

坝后为倾斜地面时 坝体抗滑稳定计算(三倾斜面法)·

水利电力部成都勘测设计院 张怡霞

一、前 言

用刚体极限平衡理论分析处于基坝岩体内并向下游倾斜的软弱夹层时,当坝后地面为水平面的不同滑动面组合形式(双斜滑动面、三倾斜面)的抗滑稳定计算方法都得到论证^{[1]、[2]},使计算大为简化。为了扩大三倾斜面抗滑稳定计算方法的使用范围,本文对坝后基岩表面呈倾斜状态时(图1中的OD),推导了破裂面的水平线夹角 β_1 、 β_2 的计算式;同时将文献[1]表1中所列 x 数据从 $0 \sim -\frac{\pi}{2}$ 扩大到 $0 \sim \pi$,以方便计算。

本文通过例题对常用的双斜面滑动算法及三倾斜面滑动算法进行了坝体抗滑稳定的分析对比,探讨OC面铅直或倾斜对稳定安全系数的影响。

二、三倾斜面抗滑稳定算法

据朱庄水库大坝石膏模型试验^[1、2],当加推力后发现,坝趾附近首先产生破裂并逐渐向深部及四周发展,直至滑动破坏,并未发现有铅直的破裂面。

笔者根据上述模型试验所表现的破裂形式,推导出地面为倾斜面的破裂角计算公式。

基本假定:

- (1) 平面问题;
- (2) 破裂面OC、CD为平面(图1);
- (3) 各滑动岩体为刚体;
- (4) 不计力矩的影响。

取各滑动岩体为脱离体,分析其在各种力作用下的稳定性,导出计算公式。

图1为极限状态下的滑动模式。坝后基岩的破裂面为OC、CD,破裂面和水平线的夹角为 β_1 、 β_2 ,地面的倾角为 δ 。

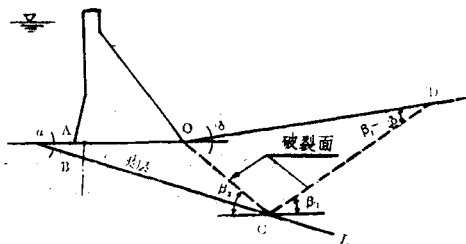


图1

(一) 阻滑力 R_L

1. 抗力的计算公式

•本文在编写过程中曾得到鲁慎吾、苏邦基、周宝琼同志的帮助,在此表示感谢。

取阻滑体OCD为脱离体,它在图2b所示的力系作用下处于平衡状态。

渗透压力这里暂不考虑,后面将讨论它对破裂角的影响。

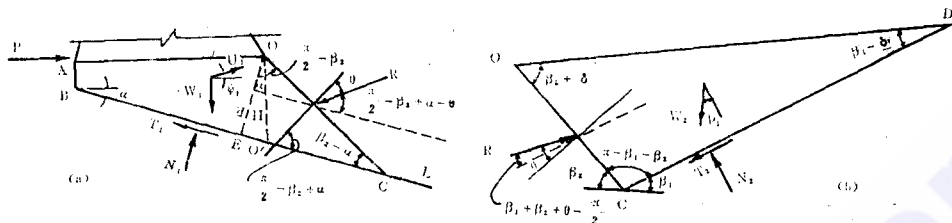


图 2

由静力平衡得:

$$R = \frac{W_2(\sin\beta_1 + f_2\cos\beta_1)}{\cos(\beta_1 + \beta_2 + \theta - \frac{\pi}{2}) - f_2\sin(\beta_1 + \beta_2 + \theta - \frac{\pi}{2})}。$$

将 $f_2 = \tan\phi_2$ 代入上式,等号右端的分子分母同乘以 $\cos\phi_2$,化简后得:

$$R = \frac{W_2 \sin(\beta_1 + \phi_2)}{\sin(\beta_1 + \beta_2 + \theta + \phi_2)}。 \quad (1)$$

式中 R ——阻滑体的抗力;

ϕ_2 ——阻滑体岩石的内摩擦角;

