

关于动水压力的几个问题

杨国瑞

(成都勘测设计研究院科研所)

提 要 水工建筑物泄洪时,下游河床会产生局部冲刷,主要是动水压力所致。本文根据试验研究成果,对动水压力计算,动水压力允许值,动水压力和冲坑关系以及水舌入水宽度等几个问题,进行了探讨,并给出有关计算方法和结果,可供工程设计及试验研究工作参考应用。

关键词 水工建筑物 下游河床 局部冲刷 动水压力

一、前 言

在水利水电工程中,泄洪建筑物泄洪时,溢流水舌将抛射于下游河床水垫中,这时常发生局部冲刷现象。关于基岩冲刷的机理,目前国内外学者,各有不同的见解,但是有一点认识则是共同的:水流入水后,作用在河床上(或衬护的板面上)的动水压力是造成基岩冲刷的重要原因。因此研究有关动水压力的问题,不仅对水电工程的消能防冲有重要意义,而且对试验工作本身也有现实意义。

众所周知,一般评价消能效果,要进行室内模拟冲刷试验,以衡量设计方案。但是在试验中,模拟基岩冲刷是困难的,尽管国内外学者,曾作过许多尝试,如成都科技大岩块模拟方法,清华大学岩块放大方法、成都院科研所低标号砼切割等等,但结果还不够十分理想,其工作量大,复杂。目前常用的仍是采用散粒体模拟的办法,进行冲刷试验。这种方法虽较简单易行,但在过程中,重复劳动多,(如铺沙等)测量误差大。近年来,我们尝试用测量动水压力方法来衡量消能效果。取得了较为满意的成果,测量动水压力精度较高,人为误差小,特别是方案比较阶段,更具有明显的优越性。本文将对动水压力的几个问题,作一探讨,供讨论。

二、动水压力计算

这里提到的动水压力,是指挑(跌)流水舌入水后,作用在河床或衬护底板上的最大动水压力(或称为冲击压力)。它等于总动压减去水垫深度。动水压力在试验室测取,是比较方便的。为了给工程设计提供依据资料,有必要研究动水压力的计算式,以便应用。

(一)动水压力计算式

水舌作用在河床上的动水压力,受诸多因素影响,除受下泄功率(流量,落差)、水垫深度影响外,还有水舌在空中紊动及其在水下扩散制约等因素,而这些又与泄水建筑物的布置及过流方式有关。因此计算动水压力是比较困难的,且目前这方面的研究工作还作的不够深入。

我所根据水舌在水中潜没扩散理论及其表达式,推导出动水压力计算式为:

$$\Delta P_m = Cgz^{1/2}/t \quad (1)$$

式中 ΔP_m —— 动水压力=测压管水头-水深(kPa);

q —— 单宽流量 $m^3/s \cdot m$;

z —— 上下游水位差(m);

t —— 水垫深度(m);

C —— 综合系数。

(1)式说明动水压力与动量、水深有关, C 系数则包括上述其他因素影响。该算式有一定理论依据, 经与国际大坝会议水力学委员会^[1]推荐的算式 $\Delta P_m = A \frac{v^2 d}{2gt}$ 比较, 基本上是一致的, 只是系数不同。该式中 v 为入水流速(m/s), d 为水舌厚度(m), A 为系数。

(二)综合系数 C 的选取

正确合理地选取综合系数 C 是至关重要的, 因为, 从(1)式看, C 值大小, 在一定的水力条件下, 直接反映动水压力值的大小。如前所述, C 值除受水力因素影响外, 还和水舌在空中运动和水下潜没扩散有关, 如水舌集中或扩散、入水角、密实程度、水下扩散角、水下衰减规律等等。因此, 不同的泄水建筑物及其泄流方式, C 值是有变化的。根据我所的研究现将泄洪建筑, 泄流方式和 C 值变化, 综合归纳如表 1 所示。(ΔP_m 以 kPa 计)

