

# 混凝土重力坝下渗透压力的简化计算

兰仁烈

(水电部成都勘测设计院)

按材料力学的基本假定,用叠加法原理分部计算渗透压力是当前常用的计算方法。但是渗透压力呈局部形状时有些公式仍比较长、分散,尤以尾水位以下部分的公式仍比较繁琐。

本文主要作了如下几点改进:1.用图解法求系数;2.提出局部呈三角形、矩形统一格式的计算式(如表1);3.提出了含有抽排减压情况下渗透压力计算的设想。经过验算,其结果与原法基本一致,满足精度的要求。

为了进一步说明这些公式,我们将扬压力一些基本原理,在此略予叙述(详见参考文献(1))。

## 一、扬压力的假定和计算采用的基本原理

### (一) 扬压力的假定

扬压力通常由两部分组成,即浮托力(有尾水的情况)和渗透压力(见图1)。浮托力在计算中比较简单,由于本身呈矩形分布,对考虑浮托力的应力,可简单地从正应力减去浮托力的强度而得,也就是图1的I部分。

渗透压力的分布比较复杂,例如图1的第II部分,按照重力坝规范的规定,假定呈折线型分布,目前常见的有以下四种(见图2(a), (b), (c), (d))。

在图2中的(a), (b)型式较为常见; (c)的情况多在坝体帷幕前部有开裂时出现;而(d)多在尾水较深而采用抽排减压等情况时出现。

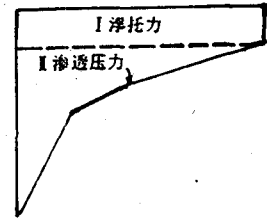


图 1

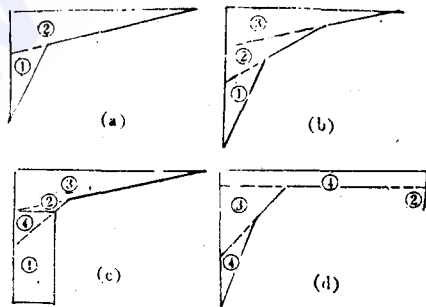


图 2

### (二) 计算采用的原理和方法

每种情况的计算均采用材料力学原理,按照扬压力的假定的图形以叠加法求得。至于在全截面内呈三角形的渗透压力,例如图2(a)的②区,按照块体平衡条件各正应力之间渗压强度相等且方向相反,计算也甚为简单。在此仅将计算中最复杂的,也较为常见的渗透压力局部呈三角形和矩形的计算方法加以说明,以供探讨。

局部呈三角形或矩形渗透压力在水平截面上的渗透应力计算, 第一步通常把其力当作外荷载看待, 按照一般力学的计算方法, 求其在计算截面上的垂直正应力。当垂直正应力求出后再与渗透压力相叠加, 得到竖向力(总应力)  $\sigma_y + P_x$  ( $P_x$  为  $x$  点处的渗透压力), 有了总应力后即可将其他的应力  $\tau$  及  $\sigma_x$  求出

1. 垂直正应力 渗透压力局部呈三角形或矩形的计算式(图 3(a), (b))。由于假定呈直线分布, 故得到的无因次的垂直应力算式仍可用:

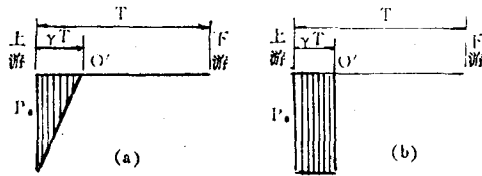


图 3

$$\sigma_y = a' + b'x' \quad (1)$$

式中  $x' = x/T$  ( $x$  从下游面起算)。

三角形:  $a' = P_0\gamma(1-\gamma)$

$$b' = P_0\gamma(2\gamma-3)$$

矩形:  $a' = P_0\gamma(2-3\gamma)$

$$b' = -6P_0\gamma(1-\gamma)$$

式中  $P_0$ —迎水面渗透压力的强度;