θ ——抗力 R 与破裂面 CD 法线间夹角;

W_2 ——阻滑体的重量(水下为浮重)。

阻滑体重量 W_2 ,按图2b中的 $\triangle OCD$ 的三角关系推导如式(2):

$$W_2 = \frac{1}{2} \gamma H^2 \cos^2 \alpha \cdot \frac{\sin(\beta_2 + \delta) \sin(\beta_1 + \beta_2)}{\sin^2(\beta_2 - \alpha) \sin(\beta_1 - \delta)}。 \quad (2)$$

将式(2)中的 W_2 代入式(1),化简后得抗力的公式:

$$R = \frac{1}{2} \gamma H^2 \cos^2 \alpha \cdot \frac{\sin(\beta_2 + \delta) \sin(\beta_1 + \beta_2) \sin(\beta_1 + \phi_2)}{\sin(\beta_1 - \delta) \sin(\beta_1 + \beta_2 + \theta + \phi_2) \sin^2(\beta_2 - \alpha)}。 \quad (3)$$

式中 γ ——阻滑体基岩容重(水下为浮重);

α ——主滑面 BC 的倾角;

H —— OO' 的高度(见图2a)。

其它符号的意义同前。

2. 阻滑力 R_L 的计算公式

将抗力 R 投影于主滑面 L 方向,求得阻滑力 R_L :

$$R_L = R [\sin(\beta_2 + \theta - \alpha) + f_1 \cos(\beta_2 + \theta - \alpha)]。$$

将 $f_1 = \tan\phi_1$ 代入上式,整理后得:

$$R_L = R \sin(\beta_2 + \theta + \phi_1 - \alpha) / \cos\phi_1。$$

再以式(3)中的 R 和 $d = H \cos\alpha$ 代入,整理化简得:

$$R_L = \frac{\gamma d^2}{2 \cos \phi_1} \cdot \lambda(\beta_1, \beta_2); \quad (4)$$

$$\lambda(\beta_1, \beta_2) = \frac{\sin(\beta_1 + \beta_2) \sin(\beta_1 + \phi_2) \sin(\beta_2 + \delta) \sin(\beta_2 + \theta + \phi_1 - \alpha)}{\sin(\beta_1 - \delta) \sin(\beta_1 + \beta_2 + \theta + \phi_2) \sin^2(\beta_2 - \alpha)} \cdot$$

$$\left(\delta < \beta_1 < \frac{\pi}{2}, \alpha < \beta_2 \leq \frac{\pi}{2} \right)$$

式中 ϕ_1 ——主滑面 BC 的摩擦角 ($\phi_1 = \arctg f_1$)。

(二) 破裂角 β_1 、 β_2 的计算公式

求安全系数可归结为求 R_L 最小的问题。从式 (4) 可以看出, 变量有 β_1 、 β_2 。令 $\frac{\partial \lambda}{\partial \beta_1} = 0$, $\frac{\partial \lambda}{\partial \beta_2} = 0$, 得两方程式。解出满足方程式的所有驻点。由于很难再求 $\frac{\partial^2 \lambda}{\partial \beta_1^2}$ 、 $\frac{\partial^2 \lambda}{\partial \beta_1 \partial \beta_2}$ 和 $\frac{\partial^2 \lambda}{\partial \beta_2^2}$, 所以必须将所有的驻点坐标值代入式 (4), 比较它们的大小, 其最小者, 即为所求的 R_L 。

因 $\frac{\partial \ln \lambda}{\partial \beta} = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial \beta}$, 故 $\frac{\partial \lambda}{\partial \beta} = 0$, 就是 $\frac{\partial \ln \lambda}{\partial \beta} = 0$ 。因此可先对 $\lambda(\beta_1, \beta_2)$ 取对数再求偏导数 [$\lambda(\beta_1, \beta_2) > 0$] 这样导出三倾斜面滑动的基本方程组为 (推导过程略):

$$\text{ctg}(\beta_1 - \delta) - \text{ctg}(\beta_1 + \phi_2) = \text{ctg}(\beta_1 + \beta_2) - \text{ctg}(\beta_1 + \beta_2 + \theta + \phi_2); \quad (5)$$

$$\text{ctg}(\beta_1 - \delta) - \text{ctg}(\beta_1 + \phi_2) = 2 \text{ctg}(\beta_2 - \alpha) - \text{ctg}(\beta_2 + \delta) - \text{ctg}(\beta_2 + \theta + \phi_1 - \alpha)。 \quad (6)$$