表1可以看出, 不同泄洪建筑泄洪(表孔或中孔) C 值是不同的, 而同一泄洪建筑物(如表孔), 因泄流布置方式不同, C 值也是变化的, 甚至相差2~3倍。因此, 计算动水压力时, 要特别注意 C 值的选取, 而不致带来较大的误差。

三、动水压力的允许值

如上所述, 动水压力是坝下冲刷的重要原因, 它的数值计算, 固然值得研究, 在上节中已作了论述。然而, 就工程设计而言, 究竟动水压力应该控制在一个什么范围? 或者说, 动水压力数值允许多大, 才比较合适? 这又是另一个值得研究的问题。根据我们收集到的有关资料分析, 不同的研究者们, 研究结果也不相同, 综合归纳, 有以下几种见解:

1. 给出一个动水压力数值数据进行控制: 如日本学者中川博次提出 $\Delta P_m < 294 \text{ kPa}$, 成都勘测设计研究院肖富仁^[2]等认为 $\Delta P_m = 98.1 \sim 146 \text{ kPa}$ 。

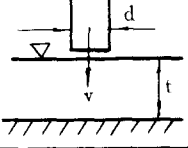
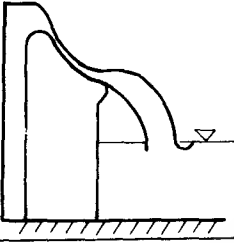

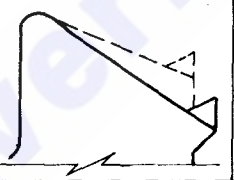
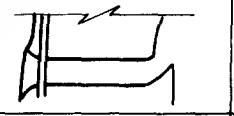

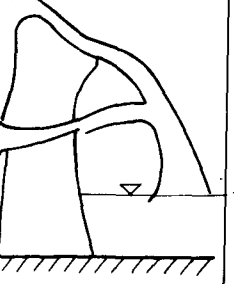
2. 给出动水压力允许值与下游水垫深度关系: 如水利水电科学研究院黄种为同志根据高拱坝试验研究成果, 认为 $0.5 < \frac{\Delta P}{Tt} < 1.5$, 即动水压力约为水垫深度0.5~1.5倍进行控制。

3. 给出动水压力和动量比值关系: 我所^[3]根据国内外已建正建的几个著名工程(如莫西洛克、罗克斯、二滩等)资料进行分析认为: 动水压力 ΔP_m 和动量 ρqv 之比, 约为0.05比较合适。

4. 根据不同的基岩类别, 分别给出动水压力允许值: 我所熊贤录同志, 以国内已建工程大量的原型观测资料为基础, 以著名的陈椿庭局部冲刷公式和动水压力计算式为依据, 按岩基分类, 并得出相应的动水压力允许值如表2。

5. 提出动水压力允许值和岩基工程质量指标的关系式: 作者根据研究成果认为, 允许动水压力与基岩抗冲能力有关, 后者与岩基质量和水垫深度关系密切。

表1 综合系数C值表

泄洪建筑物	泄流方式	图 示	C 值
管 嘴	直 射		16.52
表 孔	连续式挑坎		11.67
表 孔	大差动挑坎		5.52
表 孔	大差动挑坎 加分流齿		4.12(仰角) 3.34(俯角)
中 孔	水平型		10.45
中 孔	差动上翘型		2.11
表 中 孔	水舌碰撞		3.2~1.2*

* : C 值可用 $C = K_1^2 \sin \theta / 2g$

$$K_1 = 0.37(\cos \theta^{0.5}) / \left(\frac{q_2}{q_1 + q_2} \right)^{1.5} \left(\frac{t}{2} \right)^{0.75}$$

