

重力坝深层抗滑稳定空间分析方法

武永新

(水利电力部天津勘测设计院)

摘 要: 本文根据楔形体抗滑稳定计算原理, 运用刚体极限平衡法, 导出了重力坝深层抗滑稳定空间计算公式。工程实践证明, 当坝基内结构面走向和坝轴线有一定的夹角时, 运用本文提出的空间方法进行坝基稳定分析是经济合理的。

关键词: 重力坝, 软弱夹层地基, 抗滑稳定。

中国图出分类号: TV642

目前, 重力坝深层抗滑稳定刚体极限平衡法主要有常规法和等稳定法两种方法。

当结构面走向和坝轴线走向平行时, 可用平面方法计算; 当二者之间有一定夹角时运用平面方法计算就会产生一定的误差, 此时必须进行空间分析。

1 空间分析方法计算原理

如图 1 (a) 所示, 坝线 AB 和夹层走向 OD 的夹角为 φ , abcd 为一个坝段的平面图, 夹层的倾角为 α , 它在平行和垂直于坝线方向的视倾角分别为 α_1 和 α_2 。 α_1 、 α_2 和 α 的关系为:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \operatorname{tg} \alpha \sin \varphi \cos \alpha_2 \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \operatorname{tg} \alpha \cos \varphi \quad (2)$$

从图 1 (b) 中可以看出, 坝下基岩在夹层面 OD 和竖向切割面 OC (垂直于坝线) 组成的

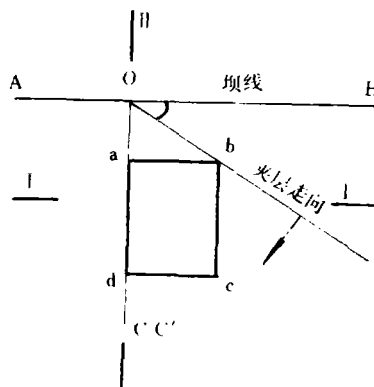


图 1(a) 坝线、夹层、楔形体相对关系

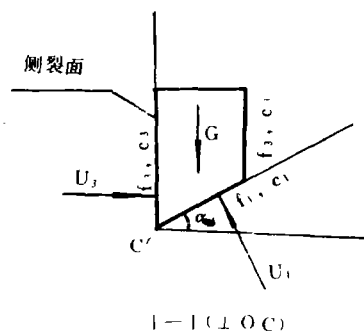


图 1(b) 楔形体受力图

空间内形成了一个楔形体, 设楔形体的自重为 G , 所受水平力为 H , 这两个力在楔形体滑动方向的分力为 $G\sin\alpha_2 + H\cos\alpha_2$ 在夹层面 OC 和竖向切割面 OD 法向的分力分别为 $G\cos\alpha_2 / \cos\alpha_1 \pm H\sin\alpha_2 / \cos\alpha_1$ 和 $G\cos\alpha_2 \tan\alpha_1 \pm H\sin\alpha_2 \tan\alpha_1$, 楔形体的抗滑稳定安全系数为:

$$K = \frac{G\cos\alpha_2(f_1 / \cos\alpha_1 + f_3 \tan\alpha_1) \pm H\sin\alpha_2(f_1 / \cos\alpha_1 + f_3 \tan\alpha_1) + C_1 A_1 + C_3 A_3 - f_1 U_1 - f_3 U_3}{G\sin\alpha_2 + H\cos\alpha_2} \quad (3)$$