引入辅助函数^[1]

$$v(x, M) = \text{ctg} x - \text{ctg}(x + M) \quad (7)$$

$$\pi > x + M > 0, \quad x > 0。$$

式中 x 为变数, M 为参数 (等于文献^[1]表 1 中的 β)。为了满足使用的要求, 笔者在文中将文献 [1] 表 1 中各竖列 x 的数据从 $0 \sim \frac{\pi}{2}$ 扩大到 $0 \sim \pi$ (计算表格附后)。

利用 $v(x, M)$ 表达式 (7), 把式 (5) (6) 化为:

$$v(\beta_1 - \delta, \phi_2 + \delta) = v(\beta_1 + \beta_2, \phi_2 + \theta); \quad (8)$$

$$v(\beta_1 - \delta, \phi_2 + \delta) = v(\beta_2 - \alpha, \phi_1 + \theta) + v(\beta_2 - \alpha, \alpha + \delta)。 \quad (9)$$

式 (8)、(9) 中, ϕ_1 、 ϕ_2 、 θ 、 δ 和 α 均系常数, β_1 、 β_2 是待求的数值。令 $x = \beta_1 - \delta$ (或 $\beta_2 - \alpha$, 或 $\beta_1 + \beta_2$), $M = \phi_1 + \theta$ (或 $\phi_2 + \delta$, 或 $\phi_1 + \theta$, 或 $\alpha + \delta$, 或 $\phi_2 + \theta$), 附表即可应用。

若尾岩有夹层, 其中一个破裂角是已知的, 那么待求的便只有一个破裂角了。

经大量计算证实, 渗透压力对破裂角的影响, 不会导致抗力的较大变化。因此在阻滑体上作用有渗透压力时, 仍可用式 (5)、(6) [或式 (8)、(9)] 求破裂角 β_1 、 β_2 。这时的抗力计算公式为:

$$R = \frac{W_2 \sin(\beta_1 + \phi_2) - u_2 \cos(\beta_1 + \phi_2 - \psi_2)}{\sin(\beta_1 + \beta_2 + \theta + \phi_2)} \quad (10)$$

u_2 ——阻滑体上的渗透压力 (这里用体力表示);

ψ_2 ——阻滑体上渗透压力的倾角。

渗透压力用面力表示时, 式 (5)、(6) [或式 (8)、(9)] 仍可应用。

(三) 稳定计算公式

根据安全系数为有效阻力和滑动力之比 (沿主滑面), 并由主滑段的静力平衡 (图 2 a)

$$\text{得} \quad K_c = \frac{f_1 [W_1 \cos \alpha - P \sin \alpha - u_1 \sin(\psi_1 + \alpha)] - u_1 \cos(\psi_1 + \alpha) + R_L}{P \cos \alpha + W_1 \sin \alpha} \quad (11)$$

式中 W_1 ——坝段重 (下游水位以下者为浮重);

P ——水平力的代数和;

ψ_1 ——渗透压力的倾角;

u_1 ——坝段的渗透压力;

f_1 ——主滑面 (夹层) 的摩擦系数。

用式 (4) 求 R_L , 再以 R_L 代入式 (11) 即可求出安全系数 K_c 。

三、双斜滑动法

双斜滑动法因计算简便, 故应用广泛。

此法的假定滑动模式是: 极限状态时的破裂面为 $O'D'$ (见图 3 b), O' 为过 O 的铅直线和夹层 L 的交点 (见图 2、图 3)。破裂角为 β 。

