

库水位骤降期土石坝边坡稳定分析 总应力法的计算步骤

陈 祖 煜

(水利水电科学研究所)

(一) 概 述

最近批准试行的《碾压式土石坝设计规范》(以下简称《规范》),对土石坝边坡稳定分析的总应力法作了如下规定^[1]:

粘性土填土在施工期和库水位降落期的抗剪强度,在某些情况下也可用总应力法按下式确定:

对施工期:

$$\tau = C_u + \sigma' \operatorname{tg} \phi_u, \quad (1)$$

对库水位降落期:

$$\tau = C_{cu} + \sigma'_0 \operatorname{tg} \phi_{cu}, \quad (2)$$

式中: τ —— 土体的抗剪强度;

C_u 、 ϕ_u —— 不排水剪总强度指标;

C_{cu} 、 ϕ_{cu} —— 固结不排水剪总强度指标;

σ'_0 —— 库水位降落前的法向有效应力。

但应注意的是,按式(2)库水位降落时的粘性土的抗剪强度是由库水位降落前的法向有效应力 σ'_0 决定的,而不是由降落时的法向有效应力或总应力决定的。这就决定了在库水位降落时用总应力法进行边坡稳定分析的独特具体计算步骤。

为了阐明这一概念,笔者在参考文献[2]中,详细讨论了式(2)的理论背景。本文拟以美国陆军工程师团在《工程设计手册》中的图VI-10为例^[3](参见图1),介绍库水位降落时总应力法的具体计算步骤。为了便于和原文对照,本文引用了原文中的数据,故使用了英制单位。由于库水位降落时总应力法的计算过程比常规的方法繁复,笔者也以本例作为课题,编制了电算程序。在下面的叙述中,一并介绍电算复核的结果。

(二) 计算实例与具体计算步骤

如图1所示的均质土坝,求解在库水位降落时的稳定安全系数。

土的固结不排水强度指标(R剪)为 $C_{cu} = 1.2$ 磅/英尺², $\phi_{cu} = 16^\circ$;固结排水强度指标(S剪)为 $C'_d = 0$, $\phi'_d = 30^\circ$,均在图1左上角示出。R线与S线的交点相应的 σ 值为 $\sigma'_i = 4.13$ 磅/英尺²。

在文献[2]中已经介绍过,陆军工程师团从安全考虑,认为当 $\sigma' < \sigma'_i$ 时,用R剪所得的强度反而比S剪高,这个较高的强度是不可靠的,故建议在此区域采用较低的S剪指标,即“组合强度包线”(图1左上角所示的强度包线的实线)。关于使用组合包线,《规范》中也有类似的指示。

具体计算步骤如下:

1. 计算土条底面在库水位骤降前的有效应力,以确定某部分土条法向应力小于 σ'_i ,而使用S剪指标;某部分土条法向应力大于 σ'_i ,而使用R指标。作为一种近似,可先假定全部使用S剪指标,相应骤降前水位进行一次滑弧稳定分析,算出滑弧面上的有效法向应力。按照陆军工程师团的惯例,计算是用“改良端典法”进行的。

