

挑流消能挑距计算中相关问题的探讨

何文学 李茶青

(浙江水利水电专科学校水利工程系,浙江 杭州 310018)

摘要 探讨挑距计算的相关问题,认为:①由于挑流消能往往伴随着空中掺气、水舌分散等问题,使得挑距的理论计算成果与实际情况有较大出入;②不同规范、文献对挑距的计算方法及其概念界定存在差异,在一定程度上给计算公式的选择与应用带来了困难。通过对挑距计算中诸如流速系数、出口断面平均流速等重要参数的探讨,进一步认识挑距计算的要点,为实际工作中合理选择相应的计算方法与计算公式提供了参考。

关键词 挑流消能 挑距 流速系数

中图分类号:TV653 文献标识码:B 文章编号:1006-7647(2011)S1-0053-03

挑流消能以其结构简单、工程量小、投资相对节省等优点,成为中高水头泄水建筑物采用较多的一种衔接消能方式。由于挑流消能往往伴随着空中掺气、水舌分散等问题,使得挑射距离及其相关参数的理论计算成果与实际情况有较大出入。尤其是鼻坎出口断面流速较高时,更要关注水舌的空中掺气与分散等因素对挑距计算结果的影响。但不同规范、文献对挑距的计算方法及其概念界定存在差异,在一定程度上给计算公式的选择与应用带来了困难。基于此,有必要对目前文献资料中相关挑距的计算方法与计算公式中存在的差异进行探讨,力求能为实际工程的应用提供参考。

1 挑距的概念

挑射射程 L 又称挑距、抛距、射程等,一般是指挑坎末端至冲刷坑最深点间的水平距离,包括空中射程与水下射程 2 部分,如图 1 所示。但也有将水舌外缘与河床的交点至挑坎末端的水平距离定义为水舌抛距或挑距。即在不同的文献资料中,对挑距概念的界定不一样,对相关计算方法的处理也存在差异。在此对主要文献中挑距计算的相关问题进行探讨,力求为工程实际计算提供参考依据。

2 相关问题探讨

2.1 空中射程分析计算的坐标原点

关于空中射程的计算,通常按质点自由抛射轨

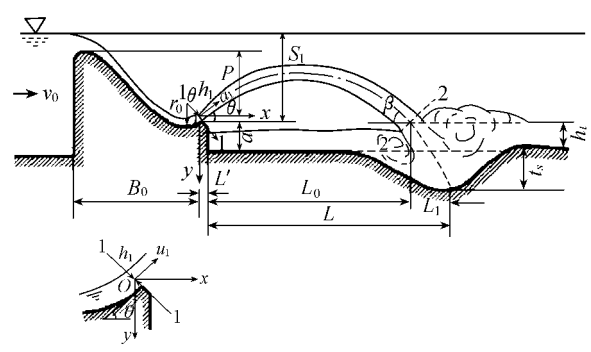


图 1 挑流消能示意图

迹确定。但不同文献建立空中挑距计算式的坐标原点却不尽相同。文献 1-2 是以鼻坎末端 1-1 过水断面水舌中心为坐标原点。文献 3 则是以过挑坎最高点位置的铅垂线与水股上缘表面的交点为坐标原点,该点并不位于鼻坎末端 1-1 过水断面上。文献 4 则是以 1-1 过水断面上的水舌外缘即水面那一点为坐标原点,与文献 3 略有差异。由于坐标原点不同,同样按照抛体运动得到的挑距计算公式也应该有所差别。但对高坝而言,当忽略坎顶铅垂水深影响时,上述方法得到的挑距计算公式趋于相同。文献 7-10 又给出了计算公式,示意图中并未标出坐标原点。

2.2 水舌轨迹

尽管空中射程的分析计算都是以抛射运动为依据,但从不同文献可以看到,挑流射程的分析计算仍然存在如下 2 种以不同水舌质点轨迹为参照的分析方法。一种是以水舌中心线^[1-2,5-6]为分析依据,另

