

PC—1500袖珍计算机在大坝 深层抗滑稳定分析中的应用*

(刚体极限平衡法)

张 怡 霞

(水电部成都勘测设计院)

一、前 言

水电工程中大都采用刚体极限平衡法来评价大坝深层抗滑稳定,配合必要的地质力学模型试验和有限元分析进行验算复核。利用刚体极限平衡求坝后尾岩最小抗力的方法有双斜滑动法和三倾斜面滑动法。但这些方法中有的试算工作量较大,若用电子计算机计算,则可迅速、准确地算出结果。

本文根据文献〔5、6〕所提供的数学模型,采用 BASIC 算法语言,以逐点扫描逼近法编制大坝深层抗滑稳定计算程序,简便易行,结果准确,可供 PC—1500 袖珍计算机或其它配有 BASIC 语言的计算机使用。

二、概 述

三倾斜面滑动法的滑动模式为:坝后基岩的破裂面为 OC 、 CD (极限状态),破裂面的倾角为 β_1 、 β_2 (参阅文献〔2、5〕与图1)。双斜滑动法的滑动模式是假定极限状态的破裂面为 $O'D'$ 。 O' 为过 O 的铅直线和夹层 L 的交点;破裂角为 β 。

为了编制程序的需要,下面将文献〔4、5〕中双斜滑动法及三倾斜面滑动法的各种计算方法略述于后。

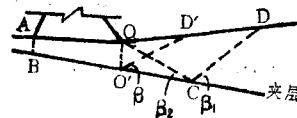


图 1

三、双斜滑动法

双斜滑动法中较合理的计算方法有强度储备系数法和被动抗力法。另外还有模型试验的超载系数法。

基本假定及公式推导过程见文献〔6〕。

1. 强度储备系数法 (或等安全系数法)

强度储备系数 K_s 的定义是: 坝体 (包括地基) 的强度减低 K_s 倍时, 坝体就达破坏状态。

* 本文在编写过程中得到鲁慎吾同志的指导, 在此表示感谢。

由图2所示的坝段及阻滑体的静力平衡, 可得下面一组方程:

$$K_{s1} = \frac{f_1(W_1 \cos \alpha - P \sin \alpha - R \sin(\theta - \alpha) - U_1 \sin(\psi_1 + \alpha)) + C_1 l_1}{P \cos \alpha + W_1 \sin \alpha + U_1 \cos(\psi_1 + \alpha) - R \cos(\theta - \alpha)} \quad (1)$$

$$R = \frac{f_2(W_2 \cos \beta - U_2 \sin(\psi_2 - \beta)) + K_{s2}(W_2 \sin \beta - U_2 \cos(\psi_2 - \beta)) + C_2 l_2}{K_{s2} \cos(\theta + \beta) - f_2 \sin(\theta + \beta)} \quad (2)$$

破裂角的计算公式〔5,6〕为:

$$\tan \beta = -\tan \phi_2' + \sqrt{\tan^2 \phi_2' + \tan \phi_2' \cot(\phi_2' + \theta) + \frac{\cos \theta \tan \delta}{\cos \phi_2' \sin(\phi_2' + \theta)}} \quad (3)$$

$$\phi_2' = \arctan(f_2/K_{s2}) \quad (4)$$

$$\delta_1 = \delta + \Delta \delta$$

在程序中, 用变量 T 代替公式中的 ϕ_2' .

式中 $\delta(D)^*$ ——阻滑体地表面的倾角;

$\Delta \delta$ ——阻滑体上竖向三角形荷载的化引角度,

$$\Delta \delta = \arctan((q_2 - q_1)/rl_{12}) \quad (5)$$

$q_1(Q_1)$ 、 $q_2(Q_2)$ ——梯形荷载起终点的强度(见图3);

$l_{12}(L3)$ ——梯形荷载的水平作用长度;

$W_2(W2)$ ——阻滑体的重量(在下游水位以下为浮重);

$$W_2 = \frac{1}{2} \gamma H^2 \cos \delta \cdot \frac{\cos \beta}{\sin(\beta - \delta)} + q H \cos \delta \cdot \frac{\cos \beta}{\sin(\beta - \delta)} \quad (6)$$