式(3)中“ H ”的正负号由水平力的方向确定。

2 空间分析方法

2.1 抗力体沿新鲜岩石面滑出

当坝体下游的岩体内不存在倾向上游的软弱夹层面(或其它结构面)时, 抗力体将切断新鲜岩石沿新鲜岩石破坏面滑出, 计算模型见图2。

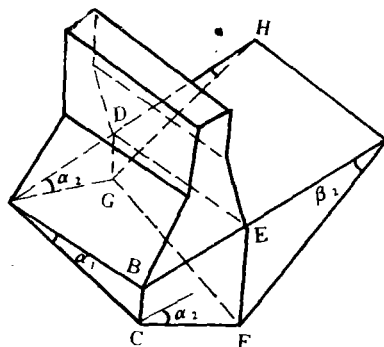


图 2(a) 滑动体抗力体体形图

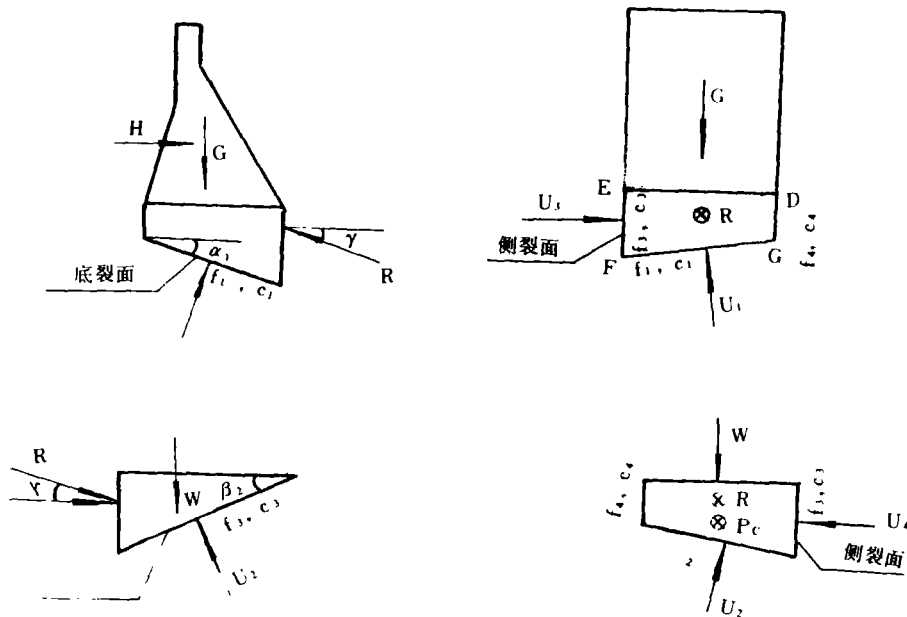


图 2(b) 滑动体抗力体受力图

根据楔形体抗滑稳定计算原理求得滑动体所受力系在底裂面和侧裂面法向的分力为:

$$N_1 = G \cos\alpha_2 / \cos\alpha_1 - H \sin\alpha_2 / \cos\alpha_1 - R \sin(r - \alpha_2) / \cos\alpha_1 - u_1 \quad (4)$$

$$N_3 = G \cos\alpha_2 \tan\alpha_1 - H \sin\alpha_2 \tan\alpha_1 - R \sin(r - \alpha_2) \tan\alpha_1 - u_3 \quad (5)$$

同理, 抗力体受力系在底裂面和侧裂面法向的分力为:

$$N_2 = W \cos \beta_2 \cos \beta_1 + P_c \sin \beta_2 / \cos \beta_1 + R \sin(r + \beta_2) / \cos \beta_1 - u_2 \quad (6)$$

$$N_4 = W \cos \beta_2 \tan \beta_1 + P_c \sin \beta_2 \tan \beta_1 + R \sin(r + \beta_2) \tan \beta_1 - u_4 \quad (7)$$

常规法计算公式推导如下:

根据抗力体在其滑动方向的静力平衡条件可得:

$$f_2 N_2 + f_4 N_4 + C_2 A_2 + C_4 A_4 + W \sin \beta_2 - P_c \cos \beta_2 - R \cos(r + \beta_2) = 0 \quad (8)$$