一种是以水舌外缘^[3-4, 7-10]为分析依据。

从图 1 可以看到^[1]挑流总射程：

$$L = L_0 + L_1 - L' \quad (1)$$

式中： L_0 为挑坎出口断面 1-1 中心点到水舌轴线与下游水面交点间的水平距离，称为空中挑距； L_1 为水舌轴线与下游水面交点至冲刷坑最深点间的水平距离，称为水下射程； L' 为挑坎出口断面中心点到挑坎下游端的水平距离，一般很小，可以略去不计。

文献[3-4]对挑流射程的定义与文献[1]相同，但空中射程与水下射程的计算均以水舌外缘为计算依据，不是水舌中心线。

文献[5]以水舌中心线与下游水面的交点为计算依据，给出的挑流水舌射距计算公式是挑坎末端至冲坑最深点的水平距离，实际上是总射程。从其示意图来看，冲坑最深点与水舌中心线与下游水面的交点在同一铅垂线上，这与其他文献资料的表达方式均不相同。

文献[6]也是以水舌中心线与下游水面的交点为计算依据，给出的射程计算公式是挑坎末端至水舌中心线与下游水面的交点间的水平距离，即空中射程。

现行的行业规范^[7-10]推荐的水舌挑距计算式也是按水舌外缘计算的。

2.3 空中射程计算式及其简化

从物理学中质点斜上抛运动方程入手，在忽略空气阻力、水舌分散、空中掺气等因素的影响下，得到的计算空中挑距的数学表达式如下^[11]：

$$L_0 = \frac{u_1^2 \cos\theta \sin\theta}{g} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2g \left(a - h_t + \frac{h_1}{2} \cos\theta \right)}{u_1^2 \sin^2\theta}} \right] \quad (2)$$

式中： θ 为挑坎挑射角； a 为鼻坎高； h_1 为未受冲刷的下游水深； u_1 为挑坎末端出口断面水深； u_1 为挑坎末端某一点处的水流流速，常用挑坎末端出口断面的平均流速 v_1 代替。

引入综合反映挑射水流阻力影响的流速系数 φ ，在忽略鼻坎末端断面水深 h_1 影响的前提下，得到

$$L_0 = \varphi^2 S_1 \sin 2\theta \left[1 + \sqrt{1 + \frac{(a - h_t)}{\varphi^2 S_1 \sin^2\theta}} \right] \quad (3)$$

式中： S_1 为上游水位至挑坎顶高程之间的距离； φ 为坝面流速系数，其综合反映坝面溢流段、空中扩散段的水流阻力，与一般概念上的流速系数有区别，文献[3]称其为第一流速系数。

2.4 水下射程的处理方法

关于水下射程的计算，有如下 2 种处理方法^[3]：

①近似认为水舌从 2-2 断面起沿入水角方向直线前

进，可按直角三角形关系求出 L_1 ， $L_1 = (t_s + h_t) \tan\beta$ 。式中： β 为入水角； t_s 为冲坑深度。 β 可由自由抛射的轨迹方程求一阶导数得到。大多数的水力学教科书都采用这样的处理方法。②认为水舌入水后仍按抛射体轨迹运动，但考虑到水下射流的阻力影响，引入“第二流速系数”修正，此时可得到挑流总射程计算式，即将空中射程与水下射程之和统一计算式^[3]。关于第二流速系数，文献[11]曾根据实测资料换算得到了 2 个挑流流速系数的关系为 $\varphi_2 = 0.966\varphi_1$ 。

