

## 二滩电站拱坝坝肩岩体稳定分析

(利用三维有限元应力成果)

黄知先

(水电部成都勘测设计院)

拱坝坝肩岩体稳定分析中,刚体极限平衡法目前仍被广泛采用。由于拱坝是空间整体结构,坝肩岩体失稳,具有整体失稳的性质,因此在分析方法上,也由平面分析逐渐发展为三维分析〔1〕,〔2〕。二滩电站拱坝坝肩岩体,存在延伸短小、断续错列分布、成组出现的微裂隙,且缓倾角结构面的倾角较大,用刚体极限平衡法进行三维稳定分析有以下问题:陡倾角侧向滑移面出现拉力(一般假定岩石不能承受拉力),于是滑移岩体脱离受拉的陡倾角面,仅沿缓倾角裂隙面滑动〔2,3〕,而陡倾角面实际存在的凝聚力并未考虑;构成滑动面的裂隙断续分布,未被裂隙切割的完整岩体,其抗剪指标高于受裂隙切割的岩体,确定整个滑动面上的综合抗剪指标,只能近似地用面积加权平均法计算。当滑动面通过岩性差别大的各类岩体时,岩石好坏以及距坝基远近,都会对稳定带来不同影响,但未能加以考虑;滑移岩体尾部的抗力对稳定有多大帮助也难于确定。

目前采用有限元法分析坝肩岩体稳定,多限于求岩体应力和位移分布、破坏区范围、点的强度安全系数和极限荷载(或超载系数)等。

本文应用三维有限元法的应力成果,通过坐标转换,找出滑移岩体各滑动面上的法向应力和剪应力分布。假定滑动面为平面,根据滑动面上各部位的地质条件和应力,计算沿可能滑动方向的滑动力和阻滑力,按极限平衡条件,再计算滑移岩体反映抗剪指标安全储备程度的整体稳定安全系数,避免了刚体极限平衡法分析中存在的问题。关于渗透压力等对稳定的影响亦进行了讨论,提出了相应的分析方法。

### 一、三维空间应力的转换

#### (一) 空间任意一点的各应力分量由原坐标系向新坐标系转换的一般形式

设原坐标系为 $(x, y, z)$ , 新坐标系为 $(\xi, \eta, \zeta)$ (图1)。在微分体OABC上, ABC平面的外法线为 $\xi$ 轴正向,  $\eta, \zeta$ 轴平行于ABC平面且相互垂直。新坐标系与原坐标系各轴间的夹角余弦值,以表1中的符号表示。

由弹性力学可知,垂直于新坐标系 $\xi$ 轴的微分面ABC上的法向应力 $\sigma_\xi$ ,平行 $\eta$ 轴的剪应力 $\tau_{\xi\eta}$ 和平行 $\zeta$ 轴

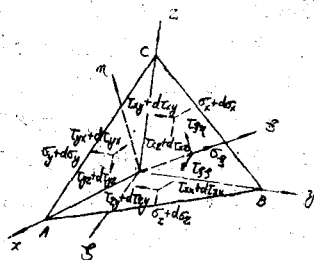


图1

表 1

| 原坐标系<br>新坐标系 | $x$   | $y$   | $z$   |
|--------------|-------|-------|-------|
| $\xi$        | $l_1$ | $m_1$ | $n_1$ |
| $\eta$       | $l_2$ | $m_2$ | $n_2$ |
| $\zeta$      | $l_3$ | $m_3$ | $n_3$ |

的剪应力 $\tau_{\xi\zeta}$ 与原坐标系各应力分量间的关系有:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{\xi} \\ \tau_{\xi\eta} \\ \tau_{\xi\zeta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} l_1 \\ m_1 \\ n_1 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

类此, 对空间一点的三个相互垂直微分面上的应力转换关系有:

$$[\sigma] = [L] [\sigma_0] [L]^T \quad (2)$$

式中

$$[L] = \begin{Bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{Bmatrix} \quad [L]^T \text{ 为 } [L] \text{ 的转置矩阵}$$

$$[\sigma_0] = \begin{Bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{Bmatrix} \quad [\sigma] = \begin{Bmatrix} \sigma_{\xi} & \tau_{\xi\eta} & \tau_{\xi\zeta} \\ \tau_{\xi\eta} & \sigma_{\eta} & \tau_{\eta\zeta} \\ \tau_{\xi\zeta} & \tau_{\eta\zeta} & \sigma_{\zeta} \end{Bmatrix}$$