式中 $q(Q)$ ——阻滑体上竖向荷载的平均压强(方向向下为正);

$$q = q_0 + q_1 + \frac{1}{2} H \cos \delta \cdot \frac{\cos \beta \cdot (q_2 - q_1)}{\sin(\beta - \delta) \cdot l_{12}} \quad (7)$$

$q_0(Q0)$ ——阻滑体上均布荷载的压强(见图3);

$U_2(U2)$ ——阻滑体上的渗透压力。

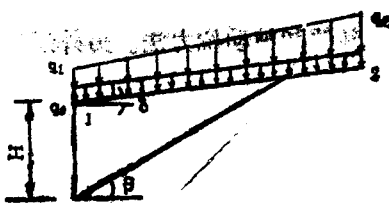


图3

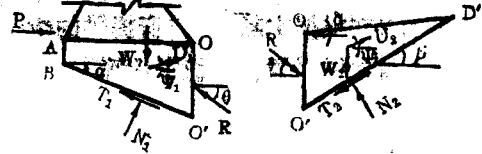


图2

$$U_2 = \frac{1}{2} i_0 \gamma_0 H^2 \cos \delta \cdot \frac{\cos \beta}{\sin(\beta - \delta)} \quad (8)$$

$i_0(I)$ ——阻滑体上渗压平均强度(近似值);

$\gamma_0(G1)$ ——水容重;

$\gamma(G2)$ ——阻滑体岩石容重;

$P(P)$ ——作用于夹层以上水平力的代数和;

* 括号中的符号为程序中使用的变量(下同)。

$f_1 (F_1)$ 、 $C_1 (C_1)$ ——主滑面抗剪断强度指标;

$f_2 (F_2)$ 、 $C_2 (C_2)$ ——阻滑体岩石的抗剪断指标;

$\theta (C)$ ——抗力 R 的倾角;

$\alpha (A)$ ——软弱夹层与水平面的夹角;

$\psi_2 (E_2)$ ——渗透压力合力的倾角;

$H (H)$ —— OO' 的高度;

l_2 ——阻滑体 $O'D'$ 的长度, $l_2 = \frac{H \cos \delta}{\sin(\beta - \delta)}$;

$\beta (B)$ ——抗力 R 的倾角。

用式(1)、(2)求抗力和强度储备系数时,未知数为 K_{s1} 、 K_{s2} 、 R 。两个方程式三个未知数,有无穷多组解,只有在 $K_{s1} = K_{s2} = K_s$ 时的解,才为所求的解,必须通过试算找出这一组解。由于试算工作量而限制了它的使用范围,采用本文程序,只需将有关数值填入 DATA 语句(读数语句)中,即可迅速算出结果。

2. 被动抗力法

被动抗力法安全系数 K_c 定义为有效阻力和滑动力之比。

分别取坝段及抗力体作为脱离体,它们所受荷载如图2所示。这里 $T_i = f_i N_i + C_i l_i$, $i = 1, 2$ 。

稳定计算公式[5,6]为:

$$K_c = \frac{f_1 (W_1 \cos \alpha - P \sin \alpha - R \sin(\theta - \alpha) - U_1 \sin(\psi_1 + \alpha)) + U_1 \cos(\psi_1 + \alpha)}{P \cos \alpha + W_1 \sin \alpha} \quad (9)$$

$$+ \frac{R \cos(\theta - \alpha) + C_1 l_1}{P \cos \alpha + W_1 \sin \alpha}$$

$$R = \frac{f_2 (W_2 \cos \beta - U_2 \sin(\psi_2 - \beta)) + W_2 \sin \beta - U_2 \cos(\psi_2 - \beta) + C_2 l_2}{\cos(\theta + \beta) - f_2 \sin(\theta + \beta)} \quad (10)$$

破裂角的计算公式[5,6]为:

$$\tan \beta = -\tan \phi_2 + \sqrt{\tan^2 \phi_2 + \tan \phi_2 \cotg(\phi_2 + \theta) + \frac{\cos \theta \tan \delta}{\cos \phi_2 \sin(\phi_2 + \theta)}} \quad (11)$$

$$\phi_2(T) = \arctg f_2$$

式(9)、(10)、(11)中的符号意义同前。

3. 双斜滑动法的计算程序

(1) 框图(图4)

