

# 淤地坝系规划设计通用软件及其应用

张汉雄 郭宝安

(中国科学院水土保持研究所·陕西杨陵·712100)  
(水利部)

**摘要** 用 BASIC 语言编程的坝系规划设计通用软件已被研制。它能用于坝高小于50m 的淤地坝和小型水库的坝体、放水设施和溢洪道设计。该软件具有选择合理参数、运算速度快、精度高和通用性强的优点,为坝系设计提供了一个有效工具。

**关键词** 淤地坝系 规划设计 通用软件

## Universal Software and It's Application of Silt Arrester System Planning and Designing

Zhang Hanxiong Guo Bao'an

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi, PRC)

**Abstract** The universal software for a dam system planning and designing is programmed with BASIC language, it can be used to design a dam body, drainage works and spillway for silt arrester of less than 50m high and small reservoir. The software has many advantages of choosing suitable parameters, fast runing, high precision and strong universality, it provides a effective tool for dam system design.

**Keywords:** silt arrester system; program and design; universal software

淤地坝是黄土丘陵区拦泥减沙、建设高产农田的主要工程措施。设计和施工质量好的淤地坝,水土保持和增产效益显著。反之,可能导致链锁溃坝,造成巨大损失。因此,按部颁标准和有关规范合理设计淤地坝系是建坝中一项关键任务。淤地坝系设计包括坝体、溢洪道和放水洞的结构设计及流域洪水泥沙计算,计算繁复,工作量大。为便于淤地坝规范设计的普及应用,我们根据淤地坝的设计原理和计算方法,用 BASIC 语言编制了通用软件,可满足不同建坝要求的淤地坝系、小型水库设计应用,为工程技术人员提供一种简便的设计工具。

## 1 设计原理

### 1.1 坝体断面及渗透计算

1.1.1 初选坝断面 黄土高原的淤地坝多数是用水坠施工的均质土坝,一般无防渗要求,主

要考虑坝坡的稳定性。根据建坝土料的物理力学性质和坝址处的坝高—库容与坝高—淤地面积关系曲线,初步确定坝高。然后,由淤地坝的经验坝坡参考表(略)初选坝坡与坝顶宽  $B$ 。当坝高  $H = 10\text{m}$  时,初选值即为确定值;  $H = 11 \sim 20\text{m}$  时,坝坡需满足

$$K_b = 0.8 \text{tg} \varphi m_1 \quad (1)$$

式中:  $m_1$ ——上游坝坡比;  $\varphi$ ——坝体土料内库擦角。否则,需加大坝坡比。当  $H > 20\text{m}$  时,需由初选的坝坡进行稳定分析。

1.1.2 确定浸润线及渗透量 淤地坝一般不考虑坝基渗漏,当坝高大于  $10\text{m}$  时,需分析坝体渗透对坝坡稳定的影响。若沿坝顶上游边缘作垂线将坝横断面分成两段,则上段单宽渗透量等于下段渗透流量,则可由下述平衡方程试算求单宽渗透流量  $q$  及浸润线高度  $a_0$ , 即

$$\frac{q}{q^k} = \frac{H_1^2 - (a_0 + H_2)^2}{2L} = \frac{a_0}{m_2^2} \left[ 1 + 2.31 \text{lg} \frac{a_0 + H_2}{a_0} \right] \quad (2)$$

式中:  $q$ ——单宽渗透流量 ( $\text{m}^3/\text{d}$ )  $\text{m}^{-1}$ ;  $a_0$ ——浸润线逸出高度, (m);  $q^k$ ——坝体土料渗透系数 ( $\text{m}/\text{d}$ );  $m_1, m_2$  分别为上下游坝坡比;  $H_1, H_2$  分别为上下游水深 (m);  $L$  为浸润线的水平距离 (m), 可由  $m, H$  与  $H_1$  计算求得。则坝下游坝坡需建反滤体的高度为

