

山区斜交桥渡壅水和孔径计算

王 仁 宽

(铁道部第三勘测设计院)

一、桥下流向问题

现有计算方法, 都是假定水流通过桥下时流向不发生改变。而实际上水流通过斜交桥孔时流向必然发生改变。通过74场次模型试验的实测桥下流向线, 分析归纳找出了水流通过桥孔转弯的角度 r 与桥孔总压缩比 M_0 。(包括路堤和桥墩两种压缩) 和斜交角 α 的关系图。如图1, 据以制成关系表如表1。

表1 r 值 表 (度)

$\alpha \backslash M_0$	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	4.7	3.3	2.4	1.4	0.8	0.4	0.2	0.1	0
10	7.1	5.2	3.9	2.5	1.5	0.8	0.4	0.15	0
15	8.6	6.6	4.9	3.3	2.0	1.2	0.5	0.2	0
20	9.5	7.6	5.8	4.1	2.6	1.5	0.7	0.3	0
25	10.7	8.6	6.6	4.7	3.1	1.9	0.9	0.4	0
30	11.5	9.4	7.3	5.4	3.6	2.3	1.2	0.5	0
35	12.1	10.1	7.9	5.9	4.1	2.7	1.4	0.6	0
40	12.6	10.6	8.4	6.4	4.5	3.0	1.7	0.7	0
45	13.1	11.0	8.8	6.8	4.9	3.3	1.9	0.8	0
50	13.4	11.3	9.2	7.2	5.3	3.6	2.1	0.9	0
55	13.7	11.6	9.5	7.6	5.7	3.9	2.4	1.0	0
60	14.0	11.9	9.8	7.9	6.0	4.2	2.6	1.1	0
70	14.4	12.3	10.4	8.6	6.7	4.8	3.1	1.3	0
80	14.7	12.7	10.9	9.1	7.4	5.4	3.6	1.5	0

试验资料表明桥渡压缩愈凶, 桥下流向改变愈大; 另一方面斜交角愈大, 桥下流向转角也愈大。

二、桥下过水面积分析

现行国内外计算斜交桥下有效过水面积为:

$$W_2 = \mu \bar{h} (L \times \cos \alpha - N \times D) \quad (1)$$

式中 μ 为挤压系数; \bar{h} 为桥下平均水深; L 为桥孔长度; N 为桥墩个数; D 为圆型桥墩直径。

从模型试验中看出, 圆形桥墩的墩侧没有涡流或死水区, 而是流速更大, μ 值应等于 1.0。

(1) 式中是假定流向呈直线通过桥下, 如图 (2a)。单个桥孔 O_1O_2 (长度 l_p) 的过水宽度为:

$$\overline{BC} = \overline{AD} - (\overline{AB} + \overline{CD}) = l_p \times \cos \alpha - D_0$$

全部桥孔的过水宽度为:

$$L_{00} = L \times \cos \alpha - N \times D$$

上式中当斜交角 α 很大时, 桥下过水宽度可能出现负值。这个公式是按基于墩侧 \overline{GH} 与 \overline{KL} 两部分不过水的假设制定的, 显然不符合实际情况。实际上墩侧 \overline{GH} 与 \overline{KL} 两部分的水流不是死水而是流速更大。故本次研究为了改正现行计算的偏差, 使桥下过水面积较好地符合于客

观实际, 如图 (2b), 采用每个桥孔的全部净孔乘以流向转弯后斜交角 θ 的余弦, 得每个桥孔的过水宽度为: $\overline{BC} = \overline{AD} \times \cos \theta$ 。则全部桥下过水面积为: $W_2 = \overline{h} \Sigma \overline{BC}$, 以 $\overline{AD} = l_p - D$ 代入, 则得