渗透压力作为体力考虑。

由图 3 b 阻滑体 $OO'D$ 的静力平衡得:

$$R = \frac{W_2 (f_2 \cos \beta + \sin \beta) - u_2 [f_2 \sin(\psi_2 - \beta) + \cos(\psi_2 - \beta)]}{\cos(\theta + \beta) - f_2 \sin(\theta + \beta)} \quad (12)$$

$$\text{式中} \quad W_2 = \frac{1}{2} \gamma H^2 \cos \delta \cdot \frac{\cos \beta}{\sin(\beta - \delta)},$$

$$u_2 = \frac{1}{2} i \gamma_0 H^2 \cos \delta \cdot \frac{\cos \beta}{\sin(\beta - \delta)},$$

i ——阻滑体上渗流平均坡降;

γ_0 ——水的容重;

R ——阻滑体的抗力。

R 投影在主滑面 L 方向的阻滑力 R_L 为:

$$R_L = \cos(\phi_1 + \theta - \alpha) / \cos \phi_1 \quad (13)$$

破裂角的计算公式为:

$$\text{tg} \beta = -\text{tg} \phi_2 + \sqrt{\text{tg}^2 \phi_2 + \text{tg} \phi_2 \text{ctg}(\phi_2 + \theta) + \frac{\cos \theta \text{tg} \delta}{\cos \phi_2 \sin(\phi_2 + \theta)}} \quad (14)$$

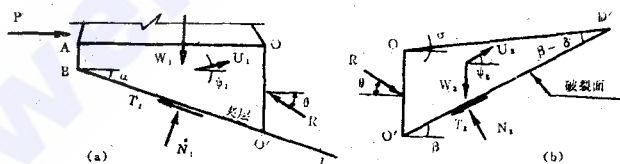


图 3

式中符号的意义同前, 来源参阅文献〔5〕。

沿夹层BC滑动的安全系数为:

$$K_c = \frac{f_1 [W_1 \cos \alpha - P \sin \alpha - u_1 \sin(\psi_1 + \alpha)] - u_1 \cos(\psi_1 + \alpha) + R_L}{P \cos \alpha + W_1 \sin \alpha} \quad (15)$$

若经排水处理以后, 尾岩渗透压力很小, 可以不计, 则:

$$R = \frac{1}{2} \gamma H^2 \cos \delta \cdot \frac{\cos \beta \sin(\beta + \phi_2)}{\sin(\beta - \delta) \cos(\beta + \phi_2 + \theta)} \quad (16)$$

将R投影于主滑面L的方向, 得阻滑力 R_L 的计算公式为:

$$R_L = \frac{1}{2} \gamma H^2 \lambda(\beta); \quad (17)$$

$$\lambda(\beta) = \frac{\cos \delta \cos \beta \sin(\beta + \phi_2) \cos(\phi_1 + \theta - \alpha)}{\cos \phi_1 \sin(\beta - \delta) \cos(\beta + \phi_2 + \theta)}.$$

破裂角的计算公式同(14)式, 安全系数的计算公式同(15)式。

四、例题和分析

例题1. 某坝的参数为 $\alpha = 5^\circ$, $\phi_1 = \arctg f_1 = 12^\circ$, $\phi_2 = 30^\circ$, $\gamma = 1.6$ 吨/米³(浮容重), $d = 17.55$ 米, 坝后地面的坡度为1:4 ($\delta = 14^\circ$)。假定经排水处理后, 阻滑体上的渗透压力很小, 近似地取 $u_2 = 0$ 。主滑段上 $W_1 = 1,950$ 吨, $P = 1,100$ 吨, 渗透压力 $u_1 = 170$ 吨(垂直于滑动面)。试用三倾斜面滑动法计算 $\theta = \phi_2 = 30^\circ$ 时的阻滑力 R_L 及安全系数 K_c 。

解:

(1) 计算公式

$$R_L = \frac{\gamma d^2}{2 \cos \phi_1} \cdot \lambda(\beta_1, \beta_2); \quad (4)_*$$

$$\lambda(\beta_1, \beta_2) = \frac{\sin(\beta_1 + \beta_2) \sin(\beta_1 + \phi_1) \sin(\beta_2 + \delta) \sin(\beta_2 + \theta + \phi_1 - \alpha)}{\sin(\beta_1 - \delta) \sin(\beta_1 + \beta_2 + \theta + \phi_2) \sin^2(\beta_2 - \alpha)}.$$

破裂角计算公式为:

$$v(\beta_1 - \delta, \phi_2 + \delta) = v(\beta_1 + \beta_2, \phi_2 + \theta); \quad (8)_*$$

$$v(\beta_1 - \delta, \phi_2 + \delta) = v(\beta_2 - \alpha, \phi_1 + \theta) + v(\beta_2 - \alpha, \alpha + \delta). \quad (9)_*$$

抗滑稳定安全系数的计算公式为:

$$K_c = \frac{f_1 (W_1 \cos \alpha - P \sin \alpha - u_1) + R_L}{P \cos \alpha + W_1 \sin \alpha} \quad (18)$$

(2) 代入数据

(a) 求破裂角

将 $\phi_1 + \theta = 12^\circ + 30^\circ = 42^\circ$ 、 $\phi_2 + \theta = 30^\circ + 30^\circ = 60^\circ$ 、 $\alpha + \delta = 19^\circ$ 、 $\phi_2 + \delta = 44^\circ$ 代入

注: *表示引自前面的方程式。

(8)*、(9)*式, 得:

$$v(\beta_1 - 14^\circ, 44^\circ) = v(\beta_2 - 5^\circ, 42^\circ) + v(\beta_2 - 5^\circ, 19^\circ) = v(\beta_1 + \beta_2, 60^\circ) \quad (A)$$

令 $\beta_2 = 47^\circ$, 那么 $\beta_2 - 5^\circ = 42^\circ$, 查表1得 $v(42^\circ, 42^\circ) = 1.006$, $v(42^\circ, 19^\circ) = 0.556$ 。那么 $v(\beta_1 - 14^\circ, 44^\circ) = 1.006 + 0.556 = 1.562$ 。反查表1得 $\beta_1 - 14^\circ = 27^\circ 54'$, 故 $\beta_1 = 27^\circ 54' + 14^\circ = 41^\circ 54'$ 。又因 $v(\beta_1 + \beta_2, 60^\circ) = 1.562$, 查表1得 $\beta_1 + \beta_2 = 86^\circ 15'$, 那么 $\beta_2 = 86^\circ 15' - \beta_1 = 86^\circ 15' - 41^\circ 54' = 44^\circ 21'$, 与假定的 β_2 不相等。下面再假定 β_2 的数值, 重复以上计算, 直到算出 β_2 等于假定的 β_2 为止; 最后得最小 R_L 时的破裂角为: $\beta_1 = 41^\circ 16'$, $\beta_2 = 46^\circ$ 。

(b) 求阻滑力 R_L

将求出的 β_1 、 β_2 及其它数据代入 (4)*式得:

$$\lambda(\beta_1, \beta_2) = 7.626,$$

$$R_L = 1920 \text{ 吨}。$$

(c) 求安全系数

把 R_L 的值及其它数据代入 (18) 式得:

$$K_c = 1.79。$$

例题2. 已知 $W_1 = 1,690$ 吨, 其它数据同例题1。用双斜滑动法计算 $\theta = 0^\circ \sim 30^\circ$ 时的阻滑力 R_L 及安全系数 K_c 。

解:

(1) 计算公式

阻滑力的计算公式为:

$$R_L = \frac{1}{2} \gamma H^2 \lambda(\beta), \quad (17)^*$$

$$\lambda(\beta) = \frac{\cos \delta \cos \beta \sin(\beta + \phi_2) \cos(\phi_1 + \theta - \alpha)}{\cos \phi_1 \sin(\beta - \delta) \cos(\beta + \phi_2 + \theta)}。$$