$$H_3 = 0.2 + a_0 + H_2 \quad (3)$$

由单宽渗透流量  $q$  可计算浸润线座标  $x, y$ , 即

$$x = \frac{q^k}{2q} (H_1^2 - y^2) \quad (4)$$

1.1.3 坝坡稳定分析 淤地坝未淤满前有蓄水时坝坡较不安全,可按小型水库正常运用设计,并视其坝高不同,安全系数  $K = 1.05 \sim 1.20$ 。坝坡稳定分析通常采用圆弧法,若取滑动圆弧计算土条宽度  $b = 0.1r$  (滑弧半径),土条高度用化引高度表示,则  $K$  值计算式可简化为

$$K = \frac{0.1r_i \gamma_{\text{浮}} \sum_1^n h_{\text{阻}} \cos \delta_i \text{tg} \varphi + C L_s}{0.1r_i \gamma_{\text{浮}} \sum_1^n h_{\text{滑}} \sin \alpha} \quad (5)$$

式中:  $C$ ——土料粘结力 ( $\text{t}/\text{m}^2$ );  $L_s$ ——滑弧长度 (m)  $n$ ——土条个数;  $\alpha$ ——滑弧土条的切线角 ( $\gamma$ );  $h_{\text{滑}}, h_{\text{阻}}$  分别为滑动力和阻滑力的化引高度 (m), 可由土料的浮容重  $\gamma_{\text{浮}}$ 、湿容重、饱和容重及土条在浸润线不同部位高度计算之。

坝坡稳定分析一般要计算多个滑弧的  $K$  值,最小的  $K$  值即为最危险滑动圆弧,并与规范要求比较。若不满足设计标准,需增大坝坡比,重新计算,计算工作量大。

## 1.2 放水洞设计

淤地坝放水设施多为卧管式或塔式,放水孔为园形,属薄壁孔口出流,每阶单孔或两孔。每孔的泻水流量为

$$Q_0 = \mu w \sqrt{2gZ} = 2.156d^2 \sqrt{Z} \quad (6)$$

卧管和塔式的台阶高差一般在  $0.5 \sim 0.6\text{m}$ , 为便于管理,多采用两阶(孔)调节放水,则每阶一孔的两孔调节放水孔径为

$$d = \frac{Q_0}{2.156 \left( \frac{Q_0}{Z} + \frac{Q_0}{2Z} \right)} = 0.438 \frac{Q_0}{Z} \quad (7)$$

式中:  $Q_0$ ——单孔放水流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $Z$ ——放水孔高差 (m)。

水平放水涵洞多数采用无压矩形断面,上部为拱形,少数为有压管道,比降为 $1/100 \sim 1/200$ ,按明渠设计。卧管斜坡部分亦为矩形断面,比降 $1 \cdot 2 \sim 1 \cdot 3$ ,水深为其高度的 $1/2$ ,按明渠流的陡坡设计(见下文)。

### 1.3 溢洪道断面及消能设计

1.3.1 溢洪道断面 主要包括确定溢洪道进口宽度、陡坡长度和确定合适的坡度及坡面防冲措施。对于淤地坝或小型水库,溢洪道设计流量可按高切林简化公式计算:

$$Q = Q_m \left(1 - \frac{W_1}{W_2}\right) \quad (8)$$

式中:  $Q, Q_m$  ——分别为设计溢洪流量和洪峰流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $W_1, W_2$  分别为坝的滞洪库容和设计洪水总量( $\text{m}^3$ )。

溢洪道进口可按宽顶堰或侧堰溢流计算,进口断面多为梯形或矩形( $m=0$ ),则可由滞洪水深  $H_p$  及  $Q$  确定进口宽度  $B_2$ , 即

$$B_2 = \frac{Q}{1.58H_p^{3/2} - mH_p} \quad (9)$$

溢洪道明渠段仍按明渠流设计断面,并根据泻流处的地形条件、落差选择陡坡比降,计算陡坡长度。陡坡段多为矩形或梯形断面,其临界水深  $H_k$  为

$$H_k = \sqrt[3]{0.1121Q_a^2} = 0.482Q_a^{0.667} \quad (\text{矩形}) \quad (10)$$

梯形断面可由下式试算求  $H_k$

$$w_k/B_k = 0.112Q^2 \quad (11)$$

式中:  $Q_a$  ——单宽流量( $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ );  $W_k$  为  $H_k$  处之过水断面面积( $\text{m}^2$ );  $w_k = (B_2 + m_3H_k)H_k$ ,  $B_k$  为  $H_k$  之水面宽( $\text{m}$ );  $B_k = B_2 + 2m_3H_k$ 。