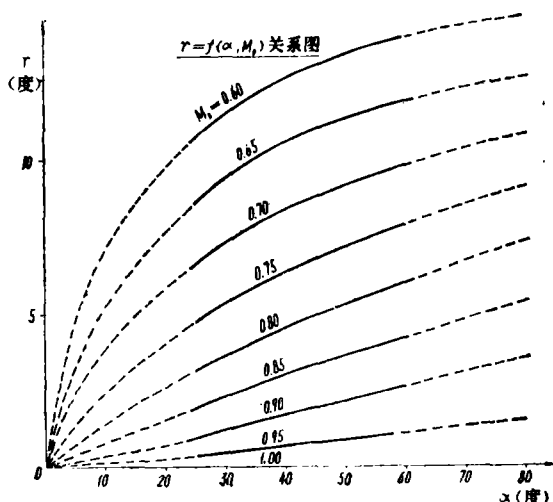


图 1

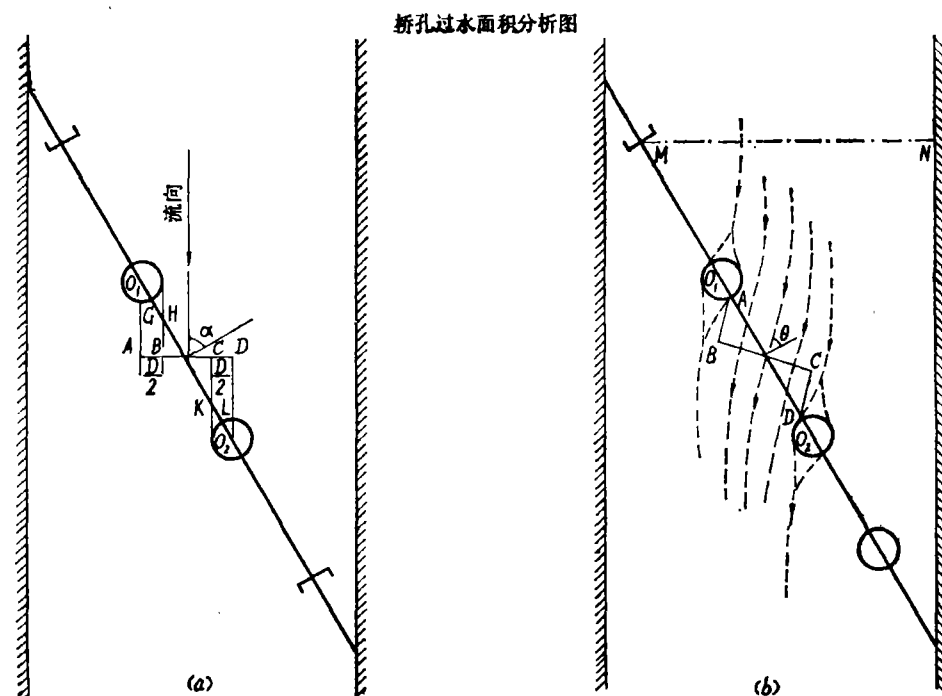


图 2

$$W_2 = \overline{h} (L - N \times D) \times \cos \theta \quad (2)$$

(2) 式中, 不论斜交角如何增大, 都不可能出现负值。

必须注意计算桥下有效过水宽度 $(L - ND) \cos \theta$, 如果大于桥台处垂直于流向的断面

宽度 (MN), 那么有效过水面积将为该断面所控制。即当 $(L - ND) \cos \theta > L \times \cos \alpha$ 时, 有效过水面积为:

$$W_{2a} = \bar{h} \times L \times \cos \alpha \quad (2a)$$

当无路堤压缩, 如果计算过水宽度大于扣除一个桥墩的河床断面宽度时, 则有效过水面积为:

$$W_{2b} = \bar{h} (B - D) \quad (2b)$$

比较 W_2 、 W_{2a} 和 W_{2b} , 选用其中最小的一个, 作为计算壅水和冲刷的控制断面面积。

三、壅水分析

按桥前最高壅水断面 I 和桥下正常水位处的断面 II, 建立比能平衡方程式如下: (图3)