滑动体在其滑动方向的深层抗滑稳定安全系数用下式表示:

$$k = [f_1 N_1 + f_3 N_3 + C_1 A_1 + C_3 A_3 + R \cos(r + \alpha_2)] / (G \sin \alpha_2 + H \cos \alpha_2) \quad (9)$$

将式(4)(5)代入式(9)同时将式(6)、(7)代入式(8)并整理得:

$$R = \frac{f' W \cos \beta_2 + f'' P_c \sin \beta_2 + C_2 A_2 + C_4 A_4 - f_2 u_2 - f_4 u_4 + W \sin \beta_2 - P_c \cos \beta_2}{\cos(r + \beta_2) - f'' \sin(r + \beta_2)} \quad (10)$$

$$K = \frac{f' G \cos \alpha_2 - f' H \sin \alpha_2 + C_1 A_1 + C_3 A_3 - f_1 u_1 - f_3 u_3 + R \cos(r - \alpha_2) - f' R \sin(r - \alpha_2)}{G \sin \alpha_2 + H \cdot \cos \alpha_2} \quad (11)$$

其中 $f' = f_1 / \cos \alpha_1 + f_3 \tan \alpha_1$

$f'' = f_2 / \cos \beta_1 + f_4 \tan \beta_1$

H —滑动体所受水平力之和 (包括水压力 P_c);

P_c —抗力体竖向破裂面上的水压力;

A_1, A_3 —滑动体底裂面和侧裂面面积;

A_2, A_4 —抗力体底裂面侧裂面面积;

γ —抗力和水平面的夹角;

R —被动抗力。

等稳定法计算公式推导如下:

滑动体和抗力体在其滑动方向的抗滑稳定安全系数分别用下式表示:

$$k_1 = [f_1 N_1 + f_3 N_3 + C_1 A_1 + C_3 A_3 + R \cos(\gamma - \alpha_2)] / (G \sin \alpha_2 + H \cos \alpha_2) \quad (12)$$

$$k_2 = [f_2 N_2 + f_4 N_4 + C_2 A_2 + C_4 A_4 + R \cos(\gamma + \beta_2) - W \sin \beta_2 + P_c \cos \beta_2] / [R \cos(\gamma + \beta_2) - W \sin \beta_2 + P_c \cos \beta_2] \quad (13)$$

将式(4)(5)代入式(12)同时将式(6)(7)代入式(13)并整理后求得等稳定法计算公式为:

$$K_1 = \frac{f' G \cos \alpha_2 - f' H \sin \alpha_2 - f_1 u_1 + C_1 A_1 - f_3 u_3 + C_3 A_3 + R [\cos(\gamma - \alpha_2) - f' \sin(\gamma - \alpha_2)]}{G \sin \alpha_2 + H \cos \alpha_2} \quad (14)$$

$$K_2 = 2 \frac{f' W \cos \beta_2 + f'' P_c \sin \beta_2 - f_2 u_2 - f_4 u_4 + C_2 A_2 + C_4 A_4 + f'' R \sin(\gamma + \beta_2)}{R \cos(\gamma + \beta_2) - W \sin \beta_2 + P_c \cos \beta_2} \quad (15)$$

其中 $f' = f_1 / \cos \beta_1 + f_3 \tan \beta_1$, $f'' = f_2 / \cos \beta_1 + f_4 \tan \beta_1$

K_1, K_2 —滑动体和抗力体深层抗滑稳定安全系数。

2.2 抗力体沿岩石结构面滑出

当坝体下游的岩石内存在倾向上游的软弱夹层时, 抗力体将有可能沿夹层面滑出。抗力体沿软弱夹层面滑出的计算模型见图 3。计算中假设 FCJG 平面平行于两底裂面交线 FC 并且是一个铅直平面, 在 FCJG 平面 (第三破裂面) 上, 两个块体的相互作用力 (即抗力) 分正压力 R (水平向) 和摩擦力 $f_3 R$ (竖向) 两部分, 其中 R 可分解为平行于坝线