(2) 程序

```
250 REM "STABLE ANALYSIS"
```

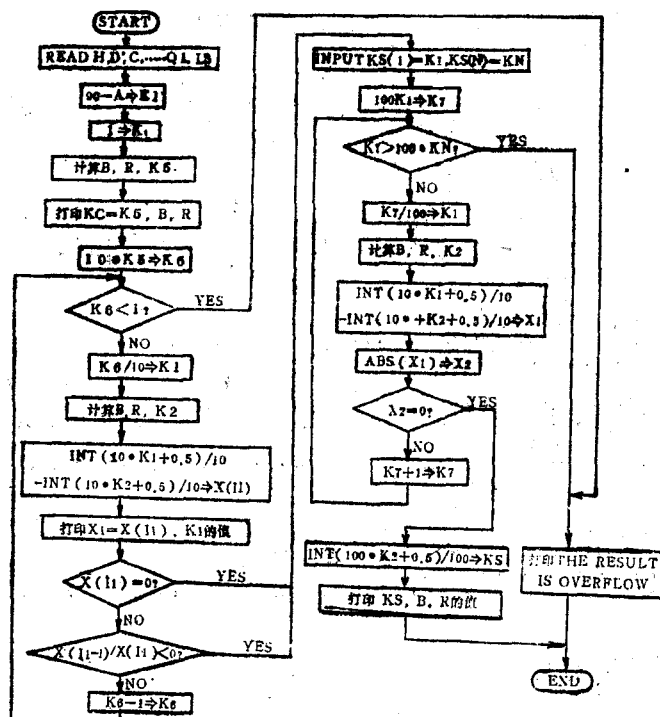
```
255 CLEAR
```

```
260 DIM X(70)
```

```
265 READ H, D, C, F2, C2, I, G1, G2, F1, W1, A, P, U1, C1,
```

```
    L1, Q0, Q2, Q1, L3
```

```
267 E1 = 90 - A
```



```

270 LET K1=1
275 T=ATN(F2/K1)
278 D1=D+ATN ((Q2-Q1)/(G2*L3))
280 B=ATN(-TANT+SQR((TANT)^2+TANT/TAN(T+C)+COSC
      *TAND1/(COST*SIN(T+C))))
285 L2=H*COSD/SIN(B-D)
290 U2=0.5*I*G1*H^2*COSD*COSB/SIN(B-D)
295 Q=Q0+Q1+0.5*H*COSD*COSB*(Q2-Q1)/(SIN(B-D)*L3)
300 W2=0.5*G2*H^2*COSD*COSB/SIN(B-D)+Q*H*COSD
      *COSB/SIN(B-D)
302 E2=90+B
305 R2=F2*(W2*COSB-U2*SIN(E2-B))+K1*(W2*SINB-U2
      *COS(E2-B))+C2*L2
310 R3=K1*COS(C+B)-F2*SIN(C+B)
315 R=R2/R3
320 K3=F1*(W1*COSA-P*SINA-R*SIN(C-A)-U1*SIN(E1
      +A))+C1*L1-U1*COS(E1+A1)+R*COS(C-A)