破裂角的计算公式为:

$$\tan \beta = -\tan \phi_2 + \sqrt{\tan^2 \phi_2 + \tan \phi_2 \cot(\phi_2 + \theta) + \frac{\cos \theta \tan \delta}{\cos \phi_2 \sin(\phi_2 + \theta)}}。 \quad (14)^*$$

表 2

θ	β	R_L (吨)	K_c
0°	$33^\circ 47'$	1170	1.18
8°	$33^\circ 29'$	1680	1.58
15°	$29^\circ 27'$	2390	2.16
20°	$26^\circ 47'$	3240	2.83
30°	$21^\circ 47'$	7410	6.19

抗滑稳定计算公式为:

$$K_c = \frac{f_1(W_1 \cos \alpha - P \sin \alpha - u_1) + R_L}{P \cos \alpha + W_1 \sin \alpha} \quad (18)^*$$

(2) 将已知数代入上列公式, 得成果如表 2

根据表 2 中数据作 $\theta \sim R_L$ 曲线如图 4

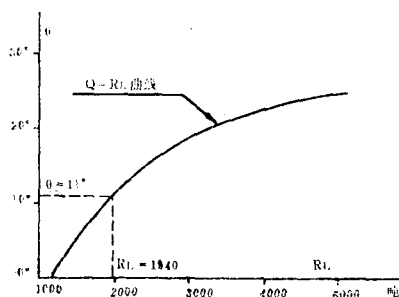


图 4

图 4 中, 当 $R_L = 1940$ 吨时, 由 $\theta = R_L$ 曲线查得 $\theta = 11^\circ$ 。

从例 1、例 2 的成果看出, 当 $\theta = \phi_2 = 30^\circ$ 时, 用三倾斜面滑动法和双斜滑动法求得的阻滑力 R_L 分别是 1940 吨 (为便于比较, 将 $\triangle OO'C$ 所产生的阻滑力加上 1920 吨, 约等于 1940 吨) 和 7410 吨, 后者为前者的 3.83 倍; 安全系数 K_c , 后者为前者的 3.46 倍 (见表 2)。说明双斜滑动法过高地估算了坝后基岩的阻滑力 (尾岩地面为水平面时的数例中, 双斜法与三倾斜面滑动法 R_L 的比值为 1.97, K_c 的比值为 1.74)。但是双斜滑动法中破裂面为 $O'D'$, 而铅直面 OO' 是假定的 (见图 3), 因此该面上的摩阻力

不一定会全部发生作用; 即抗力 R 的倾角 θ 不一定取内摩擦角 ϕ_2 , 而是在 $0 \sim \phi_2$ 之间取值。从例 2 的 $\theta \sim R_L$ 曲线看出 (见图 4), 当 $\theta = 11^\circ$ 时, $R_L = 1940$ 吨, 与三倾斜面滑动法 $\theta = \phi_2$ 时的阻滑力相同 (尾岩地面为水平面的例题也有相同的结论)。

由于双斜滑动法不需试算, 使用简便, 若其抗力的倾角 θ 取较小的角度 (本例中 $\theta < 11^\circ$) 或取零度, 那么, 便可得到偏于安全的结果。在这种情况下双斜滑动法便是一种简便实用的算法

五、结 语

1. 三倾斜滑动法从模型试验中出现的倾斜破裂面出发, 用极限平衡原理推导了破裂角的计算公式及阻滑力的计算公式。例题说明它的阻滑力 R_L 约为双斜滑动法的 4。但是两个破裂角 β_1 、 β_2 必须用 (8)、(9) 式试算求得, 计算工作量较大。

2. 双斜滑动法使用简便, 不需试算, 若其抗力的倾角 θ 取较小的角度 (本例中 $\theta < 11^\circ$)。或为零度, 那么便可得到偏于安全的结果, 在这种情况下, 它在工程中是比较实用的。