$\gamma$ —渗透压力消失点至迎水面的距离和坝体断面总长度  $T$  的比值(小于 1.0)。

另(a), (b)两种图形的  $\gamma$  值, 可以不同, 此地暂以同一  $\gamma$  代之。

2. 剪应力 求出垂直应力后, 可按微分块的关系求出剪应力  $\tau$ 。此时坝体块上的竖向力是  $\sigma_y + P_x$  的叠加值。由于  $\sigma_y + P_x$  的图形呈折线状, 不连续, 则不易找出一个简单函数式来表示。故推导公式以渗透压力消失点  $O'$  为界, 划分左右两段分别予以计算较为简单。为了取得统一的表达式, 并假定各高程渗透压力消失点的轨迹为一直线, 且与上下游坝坡交于一点〔1〕。那么消失点  $O'$  一侧, 即  $0 < x < (1-\gamma)T$  之间, 剪应力表达式为  $a_1 + b_1x + c_1x^2$ 。消失点的另一侧即  $(1-\gamma)T < x < T$  之间(含有竖向力作用区), 剪应力除含有  $a_1 + b_1x + c_1x^2$  表达式外, 还要再加上由  $P_x$  在此部位产生的剪应力  $\overline{a_1} + \overline{b_1}x + \overline{c_1}x^2$  (式中  $x$  为从消失点  $O'$  起到迎水面的距离)。 $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$  系由  $P_x$  产生的应力常数。如果以无因次应力常数表示, 则有:

(1) 在  $0 < x' < (1-\gamma)$  之间

$$\tau = a_1' + b_1'x' + c_1'x'^2$$

(2) 在  $(1-\gamma) < x' < 1.0$  或  $0 < x'' < \gamma$  之间

$$\tau = a_1' + b_1'x' + c_1'x'^2 + a_1'' + b_1''x'' + c_1''x''^2$$

式中  $x' = \frac{x}{T}$  ( $x$  系从下游面为起点)  $x'' = \frac{x}{T}$  ( $x$  系从系渗透压力透失点  $O'$  为起点)。

$a_1'$ 、 $b_1'$ 、 $c_1'$  为渗透压力作外荷载, 在水平计算截面上产生的无因次应力常数。

$a_1''$ 、 $b_1''$ 、 $c_1''$  系由  $P_x$  在其作用区的水平截面上产生的无因次应力常数。

3. 水平正应力 水平正应力与剪应力求法相同, 从隔离体的平衡条件求出, 以  $O'$  为起点分为左右两段, 同理以无因次应力常数表示, 可写为

(1) 在  $0 < x' < (1-\gamma)$  之间

$$\sigma_x = a_2' + b_2'x' + c_2'x'^2 + d_2'x'^3 \quad (4)$$

(2) 在  $(1-\gamma) < x' < 1.0$  或  $0 < x'' < \gamma$  之间

$$\sigma_x = a_2' + b_2'x' + c_2'x'^2 + d_2'x'^3 + a_2'' + b_2''x'' + c_2''x''^2 + d_2''x''^3 \quad (5)$$

其表示符号与剪应力解释类同。同理渗透压力局部呈矩形的图形，亦可得出同样的计算式，其中只是常数不同而已。

## 二、渗透压力的无因次系数和改进后的应力算式

### (一) 渗透压力的无因次系数

渗透压力的无因次系数与重力坝应力常数很相似，但是也有不同。例如(1)~(5)式的应力常数是有单位的；而新公式是几种无单位的数字的组合，本文称作“无因次系数”。

无因次系数是随渗透压力假定的图形而变更。除此以外，还有尾水位以上和尾水位以下之分，所以每种图型的系数组合也不同，计算时要加区别。但是这些系数都与 $\gamma$ 有关系，这里有六个值如 $\alpha$ 、 $\alpha_1$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $M$ 、 $N$ 等，除 $M$ 以外均与 $\gamma$ 有关系，实际上是 $\gamma$ 的函数。更重要一点，这6个值适合每种图形的无因次系数。为此我们可以通过如上5个值与 $\gamma$ 的关系曲线，求出各种情况的无因次系数，以助求出各种应力常数，达到简化计算的目的。

### (二) 渗透压力引起的坝体渗透应力算式

根据渗透压力的特点，笔者对其算式提出新的看法，认为采用曲线辅助的办法，可以很快得出渗透压力的计算成果。

由于将式内的无因次应力常数，改为无因次系数，表达式简单，可用图表求之。当表达式求出后再乘以应力因数，即可直接求出局部呈三角形和矩形分布的渗透压力引起的应力常数。

在公式推演中假定了水库水深等于计算断面以上的坝高(1)(此种假定偏于保守)。由于这种假定库水面到计算截面的深度可简化为 $y_0 \div T / (m+n)$ 。(T为计算截面的宽度， $y_0$ 为水库水深，实际在此处等于截面以上的坝高)。