临界水深确定之后,则可计算相应于  $H_k$  的水力要素  $w_k, B_k$  和湿周  $X_k$ 、水力半径  $R_k$ 、谢才系数  $C_k$ ,并按下式计算临界低坡  $I_k$ :

$$I_k = 8.918X_k / C_k^2 B_k \quad (12)$$

如果  $I_k > I$ , 则属陡坡; 否则重新选择陡坡比降  $I$  或按明渠设计泻水段。

陡坡的正常水深  $H_o$  由下面方程试算

$$K_o = Q_o / I^{1/2} = w_o C_o \overline{R_o} \quad (13)$$

式中:  $K_o, w_o, C_o, R_o$  分别为  $H_o$  的特性流量、断面积、谢才系数和水力半径。于是可计算平均水深  $H_a = 0.5(H_k + H_o)$  及其水力要素  $B_a, w_a, R_a, C_a$  及  $K_a$ , 以及流量模数  $J_a$ 、水力指数  $E$ 。陡坡降水曲线采用水力指数积分法、曲线上各点之距离  $L_s$  为

$$L_s = \frac{H_o}{I} \{ N_2 - N_1 - (1 - J_a)(F_2 - F_1) \} \quad (14)$$

式中:  $N_1, N_2$  分别为降水曲线起点和各点之相对水深( $\text{m}$ ), 即  $N_1 = H_k/H_o, N_2 = H_2/H_o$ , 且  $H_k > H_2 > H_o$ ;  $F_1, F_2$  分别为  $N_1$  和  $N_2$  之积分函数, 由  $E_o$  值查专用表。

由降水曲线可求得陡坡末端水深  $H_e$  及其流速  $V_e$ 。若  $V_e$  允许不冲流速, 可进行消能设计; 否则需减缓陡坡比降或改进陡坡砌护, 重新设计。

1.3.2 消能设计 溢洪道若为基岩, 排泄水流可直接泄入沟道, 若为土基或松软岩层, 陡坡下游需建消力池, 防止对坝肩、坡角的冲刷。

陡坡末端水深即为水跃的跃前水深,矩形断面消力池的共轭水深为

$$H_f = 0.5H_e \left\{ 1 + 0.816(H_k^3/H_e^3) - 1 \right\} \quad (15)$$

若为梯形断面,可根据水跃函数(略)试算其跃后水深  $H_f$ 。矩形断面的水跃长度为  $L_k = 6.9(H_f - H_e)$ , 梯形断面的  $L_k = 5H_f$ 。若  $H_f > H_b$  (下游河槽水深), 则产生淹没水跃, 不必修建消力池; 否则需确定消力池之深度与长度。为确保消力池中之水跃淹没, 池中水深应大于  $H_f$ , 则消力池深度  $D$  可由下述简化公式逐步试算求解, 即

$$H_4 + 0.051Q_a^2/H_4^2 - D = H_b + 0.056Q_a^2/H_b^2 \quad (16)$$

式中:  $H_4$  为消力池末端水深(m), 是收缩断面水深  $H_c$  之函数, 而  $H_c$  又是断面比能  $E_o$  之函数, 需由下两式逐步试算求解, 即

$$\begin{cases} H_4 = 0.525H_c \left( 1 + 0.815Q_a^2/H_c^3 - 1 \right) \\ E_o = H_c + 0.056Q_a^2/H_c^2 \end{cases} \quad (17)$$

消力池长度是池中壅高水跃长度与坎壁至收缩断面距离之和, 即

$$L_d = 0.75L_k + 1.74 \left( P_1 + 0.25H_3 \right) H_3 \quad (18)$$

式中:  $P_1$  为计入池深之坎壁高度(m);  $H_3$  为计入行进流速之陡坡末端水深(m);

$$H_3 = H_c + 0.051V_e^2。$$

在溢洪道地形条件有利时, 可进行挑流消能。为选择合适的挑射角和确定安全抛射距离, 可由下式计算水流射距

$$S = \frac{V_e^2 \cos \beta \sin \beta}{9.81} \left[ 1 + \frac{19.62(P_2 + 0.5H_e \cos \beta)}{V_e^2 \sin^2 \beta} \right] \quad (19)$$