```

```

330 K5=INT(100*K3/K4+0.5)/100:LPRINT "Kc="; K5:LPRINT
      "B="; B:LPRINT "R="; R:LF1
335 FOR K6=10*K5 TO 1 STEP -1
340 K1=K6/10
345 E1=90-A
350 T=ATN(F2/K1)
352 D1=D+ATN((Q2-Q1)/(G2*L3))
355 B=ATN(-TANT+SQR((TANT)^2+TANT/TAN(T+C)+COSC
      *TAND1/(COST*SIN(T+C))))
360 L2=H*COSD/SIN(B-D)
365 U2=0.5*I*G1*H^2*COSD*COSB/SIN(B-D)
370 Q=Q0+Q1+0.5*H*COSD*COSB*(Q2-Q1)/(SIN(B-D)
      *L3
375 W2=0.5*G2*H^2*COSD*COSB/SIN(B-D)+Q*H*COSD
      *COSB/SIN(B-D)
378 E2=90+B
380 R2=F2*(W2*COSB-U2*SIN(E2-B))+K1*(W2*SINB-U2
      *COS(E2-B))+C2*L2
385 R3=K1*COS(C+B)-F2*SIN(C+B)
390 R=R2/R3
395 K3=F1*(W1*COSA-P*SINA-R*SIN(C-A)-U1*SIN(E1
      +A))+C1*L1
400 K4=P*COSA+W1*SINA+U1*COS(E1+A)-R*COS(C-A)
405 K2=K3/K4:I1=I1+1
410 X(I1)=INT(10*K1+0.5)/10-INT(10*K2+0.5)/10
415 LPRINT "X1="; X(I1); TAB 9; "K1="; K1
420 IF X(I1)=0 GOTO 440
425 IF X(I1-1)/X(I1)<0 GOTO 440
430 NEXT K6
435 LF1
440 INPUT "KS(1)="; K1, "KS(N)="; KN
442 LF 1
445 FOR K7=100*K1 TO 100*KN
450 K1=K7/100
452 E1=90-A
455 T=ATN(F2/K1)
458 D1=D+ATN((Q2-Q1)/(G2*L3))
460 B=ATN(-TANT+SQR((TANT)^2+TANT/TAN(T+C)+

```

```

+ COSC • TAN D1 / ( COST • SIN ( T + C ) ) )
465 L2 = H • COSD / SIN ( B - D )
470 U2 = 0.5 • I • G1 • H^2 • COSD • COSB / SIN ( B - D )
475 Q = Q0 + Q1 + 0.5 • H • COSD • COSB • ( Q2 - Q1 ) / ( SIN ( B - D ) • L3 )
480 W2 = 0.5 • G2 • H^2 • COSD • COSB / SIN ( B - D ) + Q • H • COSD •
      COSB / SIN ( B - D )
482 E2 = 90 + B
485 R2 = F2 • ( W2 • COSB - U2 • SIN ( E2 - B ) ) + K1 • ( W2 • SINB - U2
      • COS ( E2 - B ) ) + C2 • L2
490 R3 = K1 • COS ( C + B ) - F2 • SIN ( C + B )
495 R = R2 / R3
500 K3 = F1 • ( W1 • COSA - P • SINA - R • SIN ( C - A ) - U1 • SIN ( E1
      + A ) ) + C1 • L1
505 K4 = P • COSA + W1 • SINA + U1 • COS ( E1 + A ) - R • COS ( C - A )
510 K2 = K3 / K4
515 X1 = INT ( 10 • K1 + 0.5 ) / 10 - INT ( 10 • K2 + 0.5 ) / 10
520 X2 = ABS ( X1 )
525 IF X2 = 0 GOTO 550
530 NEXT K7
535 LPRINT "THE RESULT IS OVERFLOW"
540 END
550 KS = INT ( 100 • K2 + 0.5 ) / 100
555 LPRINT "KS="; KS: LPRINT "B="; B: LPRINT "R="; R
520 GOTO 540
*565 DATA <H>, <D>, <C>, <F2>, <C2>, <I>, <G1>,
      <G2>, <F1>, <W1>, <A>, <P>, <U1>, <C1>, <L1>,
      <Q0>, <Q2>, <Q1>, <L3>

```

(3) 程序使用说明

输入程序、读入数据后，置于 RUN 状态。按操作键 DEG RUN，打印机纸带上打印出被动抗力法的计算成果： K_c 、 β 、 R ，并打印出 X_1 、 K_1 ；在 $X_1=0$ （或 X_1 变号）时，计算机显示屏上显示出 $KS(1)=$ ，键入 $X_1=0$ （或 X_1 变号前）的 K_1 值。按 INTER 键，显示屏上又显示出 $KS(N)=$ ，可键入 $X_1=0$ （或 X_1 变号后）的 K_1 值，即可算得等安全系数法的成果： KS 、 β 、 R 。

(4) 例题 1（双斜滑动法）

已知重力坝的荷载为： $W_1=11526$ 吨， $P=2171$ 吨， $U_1=713$ 吨。在坝趾设排水，假定此点渗压为零，即 $i_0=0$ 。坝下夹层倾角 $\alpha=6^\circ 30'$ ；夹层的抗剪断强度 $f_1=0.31$ ， $c_1=0$ 。坝后尾岩抗剪断强度： $f_2=1.0$ ， $c_2=52.2$ 吨/米²， $H=26.5$ 米， $\psi_1=83.5$ 。