式中 q_1 、 q_2 分别为表中孔单宽流量, θ 为入水角, β 为水舌碰撞夹角。

表2 基岩和允许动水压力表

岩基性能	坚硬完整	坚硬、完整性差	软弱破碎
ΔP_m (kPa)	>147~83.4	83.4~34.3	34.3~20.6

当定义基岩不受冲刷时的动水压力为允许动水压力,以 $\Delta P_{允}$ 表之。经计算分析推导出以下计算式: $\Delta P_{允} = 4.63M^{0.72} \cdot t$ (2)

式中 $\Delta P_{允}$ —— 允许动水压力 kPa;

$$M = \frac{k_v}{2940} R_w = \text{岩基工程质量指标};$$

k_v —— 完整性系数;

R_w —— 岩石单轴湿抗压强度 kPa。

分析(2)式可见,基岩强度高,完整性好,则岩基工程质量好(M 值大),允许动水压力大;水垫深,允许动水压力亦大。

考虑到,完整性系数的测试,需要专门声波测验设备,为便于工程应用,将一般的岩石物理力学指标和基岩工程质量指标关系,列入表3。

表3 岩体 M 值及其设计指标

岩体工程质量指标 (M)	纵弹性波速 (m/s)	动弹性模量 $E_d \times 10^5 \times 9.81$ (kPa)	变形模量 $E_0 \times 10^5 \times 9.81$ (kPa)	单位抗力系数 $K_0 \times 98.1$ (kPa)	泊桑比 μ	承载力 $\sigma \times 98.1$ (kPa)	岩体抗压强度 $(R_w) \times 98.1$ (kPa)	内摩擦角 ϕ (°)	凝聚力 $c \times 98.1$ (kPa)
>3	>5500	>70	>20	>1600	0.2	>80	>1000	>70	>40
1~3	4500~5500	50~70	10~20	800~1600	0.25	30~80	400~1000	45~70	15~40
0.1~1	3500~4500	30~50	2~10	160~800	0.3	15~30	100~400	30~45	5~15
0.01~0.1	2500~3500	15~30	0.3~2	30~160	0.35	5~15	15~100	20~30	1~5
<0.01	<2500	<15	<0.3	<30	0.4	<5	<15	<20	<1

举例:已知某工程岩体物理力学性指标为: $V_{pm} = 4500\text{m/s}$, $E_0 = 10 \times 10^5 \times 9.8\text{kPa}$, $K_0 = 800 \times 98\text{kPa}$, $\mu = 0.25$, $R_w = 400 \times 98\text{kPa}$, $\phi = 15^\circ$, $C = 15\text{kg/cm}^2$ 该工程 $Q = 2400\text{m}^3/\text{s}$, 上下游水位差 $Z = 100\text{m}$, 入水宽 $B = 60\text{m}$, $q = 40\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$, 水垫深 $t = 20\text{m}$, 表孔用大差动挑流。

由公式(1)及表1, $\Delta P_m = 5.5 \times 40 \times 10 / 20 = 110\text{kPa}$, 由表4查得 $M = 1$, 代入式(2), $\Delta P_{允} = 4.6 \times 20 \times 1 = 92\text{kPa}$

由于 $\Delta P_m > \Delta P_{允}$, 需减少单宽流量, 或抬高下游水位, 应使 $q \approx 35\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ 或水深增加4m即可满足要求。

四、水舌入水的合理宽度

由于动水压力和单宽流量成正比,在总流量一定的前提下,应当控制水舌入水的合理宽度,因为入水宽度大,则单宽流量小,动水压力亦小,反之亦然。但这并不意味着入水宽度越大越好,因为水利水电工程,大多兴建在深山峡谷,河床多呈V型或近似抛物线型,即使是人工消力塘也多作成梯型。这些河床型态的特点是,随着水面宽度的增加,而水深在岸(边)坡上逐渐减小。我们在设计中,欲使动水压力控制在某一数值范围,必然要求一定的水深;而这一要求水深,在各种河床形态下,必然形成一固定的水面宽(这一宽度小于正常下游水位,形成的水面宽度),这就是我们要求的动水压力为某一定值时的合理入水宽度。可以用以下步骤,进行计算:

设河床形态为抛物线型(如图1),并以下式表之: $y = ax^2$ (3)

动水压力用(1)式表示: $\Delta P_m = Cqz^{1/2}/t$

当总流量为 Q 时,上式改写为 $\Delta P_m = C(Q/2b)z^{1/2}/t_n = CQz^{1/2}/2bt_n$ (4)

当 $b = x_n$ 时, $t_n = t - y_n$ (5)

将(3)、(5)式代入,则

$$\Delta P_m = \frac{CQz^{1/2}}{2x(t-y)} = \frac{CQz^{1/2}}{2x(t-ax^2)} \quad (6)$$

当设计要求控制 $\Delta P_m = A$, 为已知时,将有关水力因素 Q, Z, t 及有关综合系数 C 代入,即可求得合理的入水宽度。

如系其他形态河床,需先求出水面宽和水深关系 $B_n \sim t_n$, 然后代入上式求得合理入水宽度。

举例:某工程的泄洪中孔为差动上翘型,下游为砼衬护,断面为梯形(如图2)

当总流量 $Q = 4000\text{m}^3/\text{s}$, 落差 $z = 64\text{m}$, 下游水深 $t = 30\text{m}$, 要求控制动水压力不超 100kPa , 入水宽度如何?

已知

$$\Delta P_m = \frac{Cqz^{1/2}}{t} = \frac{CQz^{1/2}}{B_n t_n};$$

$$B_n = 20 + 2b \quad (\text{m});$$

$$t_n = t - b = 30 - b \quad (\text{m});$$

由表1, $C = 2.11$, 有关数据代入上式,

$$100 = \frac{2.11 \times 4000 \times 8}{B_n [30 - (\frac{B_n - 20}{2})]}$$

求解得:

$$B_n \approx 40\text{m}, b = 10\text{m}, t = 20\text{m}$$

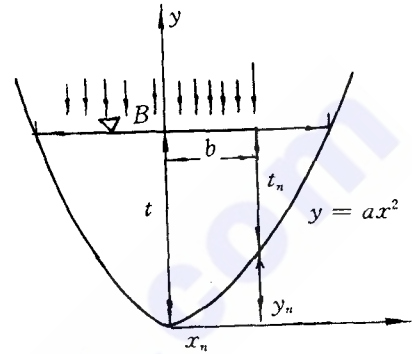


图1 河床形态示意图

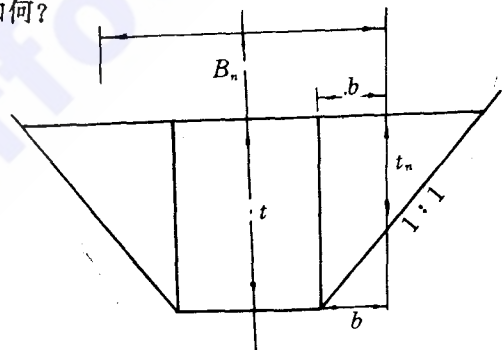


图2 砼衬护断面示意图

五、动水压力和冲坑深度关系

过去一般用冲坑深度和最深点距坝趾的距离,作为衡量标准,以判断消能防冲效果。要求坑距大于或等于三倍冲坑深度。在用动水压力评价消能效果时,有必要讨论动水压力和冲坑关系,从而进一步研究动水压力允许值。这个问题是复杂的,研究中也有一定困难。因为一般原型观测资料中,多为冲深,缺乏动水压力数据,故只能在试验室内进行。由于要求在压相同的地质、地形、不利因素条件下,既测冲坑又测动压,在时间、人力、物力方面需投入大量工作,因此这方面资料不多,少有报导。

我所结合二滩电站,进行了这一问题的系统试验,并初步取得了可喜的成果。通过试验,建立了如下关系式:

$$T = \eta \frac{t^{0.975} z^{0.025}}{[A - \sqrt{\frac{\Delta P_m}{\gamma t}}]}$$

式中 系数 η 为:当堰上水头 $H > 12\text{m}$ 时, $\eta = 5.36$, $A = 3.53$; 当堰上水头 $H < 12\text{m}$ 时, $\eta =$

4. 0, $A=3.17$.