式中:  $S$  ——射流中心点在河床的水平距离(m);  $V_e$  ——鼻坎流速, 即陡坡末端流速(m/s);  $P_2$  ——跌坎高差(m);  $\beta$  ——鼻坎挑射角( $^\circ$ )。通过选择不同的  $P_2, \beta$  值计算, 则可确定安全挑射距离。

## 2 程序设计与模块功能

淤地坝设计错综复杂, 计算量大, 尤其是试算反复进行, 应用微机程序则可快速求解。整个设计过程实际上是一个循序渐进、逐步寻优、不断反馈的过程系统。因此, 程序设计必须满足坝的设计要求, 逐步进行计算, 判断分析, 同时要有可操作性, 使用户免除复杂的公式和步聚记忆, 便于非专业设计人员使用。基于这种设计思路, 用 BASIC 语言编程, 按模块化交互运行原理编制了淤地坝设计的通用软件, 坝系设计过程的程序流程见图1和图2。

### 2.1 模块功能与运行机制

该软件由坝体(含放水洞)与溢洪道两个模块组成, 相互联接, 交互运行, 按设计程序逐步运行, 前级计算结果又可作为后级的计算参数, 联为一体。系统运行过程如下: 首先输入建坝的基础资料, 程序将根据经验值初选坝坡与坝顶宽, 确定是否进行渗透计算和稳定分析。若渗透流量和安全系数符合要求, 则估算土方和设计放水洞; 否则将逐步增大边坡比, 重新计算, 不断反馈, 到满足坝体设计要求为止, 并转入溢洪道模块。

溢洪道模块首先计算泄洪流量  $Q$  和进口宽度  $B_2$ , 再分别按矩形和梯形断面计算陡坡长度  $L$ 、临界水深  $H_k$ 、临界低坡  $I_k$ , 判断是否属陡坡。然后计算陡坡的正常水深  $H_o$ , 平均水深  $H_a$  及

其水力要素,依次可求出降水曲线上各点水平距及末端水深  $H_e$  与流速  $V_e$ , 检验陡坡比降能否满足不冲流速要求, 否则需修改陡坡比降  $I$ 。消力池亦分矩形和梯形两种, 可由共轭水深  $H_f$  和水跃函数求其跃后水深  $H_f$  和水跃长度  $L_k$ , 再由建消力池后的 3 个水跃函数逐次试算求解收缩断面水深  $H_c$ 、末端水深  $H_4$  及池深  $D$ , 并检验水跃是否被淹没; 否则需增加池深, 并求消力池长度  $L_d$ 。若为挑流消能, 则确定合适的挑射角  $\beta$  和挑射距离  $S$ 。

## 2.2 参数优选与精度控制

为使坝的设计参数合理, 我们将已建坝设计中的经验参数装入程序, 若计算值偏差较大, 则程序可进行量化逻辑判断, 使之修改设定值重新计算, 以优选合理的设计参数。为确保设计参数精度达到 0.01m, 计算精度则为 0.005。设计过程中, 参数  $q, \alpha, H_k, H_o, H_f, H_e, H_c, H_4, D$  的确定都要通过大量试算。程序设计通过循环语句实现计算, 但若把循环变量的初值和终值定的范围太大, 步长太小, 将增加计算机工作量。例如要确定一个试算参数, 程序要执行数百次循环, 求解

$D$  值采用的双重嵌套循环, 循环次数更多。为减少计算量, 根据水力学原理确定了各种参数的合理变化范围, 并采用反循环方式(由大到小), 使  $H_k$  的试算次数由 135 次减到 65 次, 大大减少试算工作量。