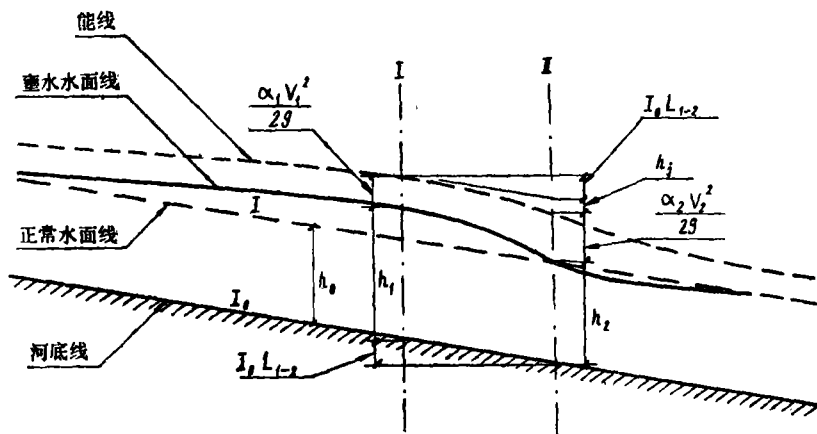


图 3

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + I_0 L_{1-2} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_i + I_0 L_{1-2} \quad (3)$$

$$\Delta Z = h_1 - h_2 = \frac{1}{2g} (v_2^2 - v_1^2) + h_i \quad (4)$$

式中 v_1 为桥前断面在壅水水位下的流速; v_2 为正常水位下的桥下流速; h_i 为水流通过桥孔的局部水头损失。这个水头损失可分为: 入口水头损失 $\xi_{\lambda} \frac{v_2^2}{2g}$, 出口水头损失 $\xi_{\text{出}} \frac{v_2^2}{2g}$, 沿程水头损失与河床坡降之差 $\Delta \xi_L \frac{v_2^2}{2g}$, 和流向转弯水头损失 $\xi_a \frac{v_2^2}{2g}$ 四部分。

则: $h_i = \frac{v_2^2}{2g} (\xi_{\lambda} + \xi_{\text{出}} + \Delta \xi_L + \xi_a)$ 。将此式代入 (4) 式得:

$$\Delta Z = \frac{1}{2g} (v_2^2 - v_1^2) + \frac{v_2^2}{2g} (\xi_{\lambda} + \xi_{\text{出}} + \Delta \xi_L + \xi_a) \quad (5)$$

经整理得:

$$v_2 = \sqrt{\frac{1}{1 + \xi_{\lambda} + \xi_{\text{出}} + \Delta \xi_L + \xi_a}} \cdot \sqrt{2g \Delta Z + v_1^2} \quad (6)$$

设:

$$\varphi = \sqrt{\frac{1}{1 + \xi_{\lambda} + \xi_{\text{出}} + \Delta \xi_L + \xi_a}} \quad (7)$$

$$\text{代入 (6) 式得: } v_2 = \varphi \sqrt{2g \Delta Z + v_1^2} \quad (8)$$

则:

$$\varphi = \frac{v_2}{\sqrt{2g \Delta Z + v_1^2}} \quad (9)$$

从(7)式看出 φ 值是与出入口损失、沿程损失和流向转弯损失等有关。山区斜交桥渡基本上都没有导流堤,并且墩台类型一致,因此出入口损失系数将为常数。沿程损失基本上被河床坡度的落差所抵消,并且壅水峰离桥很近,可不考虑。四种损失中只有流向转弯损失变化较大。为此可根据模型试验资料建立 $\varphi=f(\alpha)$ 的函数关系。

试验资料证明, φ 值与压缩比 M 、跨度 l_p 、流态和冲刷等因素,都没有规律性变化;只有与斜交角 α 呈反变趋势,符合上述分析情况。点绘 $\varphi=f(\alpha)$ 关系曲线,从而定出 φ 值表,如表2。

表2

 φ 值 表

α (度)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
φ	0.94	0.93	0.93	0.92	0.92	0.91	0.90	0.89	0.89

确定了流速损失系数后,即可按下式计算壅水值:

$$\Delta Z_{\text{计}} = \frac{1}{2g} \left[\left(\frac{v_2}{\varphi} \right)^2 - v_1^2 \right] \quad (10)$$

式中

$$v_2 = \frac{Q}{h(L - ND) \cos \theta} \quad (11)$$

$$\theta = \alpha - r \quad (12)$$

v_1 与 $\Delta Z_{\text{计}}$ 二者需反复试算确定。

1. 各种因素对壅水的影响。

(1) 壅水与斜交的关系。当 M 、 l_p 和流态等条件相同的情况下,从试验资料看出壅水值 ΔZ 与 α 呈反变关系。由于 $(L - ND)$ 值随 α 增长的数量比 $\cos \theta$ 减小的量为大,影响到 V_2 和 ΔZ 与 α 呈反变。由此说明(10)式能够适应这一客观变化规律。