将(2)式展开, 可得坐标转换后的六个独立应力分量如下:

$$\sigma_{\xi} = l_1^2 \sigma_x + m_1^2 \sigma_y + n_1^2 \sigma_z + 2l_1 m_1 \tau_{xy} + 2m_1 n_1 \tau_{yz} + 2n_1 l_1 \tau_{zx}$$

$$\sigma_{\eta} = l_2^2 \sigma_x + m_2^2 \sigma_y + n_2^2 \sigma_z + 2l_2 m_2 \tau_{xy} + 2m_2 n_2 \tau_{yz} + 2n_2 l_2 \tau_{zx}$$

$$\sigma_{\zeta} = l_3^2 \sigma_x + m_3^2 \sigma_y + n_3^2 \sigma_z + 2l_3 m_3 \tau_{xy} + 2m_3 n_3 \tau_{yz} + 2n_3 l_3 \tau_{zx}$$

$$\tau_{\xi\eta} = l_1 l_2 \sigma_x + m_1 m_2 \sigma_y + n_1 n_2 \sigma_z + (l_1 m_2 + m_1 l_2) \tau_{xy} + (m_1 n_2 + n_1 m_2) \tau_{yz} + (n_1 l_2 + l_1 n_2) \tau_{zx}$$

$$\tau_{\eta\zeta} = l_2 l_3 \sigma_x + m_2 m_3 \sigma_y + n_2 n_3 \sigma_z + (l_2 m_3 + m_2 l_3) \tau_{xy} + (m_2 n_3 + n_2 m_3) \tau_{yz} + (n_2 l_3 + l_2 n_3) \tau_{zx}$$

$$\tau_{\xi\zeta} = l_3 l_1 \sigma_x + m_3 m_1 \sigma_y + n_3 n_1 \sigma_z + (l_3 m_1 + m_3 l_1) \tau_{xy} + (m_3 n_1 + n_3 m_1) \tau_{yz} + (n_3 l_1 + l_3 n_1) \tau_{zx} \quad (3)$$

## (二) 拱坝柱坐标系的应力向整体直角坐标系的转换

定园心重力拱坝在进行三维有限元分析时, 常用柱坐标系。以柱坐标表示的应力, 在向滑动面局部直角坐标系转换以前, 先向整体直角坐标系转换一次较为方便, 而多园重力拱坝或变园心双曲拱坝, 则只用直角坐标系。

坐标系的设置(图2):整体直角坐标系,坐标原点 $o$ 设在坝顶拱冠上游面, $x$ 轴指向下游并通过拱的园心 $o_1$ 为正, $y$ 轴指向右岸和 $z$ 轴铅直向下为正;柱坐标系的坐标原点设在坝顶高程的拱园心 $o_1$ 上, $\gamma$ 、 $\theta$ 轴是相互正交的动轴,以图示方向为正, $\gamma$ 轴与拱坝中心线的夹角以顺时针方向以及 $z$ 轴铅直向下为正。

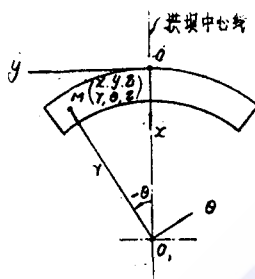


图2

柱坐标系的应力向整体直角坐标系转换后的各应力分量为:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_\gamma \cos^2 \theta + \sigma_\theta \sin^2 \theta - 2\tau_{\gamma\theta} \sin \theta \cos \theta \\ \sigma_y &= \sigma_\gamma \sin^2 \theta + \sigma_\theta \cos^2 \theta + 2\tau_{\gamma\theta} \sin \theta \cos \theta \\ \sigma_z &= \sigma_z \\ \tau_{xy} &= (\sigma_\gamma - \sigma_\theta) \sin \theta \cos \theta + \tau_{\gamma\theta} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \\ \tau_{yz} &= -\tau_{\theta z} \cos \theta - \tau_{z\gamma} \sin \theta \\ \tau_{zx} &= \tau_{\theta z} \sin \theta - \tau_{z\gamma} \cos \theta\end{aligned}\quad (4)$$

式中  $\sigma_\gamma$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{\gamma\theta}$ ,  $\tau_{\theta z}$ ,  $\tau_{z\gamma}$  为空间任一点 $M$ 柱坐标系的应力分量。

$\theta$  为柱坐标系的极角,以拱坝中心线 $o_1o$ 为极轴,顺时针向为正。

### (三) 整体直角坐标系应力向陡面或缓面局部直角坐标系的转换

#### 1. 局部直角坐标系设置

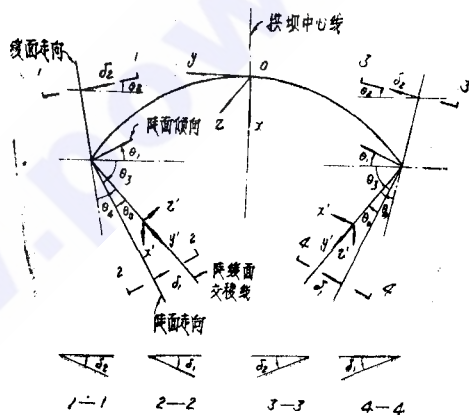


图3

如图3所示,陡面或缓面局部直角坐标系均以 $(x', y', z')$ 表示。

$x'$ 轴为陡面或缓面的法线,以指向滑移岩体为正; $y'$ 轴为陡面和缓面的交棱线,倾斜向下的方向为正; $z'$ 轴在陡面或缓面上,且垂直于陡、缓面交棱线,以右手系定正向。