3. 双斜面是三斜面中的一个特例 (坝趾处有垂直裂隙时, 双斜面的抗力可能为最小)。

续表 1

α	M																					
	4°	8°	12°	16°	20°	24°	28°	32°	36°	40°	44°	48°	52°	56°	60°	64°	68°	72°	76°	80°	84°	
64°	0.084	0.163	0.238	0.311	0.383	0.453	0.523	0.593	0.664	0.737	0.813	0.892	0.975	1.07	1.16	1.27	1.39	1.52	1.68	1.86	2.09	
68°	0.079	0.155	0.228	0.299	0.370	0.439	0.509	0.580	0.653	0.729	0.808	0.892	0.981	1.08	1.19	1.30	1.44	1.60	1.78	2.00	2.28	
72°	0.076	0.149	0.220	0.290	0.360	0.430	0.501	0.574	0.650	0.729	0.813	0.902	0.999	1.11	1.23	1.36	1.52	1.70	1.93	2.21	2.57	
76°	0.073	0.144	0.214	0.284	0.354	0.426	0.499	0.574	0.653	0.737	0.827	0.924	1.030	1.15	1.28	1.44	1.63	1.85	2.13	2.50	3.00	
80°	0.071	0.141	0.211	0.281	0.353	0.426	0.501	0.580	0.664	0.754	0.851	0.958	1.080	1.21	1.37	1.55	1.78	2.06	2.42	2.92	3.66	
84°	0.070	0.140	0.210	0.281	0.354	0.430	0.509	0.593	0.682	0.780	0.886	1.010	1.140	1.30	1.48	1.71	1.99	2.35	2.85	3.59	4.81	
88°	0.070	0.140	0.211	0.284	0.360	0.439	0.523	0.612	0.709	0.816	0.935	1.070	1.227	1.41	1.64	1.92	2.28	2.78	3.52	4.74	7.15	
92°	0.070	0.141	0.214	0.290	0.369	0.453	0.542	0.640	0.746	0.865	1.001	1.157	1.341	1.565	1.85	2.21	2.71	3.45	4.67	7.08	14.30	
96°	0.071	0.144	0.220	0.299	0.383	0.472	0.569	0.676	0.795	0.930	1.087	1.271	1.495	1.776	2.14	2.64	3.38	4.60	7.01	14.20		
100°	0.073	0.149	0.228	0.311	0.401	0.498	0.605	0.724	0.859	1.015	1.200	1.424	1.704	2.070	2.57	3.31	4.53	6.94	14.12	18.96		
104°	0.076	0.155	0.238	0.328	0.425	0.532	0.651	0.786	0.942	1.130	1.35	1.63	2.00	2.50	3.24	4.46	6.87	14.10				
108°	0.079	0.163	0.252	0.350	0.456	0.575	0.711	0.867	1.050	1.280	1.56	1.92	2.42	3.16	4.38	6.79	14.00					
112°	0.084	0.173	0.270	0.377	0.496	0.632	0.788	0.972	1.200	1.480	1.84	2.34	3.08	4.30	6.71	13.80						
116°	0.090	0.187	0.294	0.413	0.548	0.704	0.889	1.110	1.390	1.760	2.26	3.00	4.22	6.63	13.80							
120°	0.097	0.204	0.323	0.458	0.614	0.799	1.020	1.300	1.670	2.170	2.91	4.13	6.54	13.70								

续表 i

α	M														
	4°	3°	12°	16°	20°	24°	28°	32°	36°	40°	44°	48°	52°	56°	60°
124°	0.107	0.226	0.361	0.517	0.702	0.926	1.210	1.570	2.070	2.810	4.03	6.44	13.60		
128°	0.119	0.254	0.410	0.595	0.819	1.100	1.460	1.970	2.710	3.920	6.33	13.50			
132°	0.135	0.291	0.476	0.700	0.980	1.350	1.850	2.590	3.800	6.210	13.40				
136°	0.156	0.341	0.565	0.845	1.210	1.710	2.450	3.670	6.08	13.30					
140°	0.185	0.409	0.689	1.050	1.560	2.300	3.510	5.920	13.10						
144°	0.224	0.504	0.870	1.370	2.110	3.330	5.740	12.90							
148°	0.280	0.646	1.150	1.890	3.100	5.520	12.70								
152°	0.365	0.867	1.602	2.820	5.230	12.40									
156°	0.501	1.242	4.870	12.10											
160°	0.740	1.964	3.70	11.60											
164°	1.210	3.63	10.80												
168°	2.410	9.60													
172°	7.190														

