

重力坝应力分析—边界应力法

兰仁烈

(水电部成都勘测设计院)

编者按:本文提出的利用边界应力求坝内水平正应力的改进方法,大大简化了以往的繁琐计算工作。全文不到四千字,短小精练,解决实际问题,不失为一篇有实用价值的好文章。文章写得既短又说明问题,论点明确,实用性强,这是办好本刊与作者们共同努力的基本方向。

重力坝应力分析法是重力坝计算中常用的方法,计算一般分为两步,第一步先确定边界应力。由于边界应力大都是控制应力,而且求法简单,边界应力明确,坝体应力就有一个概括了解。随着工作的深入,特别是高坝,仅第一步计算结果已不能满足要求,则需要了解坝体内部的应力。但是这一部分的计算工作量较大,特别是水平正应力计算工作量尤甚。目前虽有一些改进方法,但是仍比较繁杂。本文提的方法是在边界应力计算结果的基础上,求解坝体的内部应力,计算工作量可以减少。

我们知道重力坝的边界应力可用下列各式直接求出。上、下游边界垂直正应力:

$$\sigma_{yU} = \Sigma W/T + 6\Sigma M/T^2 \quad (1)$$

$$\sigma_{yD} = \Sigma W/T - 6\Sigma M/T^2 \quad (2)$$

上、下游边界剪应力:

$$\tau_U = (P + P_y - \sigma_{yU})n \quad (3)$$

$$\tau_D = (\sigma_{yD} - P' + P'_y)m \quad (4)$$

上、下游边界水平正应力:

$$\sigma_{xU} = P + P_y - \tau_U n \quad (5)$$

$$\sigma_{xD} = P' - P'_y + \tau_D m \quad (6)$$

式中 P, P_y ——上游面水压力和地震水压力;
 P', P'_y ——下游面水压力和地震水压力;
 n, m ——上、下游坝面坡度;
 T ——计算断面厚度。

众所周知,在重力坝的应力分析法中,垂直正应力成直线变化,剪应力成二次抛物线变化,水平正应力成三次抛物线变化,其通式以无因次式可表示成:

$$\sigma_x = a' + b'x' \quad (7)$$

$$\tau = a_1' + b_1' x' + c_1' x'^2 \quad (8)$$

$$\sigma_x = a_2' + b_2' x' + c_2' x'^2 + d_2' x'^3 \quad (9)$$

其中: $x' = x/T$, a' , b' , a_1' , b_1' , c_1' , a_2' , b_2' , c_2' , d_2' 通称为应力常数、这些常数之间有一定的联系, 而且均可用边界应力表示出。例如(8)式中的剪应力常数可表示为:

$$a_1' = \tau_D \quad (11)$$

$$b_1' = -2\tau_U - 4\tau_D - 6\Sigma V/T \quad (10)$$

$$c_1' = 3\tau_U + 3\tau_D + 6\Sigma V/T \quad (12)$$

从式(10)~(12)可知, 剪应力常数是由上、下游边界应力 τ_U , τ_D 和 $\Sigma V/T$ 组成。 ΣV 是水平推力, 可直接求出。

既然剪应力的应力常数可用边界应力组成。那么计算公式中最复杂的水平正应力 σ_x 的各项应力常数也可用边界应力 σ_{XU} , σ_{XD} , τ_U , τ_D 及 $\Sigma V/T$, $\Sigma M/T^2$ 组成(ΣM 是计算断面重心的合力矩)。

我们知道在应力分析法的各公式内, 主要由应力与坝体几何形状两方面的关系式形成。在应力方面有 $\Sigma W/T$, $\Sigma M/T^2$, $\Sigma V/T$, P , P' , P_y , P_y' , $W_c T$, $W_w T$, $\lambda W_c T$ 等, 几何形状方面主要有 T , m , n 等, 我们利用应力和几何形状的关系式, 找出边界应力 σ_{XU} , σ_{XD} , τ_U , τ_D , $\Sigma V/T$, $\Sigma M/T^2$ 与几何形状 m , n , T 的关系式, 以达到简化计算的目的, 经过推演, 最后得出水平正应力的无因次应力常数与边界应力的关系式如下:

$$a_2' = \sigma_{XD} \quad (13)$$

$$b_2' = -4m\tau_U - (8m - \partial m / \partial x \cdot T/m)\tau_D - 12 \cdot m^2 \Sigma M/T^2 - 12 \cdot m \Sigma V/T$$

$$-W_w T m^* + W_c T m - \lambda W_c T + m T \partial P_y / \partial x \quad (14)$$

$$c_2' = 3 \sigma_{XU} - 3 \sigma_{XD} + (8m + 8n - \partial n / \partial x \cdot T/n)\tau_U + (16m + 4n - 2 \partial m / \partial x \cdot T/m)$$

$$\tau_D + 12(n^2 + 2m^2)\Sigma M/T^2 + 12 \times (2m + n)\Sigma V/T + W_w T(2m^* - n^{**}) + W_c T$$

$$(n - 2m) + 3\lambda W_c T - n T \partial P_y / \partial x - 2m T \partial P_y' / \partial x \quad (15)$$

$$d_2' = -2 \sigma_{XU} + 2 \sigma_{XD} - (8n + 4m - \partial n / \partial x \cdot T/n)\tau_U - (8m + 4n - \partial m / \partial x \cdot T/m)$$

$$\tau_D - (n^2 + m^2) \cdot 12 \Sigma M/T^2 - 12 \cdot (n + m)\Sigma V/T + W_w T(n^{**} - m^*) + W_c T$$

$$(m - n) - 2\lambda W_c T + n T \partial P_y / \partial x + m T \partial P_y' / \partial x \quad (16)$$

式中 W_w ——混凝土容重;

W_c ——水容重;

λ ——地震系数，一般取0.1；

•——下游坝面无水时该项去掉，此时 $\partial P_y' / \partial x$ 亦为零；

另外无因次应力常数 b' 、 b_1' 、 c_1' 及 b_2' 、 c_2' 、 d_2' 可列表计算比较清楚，其型式如表1。

••——上游坝面无水时该项去掉，此时 $\partial P_y / \partial x$ 亦为零。

表1 应力常数计算表

边界应力常数	b'	b_1'	c_1'	b_2'	c_2'	d_2'
σ_{xU}	0	0	0	0	3	-2
σ_{xD}	0	0	0	0	-3	2
τ_U	0	-2	3	-4m	$\frac{8m+8n}{\partial x} \cdot \frac{T}{n}$	$\frac{-8n-4m}{\partial x} \cdot \frac{T}{n}$
τ_D	0	-4	3	$-8m + \frac{\partial m}{\partial x} \cdot \frac{T}{n}$	$-2 \frac{\partial m}{\partial x} \cdot \frac{T}{m}$	$\frac{-8m-4n}{\partial x} \cdot \frac{T}{m}$
$\frac{12\Sigma M}{T^2}$	1	0	0	$-m^2$	n^2+2m^2	$-n^2-m^2$
$\frac{6\Sigma V}{T}$	0	-1	1	-2m	4m+2n	-2n-2m
$W_w T$	0	0	0	$-m^*$	$2m^*-n^{**}$	$n^{**}-m^*$
$W_c T$	0	0	0	m	n-2m	m-n
$\lambda W_c T$	0	0	0	-1	3	-2
				$mT \frac{\partial P_y'}{\partial x}$	$\frac{-nT \partial P_y / \partial x}{-2mT \partial P_y' / \partial x}$	$\frac{nT \partial P_y / \partial x}{+mT \partial P_y' / \partial x}$

•——下游坝面无水时该项去掉，此时 $\partial P_y' / \partial x$ 亦为零

••——上游坝面无水时该项去掉，此时 $\partial P_y / \partial x$ 亦为零

从表1可以看出，已知 σ_{xU} 、 σ_{xD} 、 τ_U 、 τ_D ，用(1)式和(11)式得出 $12\Sigma M/T^2$ 、 $6\Sigma V/T$ 后，即可较容易地将各种应力常数求出。

举例：如图(1)求计算截面I—I的 σ_y 、 τ 、 σ_x 。

设已知:

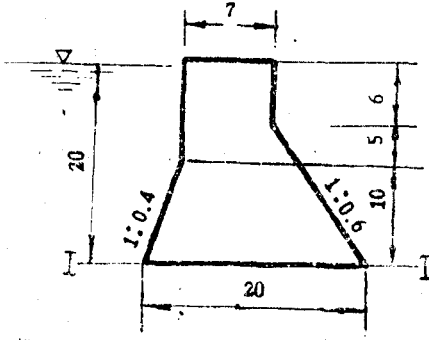


图 (1)

$$\begin{aligned} \Sigma W/T &= 31.14 \text{ 吨/米}^2 \\ \Sigma V &= -200 \text{ 吨} \\ 6\Sigma M/T^2 &= -3.81 \text{ 吨/米}^2 \\ P &= 20 \text{ 吨/米}^2 \\ W_c &= 2.4 \text{ 吨/米}^3 \\ W_w &= 1.0 \text{ 吨/米}^3 \end{aligned}$$

无尾水, 也不计算地震的影响。

第一步, 由 (1)~(6) 式求出边界应力:

$$\begin{aligned} \sigma_{yU} &= \Sigma W/T + 6\Sigma M/T^2 = 31.14 + (-3.81) = 27.33 \text{ 吨/米}^2 \\ \sigma_{yD} &= \Sigma W/T - 6\Sigma M/T^2 = 31.14 - (-3.81) = 34.95 \text{ 吨/米}^2 \\ \tau_{U} &= (P + P_y - \sigma_{yU}) n = (20 - 27.33) \times 0.4 = -2.932 \text{ 吨/米}^2 \\ \tau_{D} &= (\sigma_{yD} - P' + P_y') m = (34.95 - 0) \times 0.6 = 20.97 \text{ 吨/米}^2 \\ \sigma_{xU} &= P + P_y - \tau_{U} n = 20 - (-2.932 \times 0.4) = 21.173 \text{ 吨/米}^2 \\ \sigma_{xD} &= P' - P_y' + \tau_{D} m = 20.970 \times 0.6 = 12.582 \text{ 吨/米}^2 \end{aligned}$$

计算步骤为:

1. 将边界应力放于表 2 第 1 列;
2. 按照坝面上、下游坡度, 照表 1 简化式求出各列之值放于表 2 相应位置中横线的上部;
3. 将第 1 列所得的值乘以横线上部之数, 放于横线下部;
4. 将横线下部各数叠加, 即为所求无因次应力常数;
5. 将无因次应力常数代入式 (7)~(9), 并将坐标值代入即可得出任一点的应力。

表 2 即为无因次应力常数计算结果。为了节省篇幅应力计算从略。

表 2 无因次应力常数计算表

边界 应力	应力常数					
	b'	b_1'	c_1'	b_2'	c_2'	d_2'
21.173					3	-2
					63.5190	-42.346

(续上表)

12,582					-3	2
					-37.746	25.164
-2,932		-2	3	-2.4	8.0	-5.60
		5.864	-8.796	7.0368	-23.450	16.419
20,970		-4	3	-4.80	11.2	-6.40
		-83.88	62.91	-100.656	234.864	-134.208
-7.62	1			-0.36	0.88	-0.52
	-7.62			2.743	-6.7056	3.9624
-60		-1	1	-1.2	3.20	-2.0
		60	-60	72	-192	120
20					-0.40	0.40
					-8.0	8.0
48				0.6	-0.80	0.2
				28.8	-38.40	9.6
0				-1	3	-2
				0	0	0
Σ	-7.62	-18.016	-5.886	9.924	-7.925	6.591

参 考 文 献 (略)

《水工隧洞设计规范》已审批付印

由水电部成都勘测设计院负责编修的《水工隧洞设计规范》经上级批准付印, 预计1985年上半年印妥发行。

本规范是以1966年水电部颁发的《水工隧洞设计暂行规范》为依据, 并在该规范多年来总结实践经验的基础上进行编写修订的。新编修规范正文共分九章、119条; 十个附录中新增加有围岩分类、水力设计、不衬砌和喷锚支护以及电算程序等内容。

本规范还另有编写说明、专题研究报告等, 可供用时参考。

根据上级要求, 拟在今年下半年由水电部成勘院举办规范学习班, 届时给学员提供有关隧洞的工程总结和电算程序等大量参考资料。

水电部成勘院段乐斋供稿

1985.6