## 3 应用实例

为便于用户应用该程序, 兹通过实例说明。

例1 绥德县韭园沟流域计划修建一座淤地坝, 已知设计资料: 50年一遇洪峰流量  $Q_m = 100\text{m}^3/\text{s}$ , 洪水总量  $W_2 = 18 \times 10^4\text{m}^3$ , 规划坝高 27m, 滞洪水位 24m, 滞洪库容  $W_1 = 12.24 \times 10^4\text{m}^3$ ; 筑坝土料渗透系数  $q_k = 0.25\text{m}/\text{d}$ ,  $\varphi = 32^\circ$ ,  $C = 0.6\text{t}/\text{m}^2$ , 土料容重  $\gamma_{\text{湿}} = 1.9\text{t}/\text{m}^3$ ,  $\gamma_{\text{浮}} = 1.05\text{t}/\text{m}^3$ ,  $\gamma_{\text{饱}} = 2.05\text{t}/\text{m}^3$ ; 放水洞流量  $Q_0 = 0.3\text{m}^3/\text{s}$ , 采用两孔调节; 溢洪道址土质基础, 陡坡高差  $P = 15\text{m}$ ,  $P_2 = 3\text{m}$ ,  $H_b = 0.5\text{m}$ 。试设计坝断面、卧管及溢洪道(矩形)各部分参数。