2.5 挑流总射程

挑射总射程 L 一般指挑坎末端至冲刷坑最深点间的水平距离^[1-4]。但文献[7-9]却定义为挑流鼻坎末端起至水舌外缘与下游河床床面交点间的距离，并给出了计算公式。水舌外缘与下游河床床面的交点与冲刷坑最深点之间还存在一定的距离，对这一距离图中有表示，但未给出计算公式。文献[10]将挑距定义为挑流鼻坎末端起至水舌外缘与下游水面交点间的距离，并给出了计算公式，但对水舌外缘与下游水面的交点至冲刷坑最深点之间的距离未做说明。一般情况下，倾向于认定挑流射程是空中射程与水下射程 2 部分之和，即分别计算空中射程与水下射程，然后相加^[1-4]。文献[3]给出的用第二流速系数计算挑流总射程的计算公式与文献[5, 7-10]中的挑距或冲刷坑位置估算公式形式上类似，只是文献[5, 7-10]等均未提及第二流速系数。其中，文献[8]认为：如有向心力影响，则挑距还应乘以 0.9~0.95 的折减系数。

除根据抛体运动推求挑距之外，国内外不少学者还提出了一些计算挑距的经验公式，见文献[5]，此外，文献[5]还根据柘溪、丰满、双牌、水府庙、桓仁、上游江 6 个水利水电工程的原型泄洪情况（1953—1973 年观测结果），对挑距计算的经验公式与抛射体公式进行比照。由于上述 6 个水利水电工程的单宽流量与上、下游水位差均不大（最大为柘溪工程，单宽流量 $q = 84.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ，上、下游水位差 $z = 67.5 \text{ m}$ ），加上观测手段的限制，所得数据在较大范围的应用还值得进一步探讨。文献[12]采用同步摄影的方法观测乌江渡挑流水舌的轨迹（最大单宽流量 $q_{\max} = 236.11 \text{ m}^3/\text{s}$ ，上、下游水位差 $z = 130.05 \text{ m}$ ），并将实测的 18 组数据与现有挑距计算公式比较，推荐了可供工程借鉴的计算公式。文献[13]进一步根据有关实测资料对射距与冲坑位置的相关计算公式进行比照，提出了可供实际工程参考的高水头、大单宽流量的挑坎射距及冲刷坑位置的适宜计算公式。

2.6 出口断面流速

空中射程计算公式中，对抛射质点的点流速 u_1

通常以挑坎出口断面的平均流速代替,但不同文献对平均流速的处理略有差异。文献[1,3]认为鼻坎出口断面流速均匀分布,取 $u_1 = v_1$,即断面平均流速与点流速相等。文献[7-10]认为应取 $u_1 = 1.1v_1$ 。关于鼻坎末端过水断面平均流速 v_1 的基本计算公式如下:

$$v_1 = \varphi \sqrt{2g(S_1 - h_1 \cos \theta)} \quad (4)$$

当忽略 h_1 时,式(4)将简化为[1-5,8-10]

$$v_1 = \varphi \sqrt{2gS_1} \quad (5)$$

但不同文献,对其计算参数的选用仍然有所不同。文献[7]以上游水面到鼻坎末端水面的距离作为 S_1 ,实质上与式(4)同义,但未考虑铅垂方向水深的修正。文献[7]还给出了另外一种确定鼻坎断面平均流速的方法,即按推算泄槽水面线的方法求出鼻坎末端水深,根据连续方程由单宽流量可求得鼻坎断面平均流速 v_1 。

2.7 挑流流速系数

挑流流速系数综合反映挑流消能过程中的能量损失情况,是溢流面、空中扩散段、水下淹没扩散段阻力状况的综合反映。根据有关研究资料[1],在 $v_1 > 15 \text{ m/s}$ 时,忽略空气阻力与空中分散、掺气影响因素下得到的式(2)和式(3)的结果与实际射程有明显的偏差。对此,工程上采取的办法是应用根据原型观测资料整理得到的经验公式计算 φ 。这样得到的 φ 已包括了水舌分散、掺气以及空气阻力的影响,与实际情况比较接近。由于这样得到的 φ 已不同于一般的流速系数,有文献称其为“第一挑流系数”[3]。

下面对各类文献推荐的、常用的挑流消能的流速系数计算公式进行介绍。

a. 长江水利水电科学研究院公式:

$$\varphi = \sqrt[3]{1 - \frac{0.055}{K_E^{0.5}}} \quad (6)$$

式中: K_E 为流能比。

文献[1-5]给出的 K_E 表达式略有差异,分述于后。式(6)的适用范围为 $K_E = 0.004 \sim 0.15$ 。当 $K_E > 0.15$ 时,取 $\varphi = 0.95$ 。