的 $R\sin\varphi_1$ 和垂直于坝线的 $R\cos\varphi_1$, 计算中取 $f_s = f/k$, f 为 FCJG 平面的摩擦系数, k 为滑动体的安全系数。

根据楔形体抗滑稳定计算原理求得滑动体所受力系在其底裂面和侧裂面法向的分力分别为:

$$N_1 = (G - f_s R) \cos \alpha_2 / \cos \alpha_1 + (P_c \cos \varphi_1 - H) \sin \alpha_2 / \cos \alpha_2 - R \cos \varphi_1 \sin \alpha_2 / \cos \alpha_1 - u_1 \quad (16)$$

$$N_3 = (G - f_s R) \cos \alpha_2 \tan \alpha_1 + (P_c \cos \varphi_1 - H) \sin \alpha_2 \tan \alpha_1 - R \cos \varphi_1 \sin \alpha_2 \tan \alpha_1 - u_3 - (P_c + R) \sin \varphi_1 \quad (17)$$

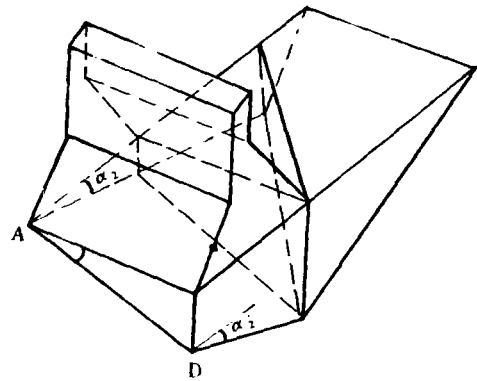


图 3(a) 滑动体、抗力体体形图

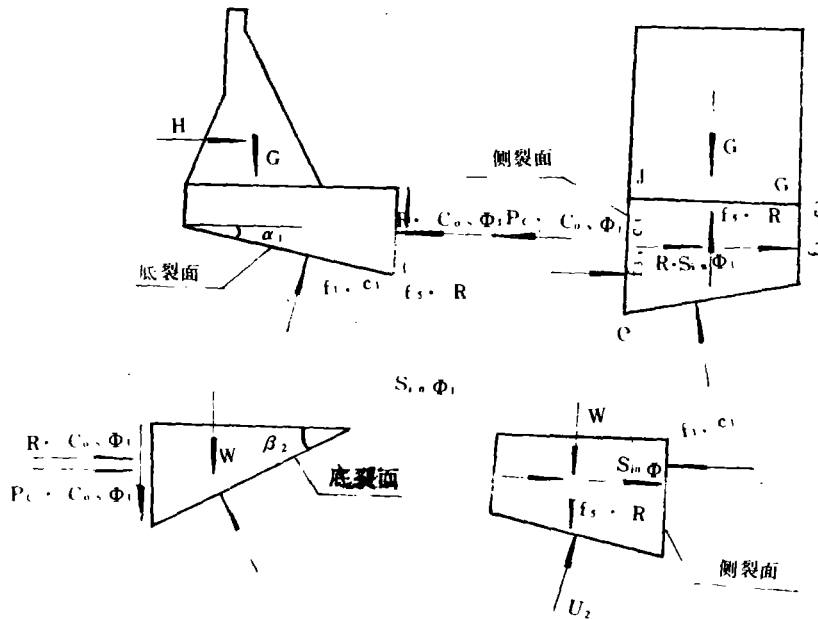


图 3(b) 滑动体、抗力体受力图

同理, 抗力体所受力系在其底裂面和侧裂面法向分力为:

$$N_2 = (W + f_s R) \cos \beta_2 / \cos \beta_1 + (P_c \cos \varphi_1 \sin \beta_2 / \cos \beta_1 + R \cos \varphi_1 \sin \beta_2 / \cos \beta_1 - u_2 \quad (18)$$

$$N_4 = (W + f_s R) \cos \beta_2 \tan \beta_1 + P_c \cos \varphi_1 \sin \beta_2 \tan \beta_1 + R \cos \varphi_1 \sin \beta_2 \tan \beta_1 + (R + P_c) \sin \varphi_1 - u_4 \quad (19)$$