(2) 壅水与压缩比的关系。试验资料表明,当 $\alpha < 25^\circ$ 时,壅水值与压缩比全部呈反变关系,即压缩愈凶,壅水愈大,符合一般概念。当 $\alpha \geq 45^\circ$ 时,壅水与压缩比的关系比较混乱。分析原因:一方面压缩愈凶壅水愈大;另一方面压缩愈凶桥下流向转角愈大,影响到壅水值减小,因此壅水与压缩比的关系比较混乱。上述壅水与压缩比的关系,(10)和(11)式能够予以反映。

(3) 跨度对壅水的影响。试验资料表明,跨度越小,壅水越大,符合一般规律。(10)和(11)式能够反映这一规律。

(4) 流态对壅水的影响。当 $\alpha < 25^\circ$ 时, ΔZ 随流态的由缓变急而增长;当 $\alpha = 45^\circ$ 时, ΔZ 与流态的关系混乱;当 $\alpha = 60^\circ$ 时, ΔZ 与流态呈反变。一般情况,流速是随流态的由缓变急而增大,而壅水又与流速成正变,因此急流的壅水比缓流大是合理的。但当斜交角加大时,桥下流向转角 r 增大,桥下过水面积增大,流速减小,因此于 $\alpha \geq 45^\circ$ 时, ΔZ 与流态的关系出现混乱和反变现象。上述规律(10)和(11)式能够予以反映。

(5) 冲刷对壅水的影响。试验资料说明,当桥渡发生冲刷,桥下和桥前水位都普遍下降。这一情况,(10)式未予反映,将在后面用实测资料修改壅水计算公式中予以考虑。

2. 检验和修改模型试验的壅水公式。

用(10)和(11)式检算39个实测桥渡壅水的结果,计算壅水与实测壅水差别较大。主

要原因是模型试验为定床无冲刷,而实测桥渡的断面大都为枯水期淤积断面,洪水期发生天然冲刷和一般冲刷,断面冲深很多,致使考虑冲刷与不考虑冲刷,计算壅水值相差很大。

算出实测壅水与计算壅水的比值 $C = \Delta Z_{\text{实}} / \Delta Z_{\text{计}}$, 考虑到壅水随冲刷的变化应该和桥下流速有关,为此点绘 $C = f(v_2)$ 的相关图如图 4。

由于上游来沙量的变化,沙洲、边滩、河弯等的移动,使壅水值的变化与某些偶然因素有关。为了使计算壅水值能适应最不利情况的出现,故在图 4 中采用了基本外包定线,得壅水的修正系数:

$$C = \frac{8.9}{v_2^{1.58}} \quad (13)$$

图 4 中偏离较大的 4 个点 (36、37、38、39) 都属白茅岭公路桥。分析原因有二: (1) 该桥实测壅水值太小 ($\Delta Z < 0.02$), 容易产生较大的误差; (2) 该桥属平原细颗粒河流, 不宜用山区斜交桥壅水计算公式。

用 C 值修正 (10) 式, 即为本次推荐的壅水计算公式:

$$\Delta Z = C \cdot \Delta Z_{\text{计}} \quad (14)$$

3. 壅水公式的验证和适用范围。

用 39 个实桥资料, 验证美国联邦公路局法^[1]、苏联 72 年规范法^[2]、《桥涵水文》手册法^[3]和本次推荐的计算方法。推荐法的误差范围为 $-0.02 \sim +0.72$, 优于其它各家公式较多, 基本上没有偏小情况。

实测 39 个资料中, 有 13 个压缩比 $M < 0.8$, 这些桥都有不同程度的水害。这一事实说明山区桥渡的压缩比 M 不宜小于 0.8。

实测资料中有 4 座双线平行桥, 线间距为 14~160 米, 各桥孔墩台互相对应, 上下游桥台间都有河堤联接。实测洪水纵坡都表明下游桥的出入口没有水位差, 如同单线桥一样, 只是在上游桥前发生壅水。