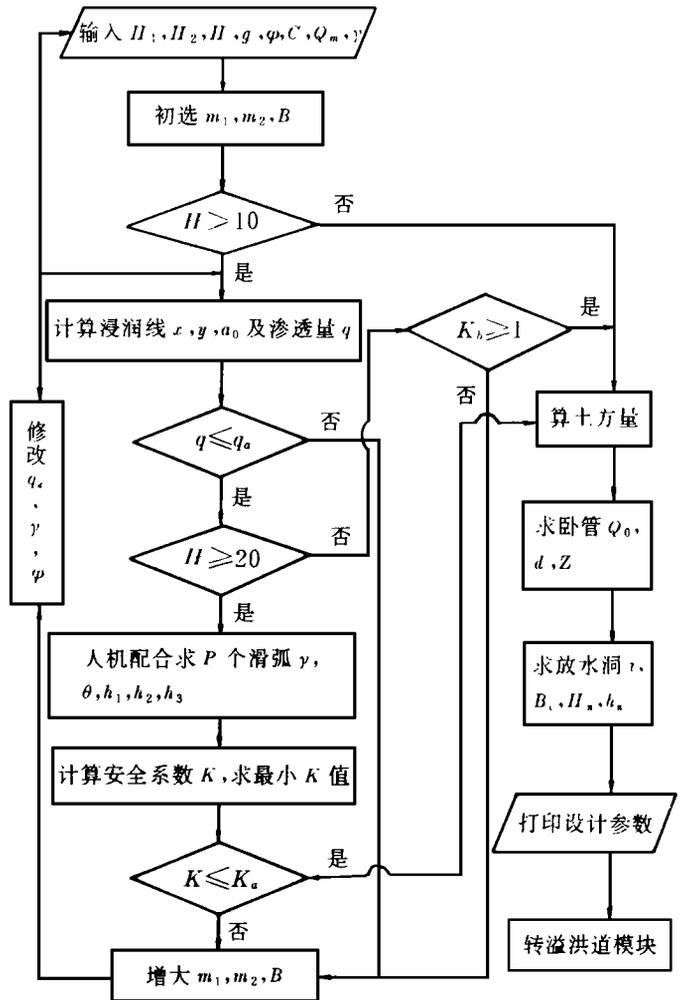


图1 淤地坝体设计模块的程序流程框图

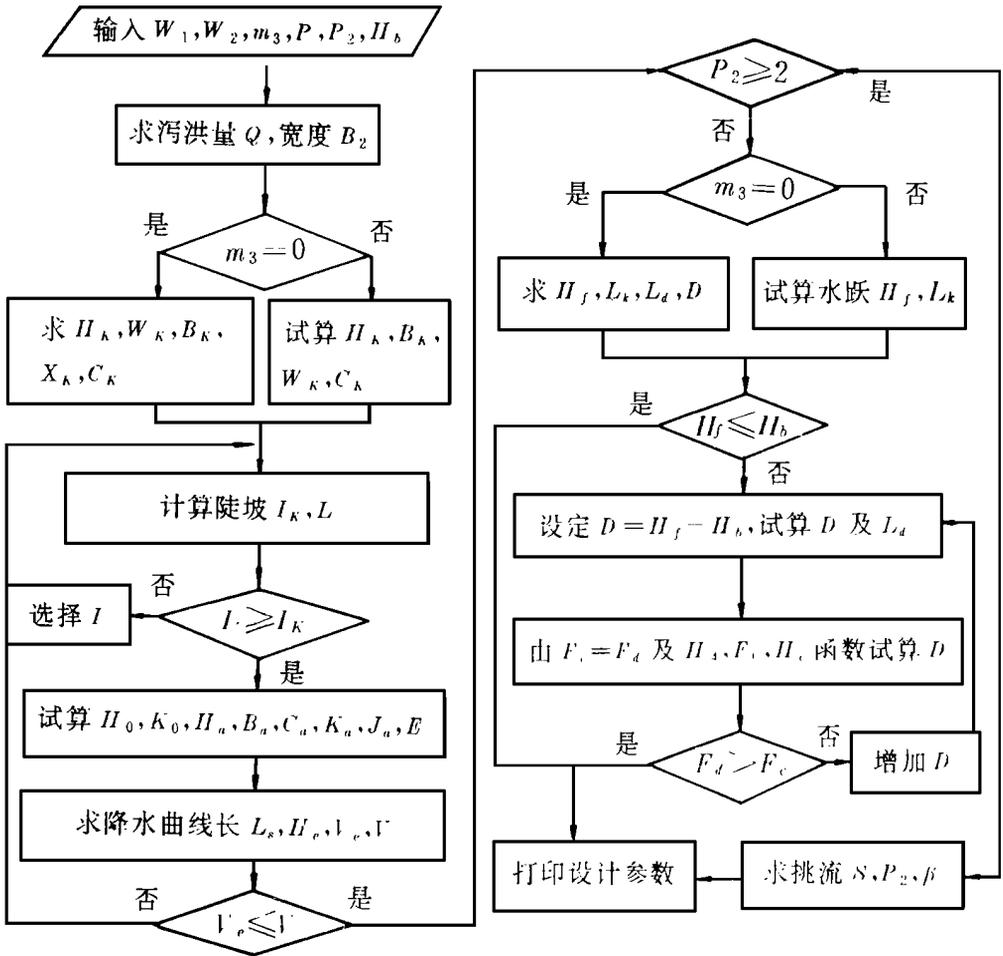


图2 溢洪道设计模块的程序流程

先将坝轴线分为5段,由图中量各段坝高与坝长,将上述参数输入程序675—680语句,再把坝坡滑弧参数输入690—720语句。键入RUN 程序运行后显示N,P,M,O=?即输入坝轴段数、滑弧个数、土条数、放水孔数,即开始计算。第一次初选坝坡  $m_1 = 2.75, m_2 = 2.5$  及  $\alpha = 5.0, K = 1.04$ , 不能满足设计要求。增加坝坡后重新计算,打印坝体模块设计参数:

坝坡比	$m_1 = 3.0, m_2 = 2.75$	坝顶宽	$B = 6m$
浸润线高度	$a_o = 6.95m$	渗透流量	$q = 0.87m^3/d/m$
坝体土方	$W = 73\ 275m^3$	卧管宽度	$B_s = 0.33m$
放水孔径	$d = 0.30m$	卧管水深	$h = 0.44m$
坝坡安全系数	$K = 1.07$	渗透总量	$q_{总} = 73.8m^3/d$

浸润线座标 X, Y 值(略), 于是可绘制浸润线。

若输入 P 个滑弧参数, 则计算 P 个 K 值, 程序优选后将最小 K 值的坝断面参数作为最优设计参数。

接着运行溢洪道模块。先显示  $B_2 = 7.16, Q = 32, Q_a = 4.47, H_k = 1.31, L = 61.85$  和“它属陡坡”, 然后又算出  $H_o, K_o, E_o, L_s$  等值, 并显示“ $v_e < v$ ”, 即陡坡坡度合适。由于该例  $P_2$

= 3, 故按挑流设计, 打印设计参数:

泻洪流量	$Q = 32\text{m}^3/\text{s}$	溢洪道进口宽	$B_2 = 7.16\text{m}$
陡坡长度	$L = 61.85\text{m}$	临界水深	$H_k = 1.31\text{m}$
正常水深	$H_o = 0.48\text{m}$	临界底坡	$I_k = 0.1112$
水力指数	$E_o = 3.126$	末端水深	$H_e = 0.48\text{m}$
最佳挑射角	$\beta = 30^\circ$	末端流速	$V_e = 9.31\text{m}/\text{s}$
最大挑射距	$S = 11.39\text{m}$	降水曲线长	$L_s = 29.17\text{m}$

算例2 韭园沟某淤地坝需改建溢洪道, 已知其  $Q_m, W_1, W_2, H, P$  值与例1相同,  $P_2 = 0.5, H_b = 1.5, V = 8.5$ , 要求按梯形断面 ( $m = 0.25$ ) 设计溢洪道改建方案。

先将新参数输入程序, 启动溢洪道模块。第1次选择陡坡坡度  $I = 0.33$ , 计算出末端流速  $V_e = 9.83 > V$ , 程序判断后要重新选择  $I$  值; 第2次输入  $I = 0.2$ , 计算出  $H_e = 0.56, V_e = 8.4 < V$ , 符合要求。接着求水跃的跃后水深  $H_f = 2.66$ , 长度  $L_k = 1.33$ , 经判断后显示“要建消力池”。然后用双重嵌套循环方法算出消力池的收缩断面水深  $H_c = 0.51\text{m}$ , 末端水深  $H_4 = 2.94\text{m}$ , 池深  $D = 0.96\text{m}$ , 消力池长  $L_d = 15.58\text{m}$ 。

根据以上计算结果, 则可绘制该淤地坝的坝体横断面图、浸润线、放水洞及卧管断面图, 溢洪道纵断面及其进口、陡坡、消力池的横断面图等图件。

以上算例可以看出, 该软件用于淤地坝设计、操作简便、计算准确、适应性强, 能省人力和时间, 可满足坝高小于  $50\text{m}$  的淤地坝和小型水库设计要求。同时该软件适于不同建坝要求和地形条件的设计应用, 有较强的通用性。若在一条流域建若干个淤地坝、水库和拦泥坝, 可逐个对每个坝(库)进行设计, 则可用于坝系规划, 该软件为黄土高原及同类地区的淤地坝系设计提供一种有效的工具。

#### 参 考 文 献

- 1 陕西省水利学校编. 小型水利手册(上册). 西安: 陕西科技出版社, 1972
- 2 陕西省水土保持局. 坝地利用. 西安: 陕西人民出版社, 1977
- 3 晋陕水坠坝试验研究组. 水队坠坝. 北京: 水利出版社, 1980
- 4 华东水利学院编. 水力学(上册). 北京: 科学出版社, 1976
- 5 水电部第5工程局编. 土坝设计. 北京: 水利电力出版社, 1978

#### 作者简介

张汉雄, 高级工程师, 男, 1944年生, 陕西省杨陵区人。长期从事水土保持与系统工程综合研究, 在水土保持工程、坝系规划设计、区域水土保持规划、农业系统优化模型与动态调控、节水灌溉等领域研究专长, 特别是应用现代系统动力学(SD)理论研究与水土保持有关的复杂系统动态问题有创新。曾主持黄土高原农林牧业结构优化、资源开发与利用模型系统、森林植被建设优化模型、区域治理动态模式型等国家攻关课题, 获中科院、农业部一、二等奖3项; 林业部、陕西省三等奖2项, 两种新型沟头防护技术被录入国内外技术专刊。在国内外学术刊物发表论著74篇, 其中专著1部, 参编5部, 国内学报7篇, 国外3篇, 代表作有: 1. The silt-trap dams and its use in Xingzi River, The Transaction of ASAE (美国农业工程学报), 1988, No. 4. 2. 袁加祖, 张汉雄著, 黄土高原森林植被建设优化模型, 科学出版社, 1991. 6. 3. 晋陕丘陵区土地利用与土壤侵蚀动态机制仿真研究, 科学通报, 1997(3)。