(下转第54页)

4. 破坏

诚然,从光弹性理论及光弹性材料特性来看,都是不适宜于进行结构破坏试验的。因为其相似准则难以满足。但是在实验过程中,由于加荷、控温等因素,却偶有模型破坏者〔4〕

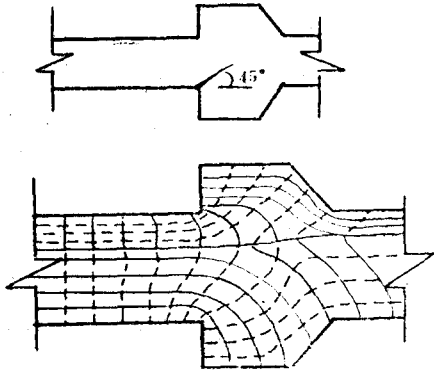


图6 牛腿内部齿缝

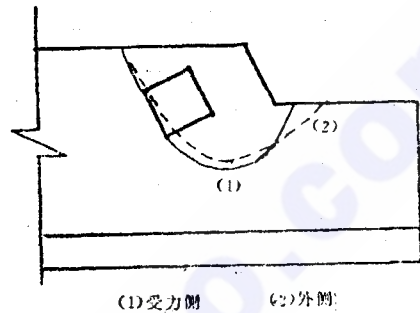


图7 墩墙破坏裂缝

〔10〕。对破坏情况作具体分析后,笔者认为:它虽不能更深刻地在量上显示其特性,但却可以定性地揭示出其破坏的内在因素。如图6〔4〕和图7〔9〕中所示的裂缝,可从相应主应力迹线中找出其破坏的主要原因,即集中主拉应力仍对结构的破坏起主导作用。

参 考 文 献

- 〔1〕苏先基等:水坝泄洪弧形闸门支承结构的三维光弹性试验应力分析,1979。
- 〔2〕Post, D. The Core Method 《Exp Mech》, 1962, 3。
- 〔3〕李光宗、赵华松:三维光弹性的几种新方法,人民长江,1980,增刊。
- 〔4〕周鸿钧等:溢流坝闸墩三维光弹试验研究,郑州工学院学报,1982,1。
- 〔5〕水电部成都勘测设计院科试所等:闸墩三向光弹试验,实验力学,第二期,1975。
- 〔6〕大连工学院水利系抗震研究室:某水电站三号泄洪洞三维光弹性整体模型试验报告,1978。
- 〔7〕长江水利水电科研院:万安水利枢纽溢流坝段闸墩三向光弹试验,1982。
- 〔8〕《水工钢筋混凝土结构》,下册,水利电力出版社。
- 〔9〕成都科技大学水科所:升钟水库放空隧洞弧形门闸室三维光弹性研究,1980。
- 〔10〕成都科技大学水科所:龙羊峡枢纽工程深孔泄水道弧形门闸室三维光弹性研究,1981

(上接第47页)

参 考 文 献

- 〔1〕王志良,坝体抗滑稳定的三倾斜面算法。水利学报,1982第5期。
- 〔2〕刘双桐等,岩体滑动稳定分析和实验研究。清华大学学报,1974年第二期。
- 〔3〕水利电力部科学研究所,科学院地质研究所,水利水电工程地质。科学出版社,1974年。
- 〔4〕建在软弱岩基上三座大坝的抗滑稳定,长办摘译自《第九届国际大坝会议文件》1967年第I卷专题33报告29。
- 〔5〕张怡霞,坝基深度抗滑稳定分析及破裂角的计算公式。四川水力发电,1982年第2期。