不同资料给出的流能比计算公式略有差异。文献[1]和文献[3]中 $K_E = q(\sqrt{gS_1}^{1.5})$,文献[2]中 $K_E = q(\sqrt{gz}^{1.5})$,文献[4]中 $K_E = q(\sqrt{qz}^{1.5})$ (估计有误),文献[5]中 $K_E = q(\sqrt{gH}^{0.5})$ (H 为上游水位至下游河床的垂直距离)。显然, z 与 S_1 之间存在一定的差异,两者并不完全相等。

b. 东北勘测设计院(徐秉衡等)公式[1-5]:

$$\varphi = 1 - \frac{0.0077}{\left(\frac{q^{2/3}}{S_0}\right)^{1.15}} \quad (7)$$

式中: S_0 为坝面流程,近似按 $S_0 = \sqrt{P^2 + B_0^2}$ 计算

(其中 P 为挑坎顶端以上的坝高, m ; B_0 为溢流面的水平投影长度, m)。

式(7)的适用范围为 $q^{2/3}/S_0 = 0.025 \sim 0.25$ 。当 $q^{2/3}/S_0 > 0.25$ 时,可取 $\varphi = 0.95$ 。

除上述计算流速系数的公式之外,文献[5]还介绍了其他形式的流速系数计算公式。从式(6)、式(7)可以看到,流速系数的经验关系式主要包括的重要水力要素有 q 、 S_1 或 S_0 。不同公式参照的试验数据不同,其应用范围也不相同。文献[12]认为:式(6)、式(7)得到的流速系数值与原型观测值较接近,其计算公式不仅适用于中低水头,而且可用于高水头($z < 130 \text{ m}$)大单宽流量($q < 240 \text{ m}^3/\text{s}$)。

3 结 语

挑距是挑流消能方式中非常重要的技术参数,但由于影响因素众多,使得对挑距的计算很难做到与实际情况吻合。已有的不少研究成果较好地解决了挑距计算问题,但相关文献中对相关问题的处理却给实际应用带来不小的困难。通过对挑距计算中相关问题的探讨,对诸如流速系数、出口断面平均流速等重要参数有了进一步的认识,给实际工作中合理选择相应的计算方法与计算公式提供了重要的参考依据。

参考文献:

- [1] 吴持恭. 水力学:下册[M]. 3版. 北京:高等教育出版社, 2003:25-26.
- [2] 清华大学水力学教研室. 水力学:1980年修订版[M]. 北京:人民教育出版社, 1981.
- [3] 徐正凡. 水力学:下册[M]. 北京:高等教育出版社, 1986:240-243.
- [4] 李炜. 水力计算手册[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社, 2006:138.
- [5] 南京水利科学研究院, 水利水电科学研究院. 水工模型试验[M]. 2版. 北京:水利电力出版社, 1985:331.
- [6] 华东水利学院. 水工设计手册第六卷:泄水与过坝建筑物[M]. 北京:水利电力出版社, 1987:3-349~3-370.
- [7] SL 253—2000 溢洪道设计规范[S].
- [8] SL 319—2005 混凝土重力坝设计规范[S].
- [9] DL/T 5166—2002 溢洪道设计规范[S].
- [10] DL 5108—1999 混凝土重力坝设计规范[S].
- [11] 徐秉衡, 刘新纪. 溢流坝鼻坎挑流对岩基冲刷深度与位置的估算[C]//泄水建筑物消能防冲论文集. 北京:水利出版社, 1980.
- [12] 邓正湖. 挑流消能工挑射距离的原型观测与计算[J]. 水力发电, 1989(1):11-15.
- [13] 章福仪. 鼻坎挑流射距与冲坑位置的计算——与邓正湖同志商榷[J]. 水力发电, 1990(10):61-63, 53.

(收稿日期:2011-05-16 编辑:高建群)