常规法计算公式推导如下:

根据抗力体在其滑动方向的静力平衡条件可得:

$$f_2 N + f_4 N_4 + C_4 A_4 + C_3 A_3 + (W + f_s R) \sin \beta_2 - (P_c + R) \cos \varphi_1 \cos \beta_2 = 0 \quad (20)$$

滑动体在其滑动方向的深层抗滑稳定安全系数可用下式表示:

$$k = [f_1 N_1 + f_3 N_3 + C_1 A_1 + C_3 A_3 + R \cdot \cos \varphi_1 \cos \alpha_2] / [(G - f_s R) \sin \alpha_2 + (H - P_c \cos \varphi_1) \cos \alpha_2] \quad (21)$$

将式(16)(17)代入式(21)同时将式(18)(19)代入式(20)并整理得常规法计算公式为:

$$R = \frac{W \cos \beta_2 + f' W \sin \beta_2 - f_2 u_2 - f_4 u_4 + C_2 A_2 + C_4 A_4 + P_c \cos \varphi_1 (f' \sin \beta_2 - \cos \beta_2) + f_4 P_c \sin \varphi_1}{\cos \varphi_1 \cos \beta_2 - f' f_2 \cos \beta_2 - f' f' \cos \varphi_1 \sin \beta_2 - f_4 \sin \varphi_1 - f_5 \sin \beta_2} \quad (22)$$

$$K = \frac{f' - (G - f_2 R) \cos \alpha_2 + f' (P_c \cos \varphi_1 - H) \sin \alpha_2 - f_1 u_1 - f_3 u_3 + C_1 A_1 + C_3 A_3 + R \cos \varphi_1 (\cos \alpha_2 - f \sin \alpha_2) - f_2 (P_c + R) \sin \varphi_1}{(G - f_2 R) \sin \alpha_2 + (H - P_c \cos \varphi_1) \cos \alpha_2} \quad (23)$$

其中 $f' = f_1 / \cos \alpha_1 + f_3 \tan \alpha_1$, $f'' = f_2 / \cos \beta_1 + f_4 \tan \beta_1$;

H—滑动体所受水平力之和 (不包括水压力 P_c)。

等稳定法计算公式推导如下:

滑动体和抗力体在其滑动方向的抗滑稳定安全系数分别用下式表示:

$$K_1 = \frac{f_1 N_1 + f_3 N_3 + C_1 A_1 + C_3 A_3 + R \cos \varphi_1 \cos \varphi_1 \cos \alpha_2}{(G - f_2 R) \sin \alpha_2 + (H - P_c \cos \varphi_1) \cos \alpha_2} \quad (24)$$

$$K_2 = \frac{f_2 N_2 - f_4 N_4 + C_2 A_2 + C_4 A_4}{(R + P) \cos \varphi_1 \cos \beta_2 - (W + f_2 R) \sin \beta_2} \quad (25)$$

将式(16)(17)代入式(24)同时将式(18)(19)代入式(25)并整理得等稳定法深层抗滑稳定计算公式为:

$$K_1 = \frac{(G - f_2 R) \cos \alpha_2 + f' (P_c \cos \varphi_1 - H) \sin \alpha_2 - f_1 u_1 - f_3 u_3 + C_1 A_1 + C_3 A_3 + R \cos \varphi_1 (\cos \alpha_2 - f \sin \alpha_2) - f_2 (P_c + R) \sin \varphi_1}{(G - f_2 R) \sin \alpha_2 + (H - P_c \cos \varphi_1) \cos \alpha_2} \quad (26)$$

$$K_2 = \frac{f' (W + f_2 R) \cos \beta_2 + f' (P_c + R) \cos \varphi_1 \sin \beta_2 - f_2 u_2 - f_4 u_4 + C_2 A_2 + C_4 A_4 + f_4 (P_c + R) \sin \varphi_1}{(P + R) \cos \varphi_1 \cos \beta_2 - (W + f_2 R) \sin \beta_2} \quad (27)$$