图1中的ABC为算得的沿滑裂面的有效应力的分布。可以看到,土条5、6、7、8的有效应力大于 σ'_i ,故这部分土条的强度指标应换成R剪指标。

如果使用单一的R剪指标,则本计算步骤可以省略。

2. 根据已经调整好的土条底面强度指标,

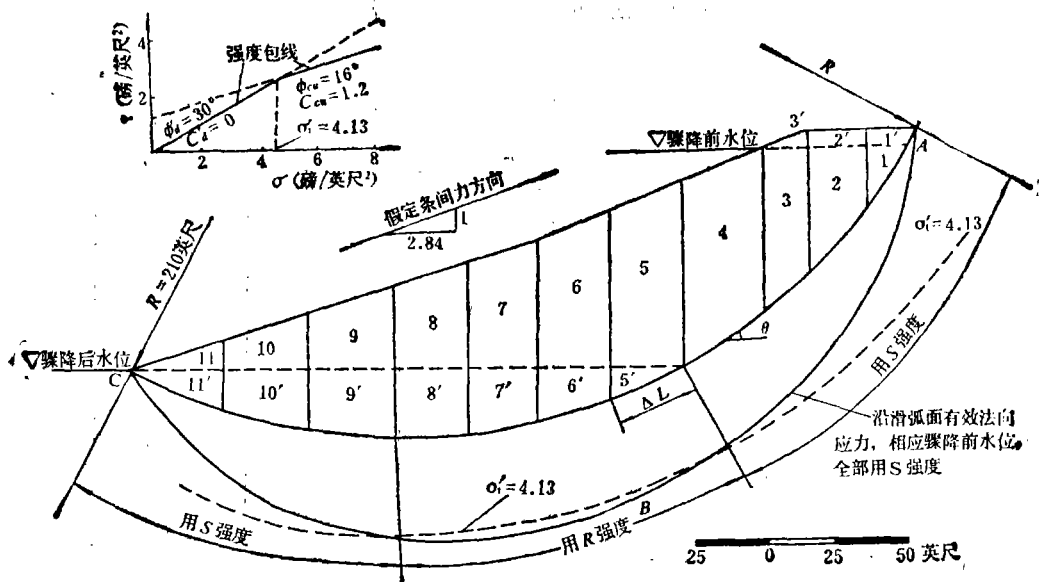


图 1 土坝滑弧稳定计算图

仍相应于骤降前水位，再进行一次改良瑞典法的稳定分析，算得土条底面的有效法向反力 N'_b ，如表 1 中第 4 栏所列。第 4 栏同时还列出了相应的电算结果。可见电算和工程师团手册中手算结果接近。电算和手算的安全系数值分别为 2.23 和 2.18，也很接近。

3. 求得骤降前土条底面的有效法向反力 N'_b 后，根据式 (2) 或组合强度包线，即按文献 [2] 中的式 (7) 算得骤降后一旦破坏，各土条底面能发挥的强度，进而算得对圆心的抗滑力矩。

表 2 中的第 3 栏和第 4 栏反映了计算的详细过程，总抗滑力矩为 $(457.8 + 126.5) R = 584.3R$ (R 为圆弧半径)。在库水位降落，土体的自重（浸润线以下用饱和重）引起的滑动力矩，如表 2 中第 7 栏所得，总计为 $474.5R$ 。因而得出安全系数

$$F = 584.3R / 474.5R = 1.23,$$

计算机得出安全系数为 1.23。

总应力法计算实例如表 3 及图 2、图 3。图 2 为使用计算机对铁山水库大坝库水位

表 1 骤降前计算安全系数采用的基本数据及电算手算对照

土条号	1		2		3		4	
	骤降前土条重量 (磅)		骤降后土条重量 (磅)		ΔL (英尺)		骤降前法向应力 (磅/英尺 ²)	
	手算	电算	手算	电算	手算	电算	手算	电算
1	35.9	35.0	51.5	50.63	40.0	31.0	35.0	35.6
2	72.1	71.7	118.6	118.39	29.0	29.07	67.0	65.7
3	70.5	70.2	124.5	124.62	20.6	20.61	64.0	64.4
4	134.0	133.0	247.8	247.27	33.5	33.7	122.0	121.7
5	129.0	128.7	230.7	231.37	28.0	28.5	123.0	118.4
6	128.5	127.4	212.9	213.04	27.0	27.1	123.0	120.8
7	118.0	116.2	183.8	183.92	25.4	25.3	119.0	123.8
8	106.6	105.7	160.7	160.53	25.0	25.02	114.0	113.3
9	106.6	105.1	154.2	154.94	30.2	30.12	123.0	124.7
10	73.3	72.8	103.1	102.9	31.0	30.8	99.0	69.38
11	30.4	30.1	41.7	41.6	36.1	36.0	45.0	47.5

表 2 骤降安全系数计算

土条编号	1	2	3	4	5	6	7
	骤降前法向应力 N_D (千磅)	$\text{tg } \phi$	$N_D \text{tg } \phi$	$c \Delta L$	骤降后自重 W (千磅)	$\sin \phi$	$W \sin \phi$
1	35				51.5	0.831	42.8
2	67				118.6	0.728	86.3
3	64				124.6	0.643	80.1
4	122				247.8	0.530	131.3
$\Sigma 1-4$	288	0.577	166.2	0			
5	123				230.7	0.407	93.9
6	123				212.9	0.281	59.8
7	119				183.8	0.155	28.5
8	114				160.7	0.038	6.1
$\Sigma 5-8$	479	0.287	137.5	126.5			188.3
9	123				154.2	-0.087	-13.4
10	99				103.1	-0.239	-24.6
11	45				41.7	-0.391	-16.3
$\Sigma 9-11$	267	0.577	154.1	0			-54.3
Σ			457.8	126.5			474.5

注：(1)安全系数 $F = \frac{457.8 + 126.5}{474.5} = 1.23$ ，(2)表中的第 1 栏和第 5 栏分别为表 1 的第 4 栏和第 2 栏，(3)土条 1~4，9~11 使用了 S 剪指标，即 $\phi'_d = 30^\circ$ 、 $c'_d = 0$ ；土条 5~8 使用 R 剪指标，即 $\phi_{cu} = 16^\circ$ 、 $C_{cu} = 1.2$ 。

表 3 土料性质指标

编 号	土 料	S 剪		R 剪		湿容重 (吨/米 ³)	饱和容重 (吨/米 ³)
		c'_d	ϕ'_d	c_{cu}	ϕ_{cu}		
①	坝体砂料	0	0	0	0	1.80	2.07
②	粘土坝料	1.3	30.5	3.4	13.5	1.91	1.98
③	块石护坡	0	35.0	0	0	1.89	2.14
④	片岩石碴	1.0	26.0	0	0	2.14	2.21