* 语句中为 $\langle H \rangle$ ， $\langle D \rangle$ ， $\langle C \rangle$ ，…… $\langle L3 \rangle$ ，为 H 、 D 、 C …… $L3$ 的数值。

$q_0 = 4.35$ 吨/米, $q_1 = q_2 = 0$ 。

将已知数据读入程序后, 可迅速算出:

① 被动抗力法

$$KC = 5.06 (5.11^*),$$

$$\beta = 18.77^\circ (19^\circ),$$

$$R = 14250 \text{ 吨}。$$

② 强度储备系数法

$$KS = 3.65 (3.68^*),$$

$$\beta = 30.76^\circ (33^\circ)$$

$$R = 2570 \text{ 吨}$$

四、三倾斜面滑动法

假定极限状态下的滑动模式如图 5。地面倾角为 δ ; OC 、 CD 为滑裂面, β_1 、 β_2 为破裂角 (OC 、 CD 的倾角)。经排水处理后, 尾岩的渗压为零。

1. 稳定计算公式^[5]为

$$K_C = \frac{f_1 \{W_1 \cos \alpha - P \sin \alpha - U_1 \sin(\psi_1 + \alpha)\} - U_1 \cos(\psi_1 + \alpha) + R_L}{P \cos \alpha + W_1 \sin \alpha} \quad (12)$$

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

$$\lambda(\beta_1, \beta_2) = \frac{\sin(\beta_1 + \beta_2) \sin(\beta_1 + \phi_2) \sin(\beta_2 + \delta) \sin(\beta_2 + \theta + \phi_1 - \alpha)}{\sin(\beta_1 - \delta) \sin(\beta_1 + \beta_2 + \theta + \phi_2) \sin^2(\beta_2 - \alpha)} \quad (13)$$

$$(\delta < \beta_1 < \frac{\pi}{2}, \quad \alpha < \beta_2 < \frac{\pi}{2})$$

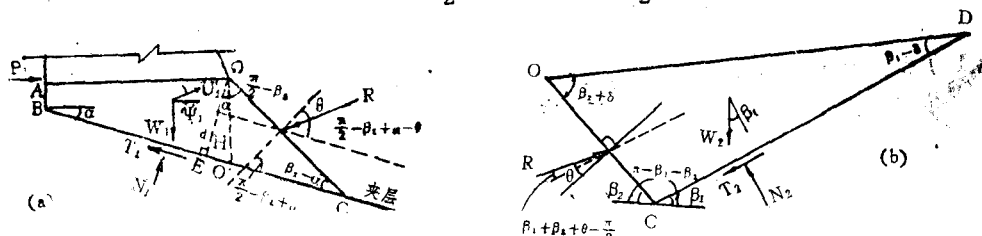


图 5

式中 K_C (KC) —— 安全系数

R_L (RL) —— 阻滑力 (为阻滑体的抗力在主滑面上的投影);

ϕ_2 (T_2) —— 阻滑体岩石的内摩擦角;

θ (C) —— 抗力 R 与破裂面 CD 法线的夹角;

γ (G) —— 阻滑体岩石的容重 (水下为浮重);

H (H) —— OO' 的高度 (见图 5);

* 括号中的数值为手算成果。

$\phi_1 (T_1)$ ——主滑面BC的摩擦角 ($\phi_1 = \arctg f_1$);

$\beta_1 (B_1)$ 、 $\beta_2 (B_2)$ ——破裂角。

破裂角的计算公式〔5〕为:

$$\operatorname{ctg}(\beta_1 - \delta) - \operatorname{ctg}(\beta_1 + \phi_2) = \operatorname{ctg}(\beta_1 + \beta_2) - \operatorname{ctg}(\beta_1 + \beta_2 + \theta + \phi_2) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg}(\beta_1 - \delta) - \operatorname{ctg}(\beta_1 + \phi_2) &= 2\operatorname{ctg}(\beta_2 - \alpha) - \operatorname{ctg}(\beta_2 + \delta) \\ &\quad - \operatorname{ctg}(\beta_2 + \theta + \phi_1 - \alpha) \end{aligned} \quad (15)$$