应当指出,这一成果是用散粒体模拟基岩进行冲刷试验的,有粒径变化小,应用时,可能有些误差,不过,这一计算式所计算的结果,是偏于安全的。如欲取得更精确的成果,尚需进行大量的补充研究工作。

六、结 语

1. 研究有关动水压力的几个问题,不仅对工程有益,而且对试验室的研究工作本身,也有现实意义。

2. 本文给出的动水压力计算式,简明易行,是可信的。综合试验成果,导出因过流条件不同的系数 C 值,可供参考选用。

3. 关于动水压力允许值用(2)式表达,是可行的,其物理意义明确清楚。

4. 本文给出的有关水舌入水的合理宽度的计算方法和步骤,在工程水力设计中,确定控制动水压力数值后,可以应用。

5. 本文所述动水压力与冲坑深度关系及其表达式,是初步研究成果,但也是工程设计需要的成果,可供参考。

以上几个问题的更深入细致的试验研究工作,尚需在理论上探求,实验中进一步开展,以期获得更加符合实际的研究成果,并应用于工程水力设计中去,满足水电建设的要求。

参 考 文 献

- 1 国际大坝会议水力学委员会,溢洪道设计(成都勘测设计院译)1985年
- 2 肖富仁,二滩水电站泄洪消能简介高坝泄洪与消能专题文集1989.12
- 3 杨国瑞,溢流拱坝表孔布置和动水压力高坝泄洪与消能专题文集1989.12

南桧河各待建梯级电站即将兴建

南桧河长49.5km的干流,集中落差达1714m,可开发水力资源700MW,年发电量达31.2亿kW·h枯期出力达420MW,有效电量为年有效电量的2/3以上,经济效益显著,指标十分优越。目前已建两级水电站装机,140MW,其余四级总装机容量近600MW,亟待开发。我省缺煤、少气(天然气),大力发展我省丰富的水力资源已势在必行。

为加快南桧河各待建梯级电站的开发,由四川省电力工业局投资,开展前期勘测设计工作。梯级龙头水库泊勒与第四级姚河坝两级水电站的初步设计报告已先后审查通过;第五级栗子坪水电站的初步设计工作亦即将展开。为争取泊勒与姚河坝两电站尽快立项兴建,省电力局于1992年10月7~14日请中国国际工程咨询公司主持了带预评估性质的“南桧河梯级电站咨询调研会”,邀请各有关专业13位专家参加,国家能源投资公司与省有关部门的代表出席了会议。成勘院在会上详细介绍了两电站的勘测设计情况。经现场查勘,与会代表对两电站的设计给予好评,并对主要技术问题与建设准备作了技术咨询。第一期工程泊勒与姚河坝两电站的投资协议已经签定,有关施工准备工作已陆续开展,两电站的全面动工指日可待。

(成勘院 李玉池)

长江三峡工程学术报告会

省水电学会成勘院分会,水能规划及动能经济专委会与四川省水利学会成勘院分会,省水利学会水文专委会,省环境学会环评专委会于1992年10月15日联合邀请重庆大学资源与环境工程学院副院长,三峡开发研究中心副主任,省科技顾问团顾问顾恒岳教授作了“长江三峡工程与库区建设”学术报告会。参加会议共37人。顾恒岳教授就三峡工程的泥沙问题、环境影响问题、防洪问题的讨论情况进行了详细的阐述,并介绍了环境影响方面的国内外信息。

(成勘院张登仕)