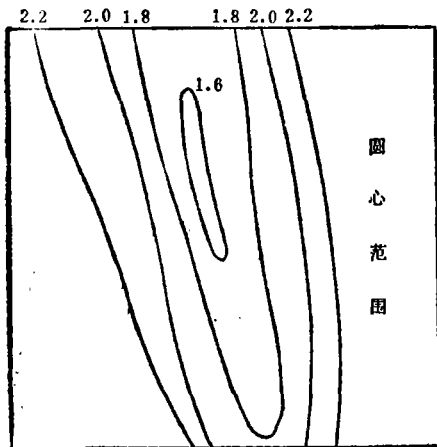


图 2 大坝边坡稳定安全系数等值线图

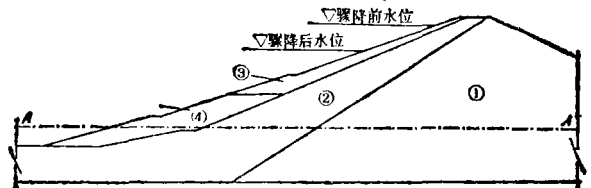


图 3 湖南省铁山水库大坝剖面

①—坝体砂料；②—粘土坝料；③—块石护坡；④—片岩石碴

骤降情况进行组合强度总应力法分析所得安全系数的等值线图。所有的圆弧均与图 2 中的 A-A 线相切。表 3 为采用的土料指标。

渔子溪一级水电站四号机组 拍振动分析及处理

江 树 勋

(西南电管局试验研究所)

渔子溪一级水电站是岷江支流渔子溪上的一座引水式水力发电站,装有四台4万千瓦的水轮发电机组。水轮机型号为HL004-LJ-210型,设计水头270米,实际运行水头300米以上,每台机组的设计流量为 $17.3\text{米}^3/\text{秒}$ 。机组的密封型式为三道缝隙梳齿式。发电机为悬式结构,机组额定转数500转/分。

1984年5月9日,4号机组大修完毕,用电测法监测机组振动、摆度值,均符合部颁标准要求。但过速试验后,机组各部振动、摆度幅值随负荷增加而加大,同一工况下其值变化无常。当负荷大于3万千瓦时,机机出现拍振动;当负荷为4万千瓦时,摆度达0.84毫米,超出标准4倍。即使限制负荷在3万千瓦以下运行,上机架水平振动仍达0.13毫米,摆度为0.7~0.8毫米。

根据测试数据进行分析,找出了产生拍振动的根本原因,采取简易有效的措施,仅用35小时就消除了拍振动,使4号机组所有参数均达到部颁标准极优水平。

一、机组振动状况

采用应变测试技术对4号机组振动进行测量,测点布置见图1,各次测试结果见下表。

从表中的测试结果,可看出以下几个主要问题:

1.上机架振动幅值大。其水平振动最大值

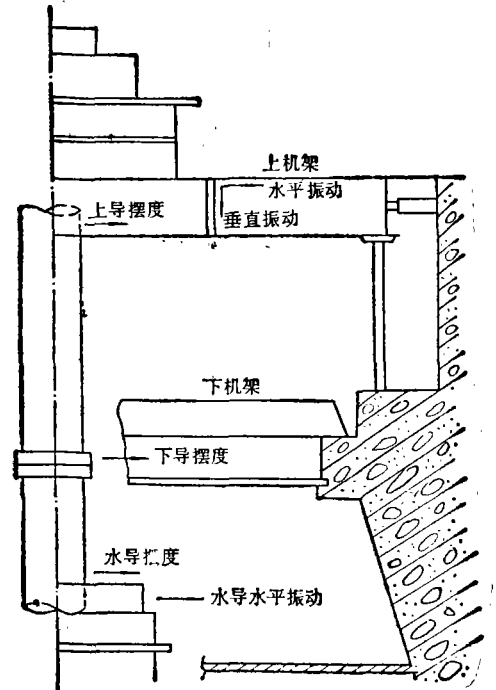


图1 测点布置示意

为0.15毫米,垂直振动最大值0.11毫米。上机架四个支腿受力不均;各支腿垂直振动相差3~4倍;水平振动相差3倍;同一支腿同一工况下振幅值变化无规律。

2.各导轴承处主轴摆度大。上导摆度最大值为0.78毫米,下导摆度最大值为0.84毫米,水导处摆度最大值为0.15毫米。

3.在同一工况下,机组的振动、摆度、频

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国水利电力部,碾压式土石坝设计规范(SDJ218-84),水利电力出版社,1985年6月。

[2] 陈祖煜,土石坝边坡稳定分析中的总应力法.水利水电技术,1984年第10期。

[3] 美国陆军工程师团总工程师室,工程设计手册(“土坝与堆石坝稳定分析”部分),1970年。