式(14)、(15)中的 β_1 、 β_2 , 需用文献〔5〕中的附表试算求出, 方法较繁。

下面将式(14)、(15)稍加变换, 用 BASIC 语言编制成程序, 只要输入数据, 就可迅速算出结果。

在式(15)中令

$$T = 2\operatorname{ctg}(\beta_2 - \alpha) - \operatorname{ctg}(\beta_2 + \delta) - \operatorname{ctg}(\beta_2 + \theta + \phi_1 - \alpha);$$

即 $T = f(\beta_2)$ 。

$$\text{又因} \quad T = \operatorname{ctg}(\beta_1 - \delta) - \operatorname{ctg}(\beta_1 + \phi_2) = \frac{2\sin(\phi_2 + \delta)}{\cos(\phi_2 + \delta) - \cos(2\beta_1 + \phi_2 - \delta)},$$

故 $\beta_1 = (\arccos S_1 + \delta - \phi_2) / 2$ 。

式中 $S_1 = \cos(\phi_2 + \delta) - 2\sin(\phi_2 + \delta) / T$ 。

在式(14)中令

$$S_2 = \operatorname{ctg}(\beta_1 + \beta_2) - \operatorname{ctg}(\beta_1 + \beta_2 + \theta + \phi_2)$$

S_2 应等于 T 。即给出一个 β_2 值, 就可求出 T 、 β_1 、 S_1 、 S_2 。在 $S_2 - T = 0$ 时的 β_1 、 β_2 即为所要求的解。

2. 三倾斜面滑动法的计算程序

(1) 框图(图6)

(2) 程序

```
1  CLEAR
3  DIM X(70)
5  READ D, T1, T2, C, A
10 FOR B2=21 TO 70 STEP 2
15  GOSUB 145
20  LPRINT "X="; X(B2); TAB 10; "B2="; B2
21  IF X(B2)=0 GOTO 25
22  IF X(B2-2)/X(B2)<0 GOTO 25
23  NEXT B2
25  INPUT "B2="; B5, "BN="; BN
30  LPRINT "B2="; B5; TAB 10; "BN="; BN
```

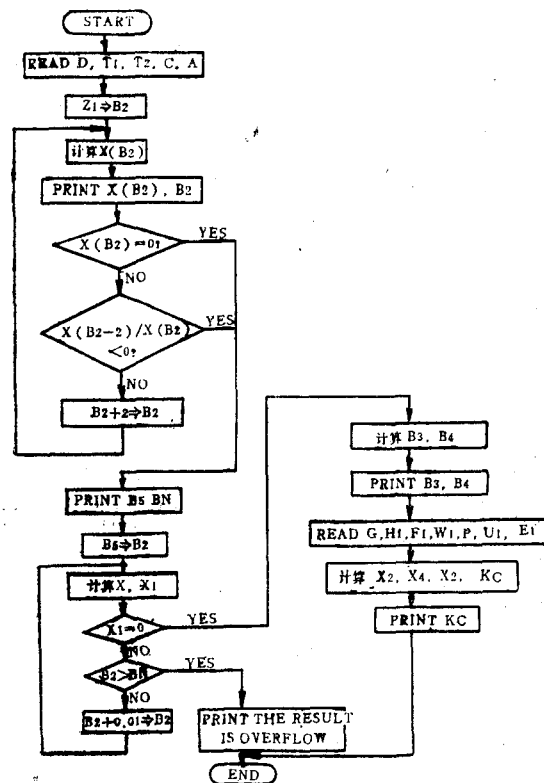



图 6

```

35 FOR B=100 • B5 TO 100 • BN
40 B2=B/100
45 T=2/TAN ( B2-A ) -1/TAN ( B2+D ) -1/TAN ( B2+C+T1-A )
50 LET S1= ( T • COS ( D+T2 ) -2 • SIN ( D+T2 ) ) /T
55 B1= ( ACS S1+D-T2 ) /2
60 S2=1/TAN ( B1+B2 ) -1/TAN ( B1+B2+C+T2 )
65 LET X=INT ( 100 • S2+0.5 ) /100-INT ( 100 • T+0.5 ) /100
70 LET X1=ABS ( X )
75 IF X1=0 GOTO 90
80 IF B2>BN GOTO 110
85 NEXT B
90 LET B3=INT ( 100 • B1+0.5 ) /100
95 LET B4=INT ( 100 • B2+0.5 ) /100:LF1
100 LPRINT "B1="; B3; TAB 10; "B2="; B4
105 GOTO 200
110 BEEP 3, 100, 30
115 PRINT "THE RESULT IS OVERFLOW!"
120 GOTO 240
  