#### 2. 陡、缓面主要特性参数的约定

$\delta_1$ ,  $\delta_2$  陡面和缓面倾角

$\theta$  陡面走向线与陡、缓面交棱线的水平投影线间的夹角。

- $\theta_1$  陡面倾向方向与整体直角坐标 $y$ 轴的夹角。  
 $\theta_2$  缓面倾向方向与整体直角坐标 $y$ 轴的夹角。  
 $\theta_3$  陡面走向线与整体直角坐标 $y$ 轴的夹角。  
 $\theta_4$  缓面走向线与陡、缓面交棱线的水平投影线间的夹角。

以上各值,均以图3中所示方向为正。

3. 陡面或缓面局部直角坐标系( $x', y', z'$ )与整体直角坐标系( $x, y, z$ )各轴间的夹角余弦值,按下列各式计算:

$x'$ 轴与 $x, y, z$ 三轴的夹角余弦值

$$\begin{aligned} l_1' &= -\sin\delta_1 \sin\theta_1 & (\text{左, 右岸算式相同}) \\ m_1' &= \mp \sin\delta_1 \cos\theta_1 & (\text{"-"号用于右岸, "+"号用于左岸}) \\ n_1' &= -\cos\delta_1 & (\text{左, 右岸算式相同}) \end{aligned} \quad (5-1)$$

式中  $\delta, \theta$  ——陡面用 $\delta_1, \theta_1$ , 缓面用 $\delta_2, \theta_2$ 。

$y'$ 轴与 $x, y, z$ 三轴的夹角余弦值

$$\begin{aligned} l_2' &= \cos\delta_0 \sin(\theta_3 - \theta_0) & (\text{左, 右岸算式相同}) \\ m_2' &= \mp \cos\delta_0 \cos(\theta_3 - \theta_0) & (\text{"-"号用于右岸, "+"号用于左岸}) \\ n_2' &= \sin\delta_0 & (\text{左, 右岸算式相同}) \end{aligned} \quad (5-2)$$

式中  $\delta_0 = \tan^{-1}(\tan\delta_2 \sin\theta_4)$

$z'$ 轴与 $x, y, z$ 三轴的夹角余弦值

$$\left. \begin{aligned} l_3' &= m_1' n_2' - n_1' m_2' \\ m_3' &= n_1' l_2' - l_1' n_2' \\ n_3' &= l_1' m_2' - m_1' l_2' \end{aligned} \right\} \quad (5-3)$$

4. 将式(5-1)~(5-3)结果,代入式(3)中,得到转换为局部直角坐标系表示的应力:

$$\begin{aligned} \sigma_{x'} &= l_1'^2 \sigma_x + m_1'^2 \sigma_y + n_1'^2 \sigma_z + 2l_1' m_1' \tau_{xy} + 2m_1' n_1' \tau_{yz} + 2n_1' l_1' \tau_{zx} \\ \sigma_{y'} &= l_2'^2 \sigma_x + m_2'^2 \sigma_y + n_2'^2 \sigma_z + 2l_2' m_2' \tau_{xy} + 2m_2' n_2' \tau_{yz} + 2n_2' l_2' \tau_{zx} \\ \sigma_{z'} &= l_3'^2 \sigma_x + m_3'^2 \sigma_y + n_3'^2 \sigma_z + 2l_3' m_3' \tau_{xy} + 2m_3' n_3' \tau_{yz} + 2n_3' l_3' \tau_{zx} \\ \tau_{x'y'} &= l_1' l_2' \sigma_x + m_1' m_2' \sigma_y + n_1' n_2' \sigma_z + (l_1' m_2' + m_1' l_2') \tau_{xy} + (m_1' n_2' \\ &\quad + n_1' m_2') \tau_{yz} + (n_1' l_2' + l_1' n_2') \tau_{zx} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tau_{y,z} &= l_2 l_3 \sigma_x + m_2 m_3 \sigma_y + n_2 n_3 \sigma_z + (l_2 m_3 + m_2 l_3) \tau_{xy} + (m_2 n_3 \\
 &\quad + n_2 m_3) \tau_{yz} + (n_2 l_3 + l_2 n_3) \tau_{zx} \\
 \tau_{z,x} &= l_3 l_1 \sigma_x + m_3 m_1 \sigma_y + n_3 n_1 \sigma_z + (l_3 m_1 + m_3 l_1) \tau_{xy} + (m_3 n_1 \\
 &\quad + n_3 m_1) \tau_{yz} + (n_3 l_1 + l_3 n_1) \tau_{zx} \quad (6)
 \end{aligned}$$