其中 $f' = f_1 / \cos \alpha_1 + f_3 \tan \alpha_1$, $f'' = f_2 / \cos \beta_1 + f_4 \tan \beta_1$;

令 $K_1 = K_2 = K$ 即可求得 K 及 R 。

公式中各符号意义见第一种情况及前述, 其中滑动体所受水平力 H 不包括水压力 P_c 。

2.3 坝基内存在倾向上游的夹层面

当坝基内存在倾向上游的夹层面时, 坝基将产生单斜式破坏, 计算模型见图 4。根据楔形体计算原理求得坝基的深层抗滑稳定安全系数为:

$$K = \frac{f' G \cos \alpha_2 + f' H \sin \alpha_2 - f_1 u_1 - f_3 u_3 + C_1 A_1 + C_3 A_3}{H \cos \alpha_2 - G \sin \alpha_2} \quad (28)$$

其中 $f' = f_1 / \cos \alpha_1 + f_3 \cdot \tan \alpha_1$

公式中各符号意义同式(3)。

3 注意事项

3.1 计算时可根据具体的地质条件取一定长度的坝段为计算对象, 不应以单宽也不一定以一个坝段为计算对象。计算单元内不应存在高倾角顺河向结构面, 否则应重新划分计算单元。

3.2 选取侧向阻滑面 (侧向切割面) 上的强度指标要慎重, 当坝基内存在顺河向高倾角裂隙或夹层时, 应根据实际情况取结构面的抗剪强度指标。

3.3 当计算单元的相邻大坝基础不存在深层滑动问题时, 各种计算情况中的 A_3 和 A_4

可取两侧向切割面的面积之和, 否则取二者之差。

3.4 对于情况 2.2, 交线 FC 的方位可由赤平投影和几何算法确定。

3.5 侧向水压力 u_3 和 u_4 的计算中规定夹层埋藏较深一侧为正, 另一侧为负。

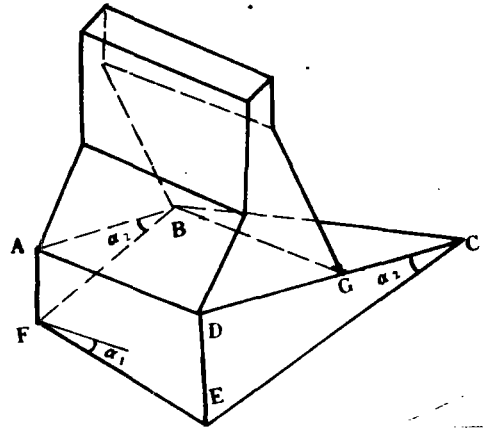


图4 滑动体体形图

参 考 文 献

- [1] 潘家铮. 重力坝设计. 水利电力出版社, 1987年12月

A Three Dimensional Analysis Method for the stability Against Sliding of Gravity Dam On Rock Foundation With Weak Layers

Wu Yong Xin

(Tianjin Investigation And Design Institute of Ministry of water Resources And Electric power)

Abstract: With the limit equilibrium method for the rigid body, this paper deduces a three dimensional analysis method for the stability against sliding of gravity dam on rock foundations with weak layers, on the basis of the stability against sliding of wedge. The engineering practice shows that it is economical and reasonable to apply the method given here in to the analysis for the stability of gravity dam foundation with weak layers, in the case of the dam axis being not parallel to the strike of weak layers therein.

key words: Gravity Dam, Rock Foundation with weak layers, Stability against sliding.