```

```

*125 DATA <D>, <T1>, <T2>, <C>, <A>
145 LET T=2/TAN(B2-A)-1/TAN(B2+D)-1/TAN(B2+C+T1-A)
150 LET S1=(T•COS(D+T2)-2•SIN(D+T2))/T
155 B1=(ACS S1+D-T2)/2
160 S2=1/TAN(B1+B2)-1/TAN(B1+B2+C+T2)
165 LET X(B2)=INT(100•S2+0.5)/100-INT(100•T+0.5)/100
170 RETURN
200 READ G, H1, F1, W1, P, U1, E1
205 X3=SIN(B3+B4)•SIN(B3+T2)•SIN(B4+D)•SIN(B4+C+T1-A)
210 X4=SIN(B3-D)•SIN(B3+B4+C+T2)•SIN(B4-A)^2
215 X2=X3/X4
220 RL=G•H1^2•X2/(2•COST1)
225 KC=(F1•(W1•COSA-P•SINA-U1•SIN(E1+A))-U1
      •COS(E1+A)+RL)/(P•COSA+W1•SINA)
230 LPRINT "KC="; KC
235 DATA <G>, <H1>, <F1>, <W1>, <P>, <U1>, <E1>
240 END

```

(3) 程序使用说明

输入程序, 读入数据后, 置于 RUN 状态。按操作键 DEG RUN, 打印机纸带上打印出 X、B2 的数值; 当 X=0 (或 X 变号) 时, 计算机自动停止运算, 屏幕上显示出 B2= , 键入 X=0 时的 B2 值 (或 X 变号前的 B2 值)。按 INTER 键, 屏幕上又显示出 BN= , 可键入 X=0 时的 B2 值 (或 X 变号后的 B2 值), 即可算得成果。

(4) 例题 2 (三倾斜面滑动法)

已知混凝土重力坝的荷载为: $W_1=1690$ 吨, $P=1100$ 吨, $U_1=170$ 吨, $\psi_1=85^\circ$ 。主滑面 (夹层) 的倾角 $\alpha=5^\circ$, $\phi_1=12^\circ$, $f_1=0.213$ 。坝后地面倾角 $\delta=14^\circ$, $d=17.55$ 米。地基 $\gamma=1.6$ 吨/米³, $\phi_2=30^\circ$ 。抗力 R 的倾角 $\theta=30^\circ$ 。

将已知数据读入程序后, 即可迅速算出: $\beta_1=41.21^\circ$, $\beta_2=45.9^\circ$, $K_C=1.79$ 。与查表 (文献[5]中的表格) 手算成果一致。

参 考 文 献

- [1] 潘家铮:《水工结构分析文集》, 北京, 电力工业出版社, 1981
- [2] 王志良: 坝体抗滑稳定的三倾斜面法, 《水利学报》, 1982年第5期
- [3] 谭浩强等编著:《BASIC语言》, 北京, 科学出版社
- [4] 潘家铮: 关于拦河坝的抗滑稳定安全度问题, 《水利水电技术》, 1981年5月
- [5] 张怡霞: 坝后为倾斜地面时坝体抗滑稳定的计算 (三倾斜面法), 《四川水力发电》, 1983年第2期
- [6] 张怡霞: 大坝深层抗滑稳定分析及滑裂角的计算, 《水利学报》, 1983年第7期

* 语句中的 <D>, <T1>, <T2>, <C>, <A> 为 D, T1, T2, C, A 的数值。

** 语句中的 <G>, <H1>, <F1>, <W1>, <P>, <U1>, <E1> 为 G, H1, F1, W1, P, U1, E1 的数值。