## 二、由三维有限元应力计算滑动面上的作用力

以上讨论了将三维有限元应力, 转换为以滑动面局部直角坐标系表示应力的方法, 只要知道滑动面上应力分布, 便可求得滑动面上作用力的大小和方向。

为了求得滑动面上的应力分布, 在进行三维有限元分析时, 单元的划分有两种方式: 其一是对稳定不利的贯通性结构面存在时, 单元以沿着结构面划分为宜, 结构面作为单元的边界面求得的应力, 刚好在可能滑动面上。但二滩电站拱坝坝肩岩体是微裂隙岩体, 破坏机理比较复杂, 可能的滑移棱体组合较多, 如仍沿每一个可能滑动面划分单元, 则三维有限元分析的电算信息准备及计算工作量浩繁。其二, 在微裂隙岩体的三维有限元分析中, 目前一般仍简化为各向同性或各向异性的弹性体或弹塑性体。因此, 对每一种拱坝体形, 坝体和基础只用划分一次单元的方式。将求得的三维有限元应力成果, 用以分析不同组合型式的滑移棱体。

由陡倾角面和缓倾角面作为可能滑动面组成的滑移棱体(图4), 图中所表示的一个

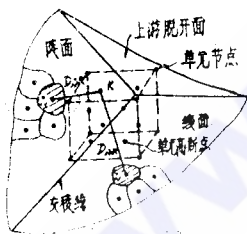


图 4

六面体是三维有限元分析时整个计算域内划分的若干个单元之一, 单元节点和内部高斯点的坐标和应力都已知。这些已知点上的应力如何转移到可能滑动面上并求出作用力, 简述如下:

1. 将陡倾角面和缓倾角面分别划分成  $n$  块小面积, 以  $A_1, A_2, \dots, A_n$  表示, 分块的原则类似于平面有限元单元的划分。分块的形状为三角形、矩形、梯形等, 便于用作图法求形心。

2. 假定每小块面积上应力是均匀分布的, 以形心点的应力表示, 并称形心点为欲求应力点。由三维有限元分析得到的应力

为已知, 称为已知应力点。

设任一欲求应力点  $i$  的整体直角坐标为  $(x, y, z)$ ; 滑动面两侧单元中已知应力点设有  $m$  个, 其中任一点  $k$  的整体直角坐标为  $(x_k, y_k, z_k)$ , 则  $i, k$  两点间的距离为:

$$D_{ik} = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + (z - z_k)^2} \quad (7)$$

在  $m$  个已知应力点中, 选择使  $D_{ik}$  最小的已知应力点的应力, 作为欲求应力点  $i$  的应力, 类此可逐一求得每个滑动面上  $n$  个欲求应力点的应力。应指出, 当  $(D_{ik})_{\min} \neq 0$  时, 求得的  $i$  点应力, 有一定误差, 或偏大, 或偏小, 就整个滑动面而言, 引起滑动力和阻滑力的误差约 3~5%。如有限元分析时, 将滑动面两侧单元网格适当加密, 误差将会更小。

3. 将欲求应力点所得应力, 由整体坐标系转换为滑动面上局部坐标系表示的应力。左右岸局部坐标系应力的正向规定见图5-1, 5-2。

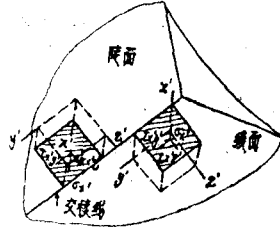


图 5-1

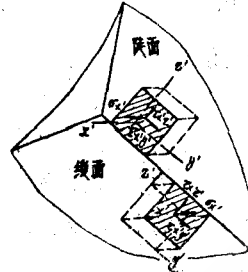


图 5-2

4. 滑动面上作用力及其与整体直角坐标系间关系的计算

以陡倾角滑动面为例, 设滑动面上任一点 $i$ 的法向应力和剪应力为 $(\sigma_{x'})_i$ ,  $(\tau_{x,y})_i$ ,  $(\tau_{x,z})_i$ , 则小块面积 $A_i$ 上的作用力在局部直角坐标系三轴向的分量为:

$$\left. \begin{aligned} x' \text{ 轴向 } \Delta N_i &= A_i \cdot (\sigma_{x'})_i \\ y' \text{ 轴向 } \Delta T_i &= A_i \cdot (\tau_{x,y})_i \\ z' \text{ 轴向 } \Delta Q_i &= A_i \cdot (\tau_{x,z})_i \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

就整个滑动面而言, 设 $N_1$ 表示 $x'$ 轴向总法向力,  $T_1$ 表示 $y'$ 轴向总剪力,  $Q_1$ 表示 $z'$ 轴向总剪力, 有

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \sum_{i=1}^n A_i (\sigma_{x'})_i \\ T_1 &= \sum_{i=1}^n A_i (\tau_{x,y})_i \\ Q_1 &= \sum_{i=1}^n A_i (\tau_{x,z})_i \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

作用于滑动面上的总力以 $P_1$ 表示, 有

$$P_1 = (N_1^2 + T_1^2 + Q_1^2)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$P_1$ 在整体直角坐标系各轴向的分量为 $P_{x1}$ ,  $P_{y1}$ ,  $P_{z1}$ 有

$$\begin{bmatrix} P_{x1} \\ P_{y1} \\ P_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1' & l_2' & l_3' \\ m_1' & m_2' & m_3' \\ n_1' & n_2' & n_3' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 \\ T_1 \\ Q_1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中  $l_1', m_1', n_1', \dots, m_3', n_3'$  由式 (5-1) ~ (5-3) 计算