根据试验和实测资料的情况, 建议推荐法的使用范围于后: (1) 河滩流量占总流量的百分比不得大于 20%; (2) 桥孔总压缩比 M_0 不得小于 0.6; (3) 对平原细沙河流不适用; (4) 泥石流河道不适用; (5) 可应用于各种斜交角度; (6) 对有导流堤的桥渡不适用; (7) 桥墩形状限于圆形, 对其它墩形不适用。

4. 壅水峰离桥的距离。

根据试验资料分析, 在 $M > 0.6$ 的情况下, 壅水峰离桥的距离, 基本上都小于或接近于一个孔跨的长度。它与压缩比全部呈反变关系, 与跨度成正变的较多, 但无明确的规律, 与冲刷的关系全部呈正变, 说明桥渡发生冲刷后, 壅水峰将向上游移动并伴随着峰值降低。

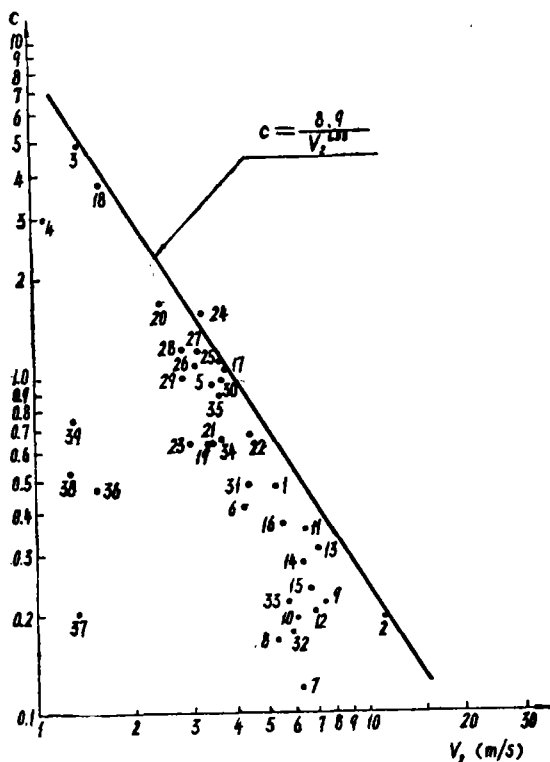


图 4

四、水位分析

国内外现行计算方法,都假定桥下水位等于天然水位,这一假定对平原一般河流尚可适合,而对山区桥渡则偏差较大。根据试验资料,山区桥渡的桥下水位有以下几个特点:(1)当流态为急流或接近急流,桥下水位高于天然水位;(2)正交桥下的水位也不是水平,而是起伏成波状;(3)当桥渡未发生冲刷和压缩较少($M \geq 0.8$)时,桥孔入口水位接近于壅水水位;(4)桥渡发生冲刷,桥下水位将有所降低。

分析以上四个特点,控制梁底标高的水位,将是桥孔入口水位外加起伏波高度 ΔH_{λ} 。当 $M \geq 0.8$ 时,桥孔入口水位可近似地采用天然水位加壅水值: $H_{\lambda} = H + \Delta Z$ 。设:最高入口水位为 $H_{\lambda m}$,则起伏波高度为:

$$\begin{aligned} \Delta H_{\lambda} &= H_{\lambda m} - H_{\lambda} \\ \beta &= \Delta H_{\lambda} / H_{\lambda} \\ \text{则: } \Delta H_{\lambda} &= \beta H_{\lambda} \end{aligned} \quad (15)$$

控制梁底标高的水位为:

$$\text{桥址中心处: } H_{\lambda m} = H + \Delta Z + \beta H_{\lambda} \quad (16)$$

$$\text{上游端桥台: } H_{\lambda 1} = H_{\lambda m} + \frac{1}{2} l \cdot \sin \alpha \quad (16a)$$

$$\text{下游端桥台: } H_{\lambda 2} = H_{\lambda m} - \frac{1}{2} l \cdot \sin \alpha \quad (16b)$$