由此导出的应力关系式如下：

#### 1. 局部呈三角形分布

##### (1) 尾水位以上

$$\sigma_y = P_0 \alpha (1 - Ax') \quad (6)$$

$$\tau = P_0 \alpha m (1 + (M - A)x') + P_0 m / \alpha \alpha_1 \times (Nx'') \quad (7)$$

$$\sigma_x = P_0 \alpha m^2 (1 + (2M - A)x') + P_0 m^2 / \alpha \alpha_1 \times (Nx'') - P_0 / \alpha \alpha_1 x'' \quad (8)$$

##### (2) 尾水位以下

$$\sigma_y = P_0 \alpha_1 (1 - Ax') \quad (9)$$

$$\tau = P_0 \alpha m (1 - Ax' + \frac{1}{2} M Ax'^2) + P_0 m / \alpha \alpha_1 \times (Nx'' - \frac{1}{2} M x''^2) \quad (10)$$

$$\sigma_x = P_0 \alpha m^2 (1 - Ax' + M Ax'^2 + \frac{1}{3} AM^2 x'^3) + P_0 m^2 / \alpha \alpha_1 \times (N^2 x'' - MN x''^2 + \frac{1}{3} M^2 x''^3) - P_0 / \alpha \alpha_1 x'' \quad (11)$$

## 2. 局部呈矩形分布

## (1) 尾水位以上

$$\sigma_y = P_0 \alpha (\beta - 6x') \quad (12)$$

$$\tau = P_0 \alpha m (B + (BM - 6)x' + P_0 m (N + Mx'')) \quad (13)$$

$$\sigma_x = P_0 x m^2 (B + (2BM - 6)x' + P_0 m^2)(N^2 + 2NMx'') - P_0 \quad (14)$$

## (2) 尾水位以下

$$\sigma_y = P_0 \alpha (B - 6x') \quad (15)$$

$$\tau = P_0 \alpha m (B - 6x' + 3Mx'^2) + P_0 m N \quad (16)$$

$$\sigma_x = P_0 \alpha m^2 (B - 6x' + 6Mx'^2 - 2M^2x'^3) - P_0 m^2 N^2 - P_0 \quad (17)$$

式中  $\alpha = \gamma (1 - \gamma)$

$$\alpha_1 = 1 / (1 - \gamma)$$

$$A = 2 + \alpha_1$$

$$B = 3 - \alpha_1$$

$$M = 1 + n/m$$

$$N = 1 - M/\alpha_1$$

其他符号意义同前。(6)~(11)式和(12)~(17)式,其中 $\gamma$ 值可用作相同或不同情况。如果用于不同情况,两种系数要分部计算。

若两者 $\gamma$ 值完全相同除可用(6)~(17)式计算外,也可将(12)~(17)式内含的 $B$ 值消掉计算;更为简单,不再赘述。

无因次系数均可用曲线求之。我们得出 $(\alpha, \alpha_1, A, B, N) \sim \gamma$ 关系曲线,如图4、5所示。图4是用来求 $\alpha, \alpha_1, A, B$ 的,当 $\gamma$ 已知后,就可一次查出4个相应的系数值。图5是 $N$ 与 $\gamma$ 的关系曲线,当 $M$ 知道后,即可查出 $N$ 。其速度要比一般算法快捷。有了各种系数即可照表1计算各种情况的无因次系数,代入(1)~(5)式就可求出各种情况的渗透应力。