$P_1$ 在整体直角坐标系中的方向余弦以 $l_{01}, m_{01}, n_{01}$ 表示, 有

$$\begin{Bmatrix} l_{01} \\ m_{01} \\ n_{01} \end{Bmatrix} = \frac{1}{P_1} \begin{Bmatrix} P_{x1} \\ P_{y1} \\ P_{z1} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

同理, 可求得缓倾角滑动面及滑移棱体尾部切割面(图6所示)等的相应各值。

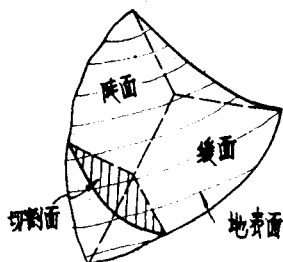


图 6

只要掌握了滑移边界面上作用力的计算方法, 可以根据需要计算出作用于整个滑移棱体上的作用力, 并把它作为外力按刚体极限平衡法进行稳定分析, 以便和试载法成果进行的稳定分析比较。

### 三、岩体稳定分析

根据滑动面上的应力分布及相应岩石的抗剪指标, 计算可能滑移岩体的稳定安全系数来研究滑动稳定(不考虑岩体的转动影响)。为此, 需要计算可能滑移岩体沿滑动方向上的滑动力及阻滑力。如图5-1, 5-2所示, 由陡倾角面和缓倾角面组成的可能滑移棱体, 在于计算它沿交棱线方向的滑动力和阻滑力。对坝肩是微裂隙岩体, 两岸谷坡又是正坡地形, 在拱坝推力作用下, 滑移岩体没有失稳滑动, 特别是考虑凝聚力存在, 分析剪摩稳定时, 不会出现脱开陡面的情况。

目前的三维有限元程序, 在分析岩基应力时, 一般都未考虑基础渗流场的影响。因此, 作用在滑动面上的力, 应由两部份组成: 一部份是由三维有限元分析得到的应力, 通过坐标转换算得的滑动面上的作用力; 另一部份则是滑动面上的渗透压力以及上游脱开面上的水压力。

#### (一) 由三维有限元应力计算滑动力和阻滑力

如图5-1, 5-2所示, 沿 $y'$ 轴向的总剪力就是滑动力, 即陡面滑动力 $T_1$ 和缓面滑动力 $T_2$ 之和。至于阻滑力的计算, 有以下两类情况

第一类情况 滑动陡面或缓面上的法向应力都是压应力, 包括法向应力为零的情况, 滑动面上的阻滑力为:

$$F_1 \text{ (或 } F_2) = \sum_{i=1}^n A_i [(\sigma_{x_i})_i f_i + C_i] \quad (13)$$

式中  $F_1, F_2$ ——分别表示陡面或缓面上的阻滑力;  $f_i, C_i, A_i, (\sigma_{x_i})_i$  分别为陡面或缓面上任一分块 $i$ 的摩擦系数、凝聚力、面积和法向应力;

$n$ ——陡面或缓面上面积分块总数

第二类情况 滑动陡面或缓面上大部份区域为压应力, 局部区域为拉应力。分以下两种情况计算阻滑力:

1. 假定岩石不能承受拉应力, 三维有限元分析考虑超强应力转移

$$F_1 \text{ (或 } F_2) = \sum_{i=1}^{n-k} A_i [(\sigma_{x_i})_i f_i + C_i] \quad (14-1)$$

式中  $k$  表示陡面或缓面上分块面积中, 出现拉应力的块数

$n-k$ 表示陡面或缓面上分块面积中为压应力的块数(包括法向应力为零的分块);  $f_i, c_i, A_i, (\sigma_x)_i$  分别为陡面或缓面上为压应力的分块中(包括法向应力为零的分块)任一块 $i$ 的摩擦系数、凝聚力、面积和法向应力

## 2. 用三维弹性有限元分析不考虑超强应力转移

$$F_1 \text{ (或 } F_2) = \sum_{i=1}^{n-k} A_i [(\sigma_x)_i f_i + c_i] - \left[ \sum_{j=1}^k A_j (\sigma_x)_j \right] f_{cp1} \text{ (或 } f_{cp2}) \quad (14-2)$$

式中  $A_j, (\sigma_x)_j$  分别为陡面或缓面上为拉应力的分块中任一块 $j$ 的面积, 法向应力  $f_{cp1}, f_{cp2}$  分别表示陡面或缓面上的综合摩擦系数, 可按除去拉应力分块面积以外的各分块面积的摩擦系数以面积和应力加权平均求算。其余符号意义同前。

以上两种计算情况中, 第一种情况较为合理, 但计算机时较长, 第二种情况计算机时较短, 但式(14-2)中右端第二项是近似地考虑拉应力存在对阻滑力的影响。根据二滩电站拱坝坝肩岩体稳定分析表明, 陡面、缓面都没有拉应力分布区, 属第一类情况。

