140	0.00133	0.164	13.44	0.214	5.030	30.48	-12.38
Severn	G	13.200	0.564	0.763	0.069	0.00072	0.032	12.36	0.114	6.980	258.50	-47.12
		28.500	0.883	1.085	0.069	0.00166	0.068	12.10	0.090	24.810	31.76	-12.94
	I	13.030	0.500	0.670	0.100	0.00298	0.085	12.47	0.155	9.630	82.59	-26.09
		26.400	0.824	1.031	0.100	0.00227	0.075	12.18	0.114	21.390	52.40	-18.97
	J	12.500	1.212	1.293	0.067	0.00049	0.200	11.35	0.078	20.101	-61.20	60.80
		24.000	1.394	1.741	0.067	0.00065	0.119	12.17	0.070	31.192	-41.01	29.96
	M	16.081	0.511	1.020	0.060	0.00175	0.022	13.46	0.106	7.280	381.80	-54.73
Tweed	B	389.125	2.383	2.774	0.110	0.00090	0.028	11.82	0.070	246.65	148.39	-36.61
	D	407.52	1.989	3.291	0.121	0.00100	0.024	13.15	0.076	231.80	209.83	-43.11

注: 1米 = 3.28英尺 1米³ = 35.71英尺³

壁和床面的粗糙高度标准统一化。系数 a 由 (R'/y_b) 确定,其中 y_b 为从床面至最大流速点的垂直距离。若河床与河岸的粗糙高度为已知,则这个方法可用来推导出边壁的校正系数。

4. 经验证明,非均匀卵石材料的粗糙高度由 $3.5D_{84}$ 确定。这可能是由于在较大糙度单元的尾部产生了漩涡干扰损失所致。

5. 经过全面修正的科尔布鲁克-怀特的公式明确地考虑到断面形状,床岸糙率的差异和非均匀沉积物对水流阻力的影响,其式为:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \log \left(\frac{aR'}{3.5D_{84}} \right) \quad (28)$$

由于糙度单元是不均匀分布在河槽的湿周上,达西-韦斯巴什公式应改为

$$f = \frac{8gR'S}{V^2} \quad (29)$$

6. 实际上,由于缺乏关于长有植物的床面的粗糙高度资料,不可能将床面与边岸不同糙度对水流阻力的影响加以考虑。多数河流的宽度/平均水深比超过15时,在卵石床面的河槽中忽略这种影响,似乎不引起显著的误差。在这些情况下水流阻力给定为:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \log \left(\frac{aR}{3.5D_{84}} \right) \quad (30)$$

平均阻力系数

$$f = \frac{8gRS}{V^2} \quad (31)$$

7. 利用从河槽浅滩段和深水段测得的资料对公式〔30〕进行评价,结果浅滩段水流阻力估算的标准误差是 $\pm 12.7\%$,而流量的误差为 $\pm 4.7\%$ 。在深槽段由于回水的影响,这些误差分别为 $\pm 153.7\%$ 和 $\pm 30\%$ 。

参 考 文 献 (略)

成都科技大学许传经 王民寿译 水电部成都勘测设计院研究所杨国瑞校
(译自美国土木工程学会水力学专业月刊1979年4月)

— ◇ — — ◇ — — ◇ — — ◇ —

《中小型水轮机及辅助设备》 技术培训班通告

《中小型水轮机及辅助设备》技术培训班,将为电站培训运行、检修和管理人员。有关事宜通告如下:

- 1、培训班每期: 30天。
- 2、时间: 83年11月~84.1月(具体时间将另行通知)。
- 3、地点: 四川、德阳、东方电机厂。
- 4、联系地点与联系人: 东方电机厂 技术管理科 刘满宏