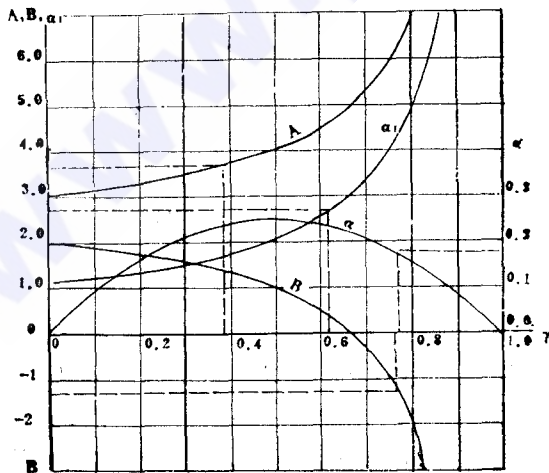


图4  $\alpha, \alpha_1, A, B$ 系数与 $\gamma$ 的关系曲线

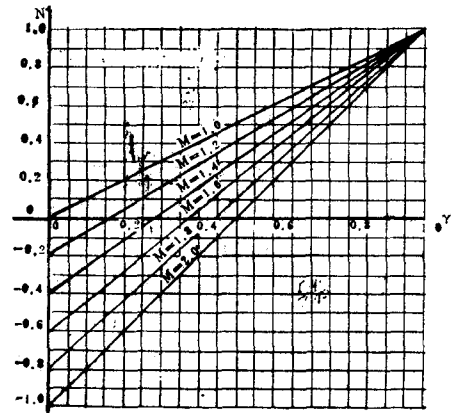
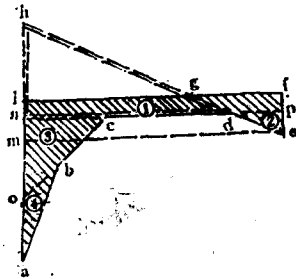


图5  $N \sim \gamma$ 关系曲线

3. 关于复杂渗透压力图形的叠加问题 由于扬压力出现的不同、其图形的变化也各有不同，在图2中提出的四种情况，有些图形要注意符号。譬如图2(c)的④区就要用反方向的符号，否则就要重复。而(d)更为复杂，我们以图6示之。此种图形一般在抽排减压时出现。现在已在多数工程中应用(1985年第三期《水力发电》已对重力坝规范作了补充规定)。此图主要由①，②，③，④四种图形而成。但是要得到这种图形，必须由几种图形叠加而成。



6图

设以影线部分为负方向：

- 第一步：先给浮托力  $mefl$ ;
- 第二步：以正方向叠加  $meh$ ;
- 第三步：以负方向叠加  $ndh$ ;
- 第四步：绘出新的浮托动力  $npfl$ ，即①区；
- 第五步：绘出尾水局部负三角  $dep$ ，即②区；
- 第六步：叠加负三角形  $noc$ ，即③区；
- 第七步：叠加负三角形  $oab$ ，即④区。

也就是说要得到图6，就要经过七道工序才能实现，虽然计算工作量比较大，但对复杂的图形的渗透压力来说，仍不失一种切合实际的解决办法。

(三) 算例

设其坝体断面尺寸如图7(a)，其渗透压力如图7(b)，(c)。(b)系假定无尾水压力情况；(c)系假定有尾水压力情况。求两种情况下，渗透压力局部呈三角分布，对坝体产生的应力。

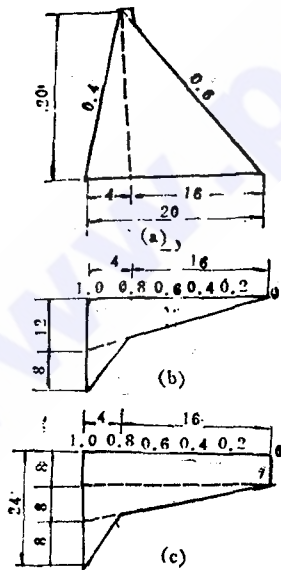


图7

解：由于  $\gamma = 4/20 = 0.2$ ，故知消失点部位在0.8坐标处。

$$M = 1 + 0.4/0.6 = 1.6667$$

以0.2查图4、5得

$$\alpha = 0.16, \alpha_1 = 1.25,$$

$$A = 3.25, B = 1.75, N = -0.3333.$$

将查得的各项系数，其无因次系数将列于表1横线上部。

$$\text{又算得应力因数 } P_0\alpha = 1.28, P_0\alpha m = 0.7680, P_0\alpha m^2 = 0.4608,$$

$$P_0 m / \alpha \alpha_1 = 24 P_0 m^2 / \alpha \alpha_1 = 14.4, P_0 / \alpha \alpha_1 = 40$$

(以上数字有压强单位)，各放入表1第三栏相应的部位。以应力因数乘以横线上部无因次系数，即得出无因次应力常数放入横线下部。有了横线下部的应力常数代入(1)~(5)式，并将其坐标代入即可得出各部位的渗透应力。

以上算例按表1格式计算，将坐标代入后得局部呈三角分布的渗透应力结果(表2从表内可以看出除水平正应力  $\sigma_x$  在尾水位以上部分有出入外，其它两种方法计算结果1)，基本一致。