### (二) 滑动陡面和缓面上渗透压力对阻滑力的影响

在坝肩岩体稳定分析中, 作用于滑移岩体上的渗透压力, 是需要考虑的基本荷载之一, 确定渗透压力比较合理的方法, 是根据三维渗流场分析或三向渗流电模拟试验资料, 确定滑动面上每个分块面积形心点的渗压强度  $q_i$ , 把它当作拉应力看待, 并将其和三维有限元分析所得的法向应力  $(\sigma_x)_i$  叠加, 根据有无拉应力存在的情况, 按式(13)或式(14-2)进行计算。

对于既没有三维渗流场分析成果, 又无三向渗流电模拟试验资料, 而是根据假定的渗透压力分布图形, 计算滑动陡面和缓面上的总渗透压力, 作为滑移岩体的外力, 这在工程设计中是常用的方法。它对阻滑力的影响, 用当量阻滑力的形式表述

$$\left. \begin{aligned} \Delta F_1 &= \left| u_1 \right| f_{cp1} \\ \Delta F_2 &= \left| u_2 \right| f_{cp2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中  $\Delta F_1, \Delta F_2$  分别表示陡面或缓面渗透压力对阻滑力的影响值

$u_1, u_2$  分别表示陡面或缓面上的总渗透压力

$f_{cp1}, f_{cp2}$  意义同前

### (三) 上游脱开面水压力对稳定的影响(图7)

组成滑移棱体的上游边界面, 称为上游脱开面[2]。

当用三维有限元法分析应力时, 考虑了渗透压力的影响, 则不单独计算脱开面水压力对稳定的影响。如果按假定的水压力分布图形计算脱开面上的总水压力及其作用方向, 再按静力平衡条件分解为沿陡面、缓面的法向力  $R_1, R_2$  及交棱线方向的滑动力  $S$ 。对阻滑力的影响值按下式计算

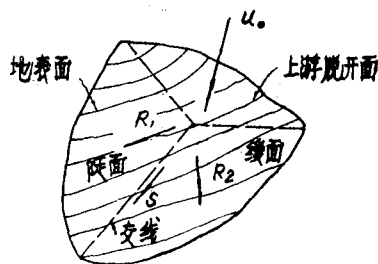


图7

$$\left. \begin{aligned} DF_1 &= R_1 f_{cp1} \\ DF_2 &= R_2 f_{cp2} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中  $DF_1$ ,  $DF_2$  分别为对陡面、缓面阻滑力的影响值

$f_{cp1}$ ,  $f_{cp2}$  意义同前

分别求得影响滑动稳定的各项作用力后, 抗滑剪摩稳定安全系数  $K_c$  由下式计算

$$K_c = \frac{F_1 + F_2 - \Delta F_1 - \Delta F_2 + DF_1 + DF_2}{T_1 + T_2 + S} \quad (17)$$

由陡面和缓面组成的阶梯状滑移岩体(图8), 其稳定分析与前述一陡一缓大块体分析方法相同。

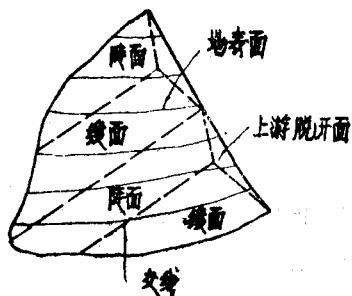


图8

#### 四、实例分析比较

现以二滩电站右岸坝肩1090米高程以上一陡一缓大块体的稳定分析为例, 用三维有限元应力成果按弹性块体进行分析(上游脱开面和滑动面上渗压水的作用, 按拟定的渗透压力图形计算, 简化处理), 并用试载法成果按刚性块体进行分析比较(图9~11所示), 计算成果如下:

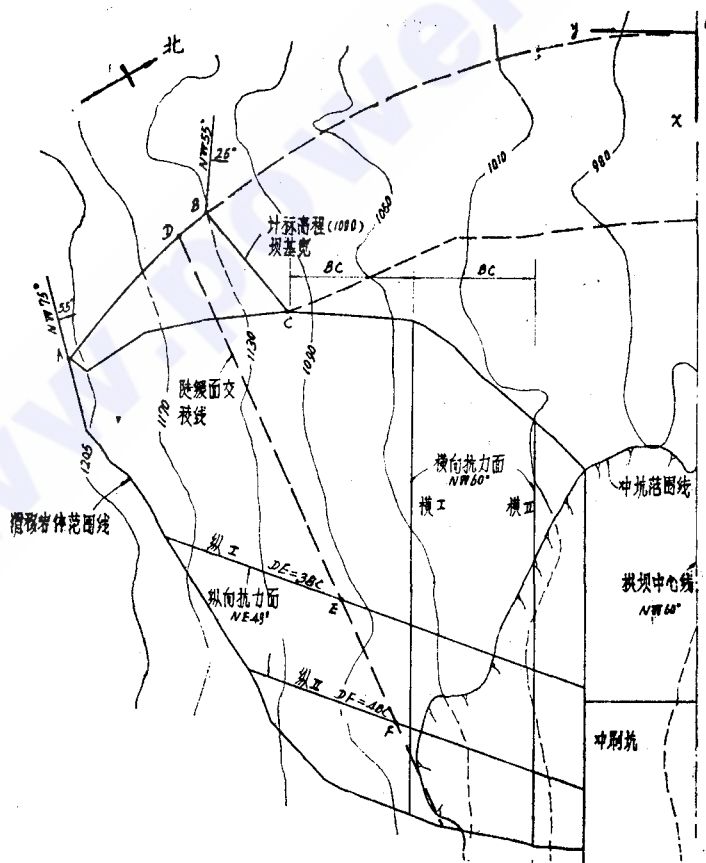


图9 滑移岩体平面范围

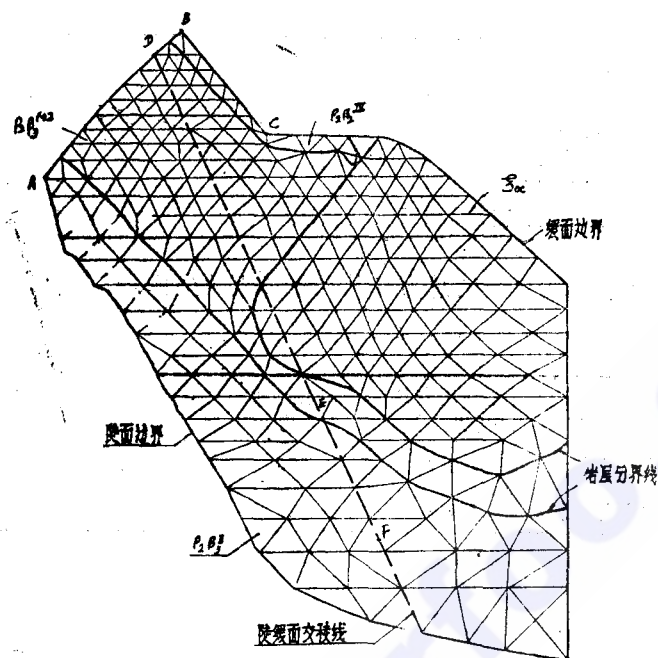


图10 陡、缓面地质分区及面积分块投影图(在xoy平面内)

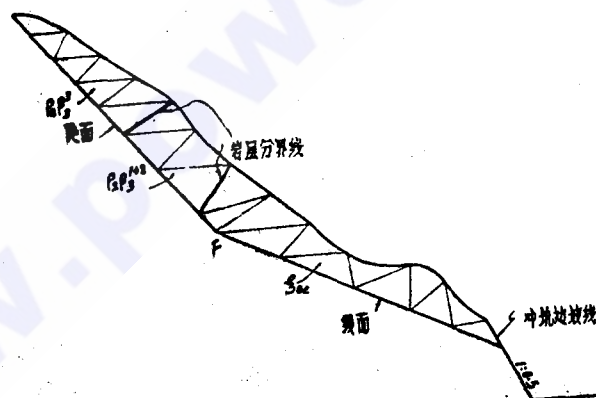


图11 纵Ⅱ地质分区及面积分块投影图(在yoz平面内)

1. 作用于陡、缓面法向及交棱线方向的力如表2。

表2

| 分析方法       | 陡面法向力<br>(万吨) | 缓面法向力<br>(万吨) | 交线方向的力<br>(万吨) |
|------------|---------------|---------------|----------------|
| 刚体极限平衡法    | -359.2        | 653.1         | 271.2          |
| 用三维有限元应力成果 | 255.9         | 484.3         | 185.7          |

表中: 负值表示拉力

2. 用三维有限元应力成果分析所得滑移边界面上法向拉力和压力的比较见表3

表 3

| 滑移边界面性质   | 拉应力区的总拉力<br>(万吨) | 压应力区的总压力<br>(万吨) |
|-----------|------------------|------------------|
| 陡 倾 角 面   | 0                | 255.9            |
| 缓 倾 角 面   | 0                | 484.3            |
| 上 游 脱 开 面 | 8.23             | 3.73             |

3. 拱坝作用于滑移岩体上的总力及其在整体直角坐标系各轴向的分力见表 4

表 4

| 分 析 方 法      | 总作用力 P<br>(万吨) | x 轴向分力 P <sub>x</sub><br>(万吨) | y 轴向分力 P <sub>y</sub><br>(万吨) | z 轴向分力 P <sub>z</sub><br>(万吨) |
|--------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 试载法全调整成果计算   | 143.7          | 126                           | 52.9                          | 44.5                          |
| 用三维有限元应力成果计算 | 159.8          | 127.5                         | 82.3                          | 50.1                          |