试验资料表明,起伏度 β 与压缩比 M ,跨度 l 、和流态都没有明显的关系,只是与斜交角 α 成正变关系比较明显;分析原因,上游桥墩的斜激波,加剧了中下游桥孔的起伏度。冲刷后的 β 值多数增大,但因冲刷后桥前水位降低,对梁底标高不起控制作用。故本次确定 β 值只考虑与斜交的关系。点绘 $\beta = f(\alpha)$ 关系曲线,然后根据该曲线制定出 β 值表。该表限于 $F_r > 0.7$ 的情况应用。

表3 β 值 表

α (度)	0	10'	20	30	40	50	60	70	80
β	0.10	0.11	0.13	0.15	0.18	0.22	0.27	0.32	0.37

五、山区斜交桥渡孔径设计

1. 桥孔布置需遵守以下几点原则:

(1) 山区河流当流速很大和河滩很少时,桥渡不宜过多压缩水流,铁路工程技术规范桥涵第2—21条规定〔4〕:山区峡谷河段冲刷系数不得超过1.2,山区宽阔河段冲刷系数不得超过1.4。要满足规程的要求,容许的桥孔压缩比 M 应大于表4所列数值。

表4 最小 M 值 表

l_p (米)	16.0	20.0	24.0	32.0	40.0
$P_{1.2}$	1.0	0.99	0.96	0.93	0.92
$P_{1.4}$	0.87	0.85	0.83	0.79	0.79
桥墩阻水比 J	0.18	0.16	0.13	0.10	0.09

从表4所列最小压缩比看,峡谷河段的跨度不得小于16.0米,对于山区宽阔河段的压缩

比,表列最小值为0.79,建议采用 M 不小于0.8。

(2) 山区桥渡因流速很大,桥头锥体往往被冲坏。为此设计桥孔时应考虑锥体坡脚处的流速。检算了44座桥的锥体坡脚处的天然流速, $\left(v_{\text{锥}} = \frac{1}{n} I^{1/2} h_{\text{锥}}^{2/3}\right)$ 有24座桥的 $v_{\text{锥}} > 2.0$,其中有18座桥的锥体被冲坏,未被冲坏的大部分用浆砌片石加固并且基础有一定的埋置深度。而 $V_{\text{锥}} < 2.0$ 的锥坡,则全部完好无恙。为此建议设计桥孔时,需检查锥体坡脚处的流速, $V_{\text{锥}}$ 不可大于2.0m/s。

(3) 山区桥渡的调治建筑物,同样经不起急流冲刷,宁愿扩大桥孔而不要设置调治建筑物。当斜交角度 $\alpha \geq 25^\circ$ 时,为避免锥体侵占过水断面,需改用八字翼墙代替锥体。

(4) 山区斜交桥渡,当下游端路堤阻水形成水袋时,大都发生水害。为此设计桥孔时,要尽量避免在下游端压缩水流。

(5) 为了减少阻水面积,斜交桥渡的桥墩一般都采用圆形墩。本次试验也只采用圆形墩一种形式,故建议山区单线桥渡设计,一律采用圆形墩。当用本法检算既有山区斜交桥渡时,单线圆端形桥墩亦可应用。

(6) 按本法设计山区斜交桥渡时,可采用任何斜交角度,不必强求正交。但对于严重泥石流(结构型)的桥渡,斜交角不得大于 15° ,对于一般(紊流型)泥石流,斜交角不得大于 25° 。

按以上六项原则设计桥孔,可不必计算孔径,只需计算冲刷和壅水,以确定基础埋置深度和梁底标高。

2. 壅水计算

(1) 计算总压缩比: $M_0 = M(1 - j)$ 。

(2) 按表1和表2分别查定桥下流向转角 r 值和流速损失系数 φ 值。

(3) 按(2)式算出三种有效过水面积 W_2 ,选用最小的 W_2 以计算桥孔出口流速 $V_2 = \frac{Q}{W_2}$ 。

(4) 按(10)式用迭代法试算确定 ΔZ 计。再按(13)和(14)式计算壅水值 ΔZ 。

(5) 按表(3)查定起伏度 β 值,再按(16)式计算控制梁底标高的水位。

(6) 按作者《桥墩冲击高度研究》一文中(4)式计算冲击高度,则最低限度支承垫石标高为:

$$H_{\text{支}} = H + \Delta Z + \Delta h + 0.25。$$

3. 冲刷计算

(1) 计算需要净过水面积: $\Omega_{\text{需}} = \frac{Q}{V_P}$ 。

(2) 计算供给有效过水面积,先计算三种情况的有效过水宽度:

$$L_1 = (L - ND) \cos \theta \text{ (米);}$$

$$L_2 = L \times \cos \alpha \text{ (米);}$$

$$L_3 = B - D \text{ (米);} \quad (B \text{ 为河床宽度})$$

选用其中最小的一个作为有效过水宽度 L_{e} ,则供给过水面积为: $\Omega_{\text{供}} = \bar{h} L_{\text{e}}$

(3) 计算冲刷系数: $P = \frac{Q}{V_P \Omega_{\text{供}}} \quad (17)$

(4) 按(64-1)式^[3]计算河槽部分最大一般冲刷深度。先计算河槽有效过水宽度,

$$L_{B_1} = (L_B - N_b D) \cos \theta \quad (L_B \text{ 为桥下河槽宽度})$$

$$L_{B_2} = L_B \cos \alpha \quad (N_b \text{ 为河槽内桥墩个数})$$

$$L_{B_2} = B_2 - D$$

(B₂为河槽宽度)

选用其中最小的一个作为河槽有效过水宽度 L_{B0}

$$h_p = \left[\frac{A \frac{Q_{MB}}{L_{B0}} \left(\frac{h_m}{h_B} \right)^{5/3}}{E d^{1/6}} \right]^{2/5} \quad (18)$$

考虑到桥下河槽扩宽和摆动等因素,宜将河槽桥墩和河滩桥墩置于同一基底标高。故可不计算河滩冲刷。

(5) 按(65—1)式^[3]计算局部冲刷。

$$\text{当 } V \leq V_0 \text{ 时, } h_B = K_t K_{\eta_1} b_1^{0.6} (v - v'_0) \quad (19a)$$

$$V > V_0 \text{ 时, } h_B = K_t K_{\eta_1} b_1^{0.6} (v_0 - v'_0) \left(\frac{v}{v_0} \right)^{2.1} \quad (19b)$$

式中 v ——墩前行近流速, $v = v_{\lambda} = \left(\frac{h_1}{h_{\lambda}} \right)^{2/3}$;

v_{λ} ——入口断面平均流速, $v_{\lambda} = \frac{Q}{h_{\lambda} L \cos \alpha}$

h_{λ} ——入口断面平均水深, $h_{\lambda} = \bar{h} + \angle Z$

h_1 ——墩前最大水深 $h_1 = h_m + \angle Z$

K_t 、 K_{η_1} 、 b 、 v_0 、 v'_0 、 n_1 符号意义同(65—1)式

Q 、 L 、 α 、 \bar{h} 、 $\angle Z$ 符号意义同前。

(65—1)式中,局部冲刷深 h_B 是随墩宽 b_1 的0.6次方而增长,这一关系对一般情况比较适合,但当桥墩很宽而相对水深较浅时($b_1 > \frac{h_m}{1.5}$), h_B 将不随 b_1 增长,甚至有反变现象。局部冲刷与墩宽的关系是在 $b_1 = \frac{b_m}{1.5}$ 时, h_B 最大。山区桥渡大都水浅、墩高,计算墩宽较大。因此建议当 $b_1 > \frac{b_m}{1.5}$ 时,暂采用 $b_1 = \frac{h_m}{1.5}$ 。这样计算,既可保证安全,又可减少计算冲刷深度,避免浪费。

(6) 最低冲刷线标高:

$$H_{\text{冲}} = H - (h_p + h_B)$$

参 考 文 献

- [1] Hydraulic of bridge waterways, U.S. Depart. ment of transportation/Federal Highway Administration, 1973.
- [2] 桥渡勘测设计规程(НМП—72), 苏联运输工程部运输设计总局制定, 交通部公路规划设计院译。
- [3] 铁路工程设计技术手册《桥涵水文》, 铁道部第三勘测设计院编, 人民铁道出版社, 1978.
- [4] 铁路工程技术规范(第二篇)桥涵, (1974) 交铁基字2960号公布。