表1 渗透压力局部呈三角形、矩形分布产生的无因次应力常数计算表

部位	应力	应力因数	形状	作为外荷载产生的无因次系数												由渗压强度产生的无因次系数					
				a'	b	a1'	b1'	c1'	a2'	b2'	c2'	d2'	a''	b''	a1''	b1''	c1''	a2''	b2''	c2''	d2''
尾水部位以上	σ <sub>x</sub>	14.4	三角形	1	-3.25	1	-3.25	2.703	1	0.0834	0	0	0	0	0	0.1111	0	0	0		
				1.28	-4.16	0.7680	-1.216	2.080	0.4608	0.0384	0	0	0	0	0	0	1.60	0	0	0	
尾水部位以下	σ <sub>y</sub>	24	三角形	1	-3.25	1	-3.25	2.703	1	0.0834	0	0	0	0	0	-1	0	0	0		
				1.28	-4.16	0.7680	-2.496	2.080	0.4608	0.0384	0	0	0	0	0	-40	0	0	0		
尾水部位以下	σ <sub>x</sub>	1.44	三角形	1	-3.25	1	-3.25	2.703	1	0.0834	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
				1.28	-4.16	0.7680	-2.496	2.080	0.4608	0.0384	0	0	0	0	0	1.60	0	0	0		
尾水部位以下	σ <sub>x</sub>	40	三角形	1	-3.25	1	-3.25	2.703	1	0.0834	0	0	0	0	0	-1	0	0	0		
				1.28	-4.16	0.7680	-2.496	2.080	0.4608	0.0384	0	0	0	0	0	-40	0	0	0		



表 2 局部呈三角形渗透压力计算成果表

坐标 应力	$x'$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
	$x''$					0	0.2
$\sigma_y$	尾水位以上	1.28 (1.28)*	0.448 (0.448)	-0.384 (-0.384)	-1.216 (-1.216)	-2.048 (-2.048)	-2.88 (-2.88)
	尾水位以下	1.28 (1.28)	0.448 (0.448)	-0.384 (-0.384)	-1.216 (-1.216)	-2.048 (-2.048)	-2.88 (-2.88)
$\tau$	尾水位以上	0.7680 (0.7680)	0.5248 (0.5248)	0.2816 (0.2816)	0.0384 (0.0384)	-0.2048 (-0.2048)	-2.048 (-2.048)
	尾水位以下	0.7680 (0.7680)	0.3520 (0.3520)	0.1024 (0.1024)	0.0192 0.192	0.1024 (0.1024)	-2.048 (-2.048)
$\sigma_x$	尾水位以上	0.4608 (0.4608)	0.4685 (0.40704)	0.4762 (0.35328)	0.4838 (0.29952)	0.4915 (0.24576)	-7.1808 (-7.808)
	尾水位以下	0.4608 (0.4608)	0.25003 (0.25003)	0.17237 (0.17238)	0.16127 (0.16129)	0.15017 (0.1502)	-7.1808 (-7.1808)

\* 括号内数字见参考文献〔1〕

## 参 考 文 献

- 〔1〕潘家铮：重力坝的设计和计算，中国工业出版社，1985年9月  
 〔1〕潘家铮主编，汝乃华编著：《重力坝》，水利电力出版社，1983年5月  
 〔3〕《混凝土重力坝设计规范》SDJ-21-78(试行)，水利电力出版社，1978年  
 〔4〕《重力坝设计》美国垦务局，长江流域规划办公室译，水利电力出版社，1981年  
 〔5〕《Uplift in Gravity Dams》，Leliarsky.s 1947

(上接 36 页)

各专(工)委推荐经学会聘任的第二届编委名单。

省科协王少湘同志在会上作了热情的发言，并对当前期刊整顿精神与办刊条件进行了详细的介绍。

随后，副主编林三益教授介绍了第二届编委会的筹备过程；主编李远惠高级工程师作了第一届编委会五年来的工作总结了今后工作的发言。

华国祥教授、蔡家鲤高级工程师等对《四川水力发电》五年来在不断提高刊物质量和为四化建设服务方面所做出的成绩给予了充分评价，对今后工作寄予了殷切的希望。

与会同志对《四川水力发电》编委会五年来的工作总结与今后工作安排和办刊宗旨、不断提高刊物质量、选题与组稿等问题，以及编辑部代表编委会草拟其它六个规章制度进行了热烈的讨论。

与会全体同志对上届学报编委会在五年来为办好《四川水力发电》所付出辛勤的、创造性的劳动，表示了诚挚的谢意。并希望第二届编委会在此良好的基础上发扬光大，把《四川水力发电》办得更好！

(唐)