4. 剪摩稳定安全系数见表 5

表 5

| 分 析 方 法 及 条 件 |            | 滑 动 形 式 | 稳定安全系数<br>(Kc) |
|---------------|------------|---------|----------------|
| 用三维有限元应力成果分析  |            | 沿交线滑动   | 8.46           |
| 刚体极限平衡法       | 不计尾部岩体弹性抗力 | 沿缓面滑动   | 6.24           |
|               | 计入尾部岩体弹性抗力 | 沿缓面滑动   | 6.55           |

## 五、结 语

1. 用刚体极限平衡法分析, 陡面产生很大拉力, 用三维有限元应力成果分析, 陡面不产生拉力而有很大压力 (见表 2)。同时从表 3 还可看出, 陡面和缓面都不存在拉应力区, 因为在两种分析方法中, 前者是根据刚体静力平衡条件求解各面的作用力, 不能完全反映滑动面的物理力学特性和岩体的应力应变影响, 从而造成陡面产生拉力的不合理性。

2. 表 5 中用三维有限元应力成果分析, 所得稳定安全系数比刚体极限平衡法结果约大 28~35%。因为

(1) 刚体极限平衡法分析, 沿缓面滑动, 未计入陡面凝聚力的影响, 特别是当陡面裂隙不发育, 抗剪指标高时, 影响将更大。而用三维有限元应力成果分析结果, 陡面不产生拉力, 可以考虑陡面的影响。

(2) 刚体极限平衡法是假定滑动面上应力均匀分布的; 三维有限元法则应力随岩石好坏分布不同, 好岩石分配的荷载多。对滑动力而言, 剪应力的具体分布形式, 不影响总滑动力的大小; 但阻滑力则不同, 好岩石的法向应力大, 当好岩石摩擦系数大时, 所提供的阻滑力亦大。

(3) 用三维有限元应力成果换算的拱推力 $P_r$ 值比试载法成果大(表4), 它指向岸坡, 因而增加了稳定性。

3. 在刚体极限平衡法分析中, 如计入滑移岩体尾部(距坝前缘四倍坝基宽度处的纵Ⅰ, 见图9, 图11)的弹性抗力影响, 稳定安全系数比不计时约大5%(见表5), 说明距坝基较远的抗力体尾部岩体, 在抵抗坝肩岩体滑动时的作用较小。

4. 分析复杂地质条件下岩体中的三维渗流场及其对稳定的影响, 目前尚无完善的方法, 文中建议的方法是考虑工程适用的近似分析。另外, 只要能求得合理的考虑开挖卸荷影响的地应力场, 可用本文方法分析地应力对坝肩岩体稳定的影响。

5. 用刚体极限平衡法分析, 其可能滑动面上的综合抗剪指标, 仅采用面积加权平均, 而用本文方法, 实际上是考虑了面积和应力两个因子的加权平均。至于三维有限元应力成果, 如何真实地反映复杂的工程地质条件和岩石的非线性性质, 则是有限元法应力求解决的问题, 也与地质勘探和岩石力学试验有关。

6. 本文所述方法, 计算工作量大, 但编制了ALGOL—60语言程序, 可借助电子计算机完成计算。

### 主要参考文献

- [1] 潘家铮“关于拱坝坝头的稳定分析”水利水电技术 1979年4月
- [2] С. Ц. ТАЦЧЕР, Ю. Б. МГАЛОБЕЛОВ.  
“РАСЧЕТЫ УСТОЙЧИВОСТИ СКАЛЬНЫХ БЕРЕГОВЫХ УПОРОВ  
АРЧНЫХ ПЛОТИН” 1972
- [3] 美国垦务局“重力坝设计”水利出版社 1981年 P69—74
- [4] 潘家铮“建筑物的抗滑稳定和滑坡分析”水利出版社 1980年
- [5] 王毓泰, 周维垣等“拱坝坝肩岩体稳定分析”贵州人民出版社 1982年

### 作者、读者、编者

1. 本刊征求意见表随 1983 年二期发送后, 陆续收到许多读者和作者提出的宝贵意见, 沟通了我们之间的思想, 促进了我们的工作。在此, 向关心爱护本刊的读者和作者们表示衷心的感谢。本刊将按照同志们所提出的意见, 结合我们的具体情况, 尽可能地满足读者们的愿望。

不少同志提出应该就如何尽快开发西南的水能资源; 总结好已建工程的经验; 以及中小型电站的发展与建设……等组织专题论述和报导, 这些很好的意见也是本刊所期望的。从本期开始, 本刊在选题与内容上将有所顾及, 刊物质量与版式处理上也将逐步提高和完善。

我们热诚希望广大读者和作者同志们, 今后继续给予更多的合作, 多多提供稿件, 并不断地对本刊提出建议, 使《四川水力发电》办得更好!

2. 由于我们人手少, 来稿经审理后如若采用, 即通知作者; 但不采用时一般不退稿, 更不能提出具体意见, 请作者原谅。

3. 来稿不宜过长, 论著以不超过8000字为好。篇幅过大者, 本刊采用时将视情况作适当删节, 不愿删节者请予申明。