

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2008.05.001

碾压混凝土坝渗漏安全监控模型建模方法研究

顾冲时 李 波 徐宝松 胡 江

(河海大学水利水电工程学院 江苏 南京 210098)

摘要 针对库水压力作用下碾压混凝土坝渗漏变化滞后问题,从理论上研究了库水位变化对坝体渗漏状态影响的滞后效应,建立了考虑库水压力作用滞后效应的等效水头的表达式,并根据碾压混凝土坝的结构特点,分别建立了碾压混凝土坝本体和层面渗漏量各个影响分量的表达式,据此提出了碾压混凝土坝渗漏安全监控模型。由于在建模过程中要分析库水压力作用的滞后效应,采用遗传算法进行了最优化求解,并给出了建模步骤及流程。

关键词 碾压混凝土坝 渗漏 滞后效应 安全监控模型

中图分类号:TV698.1 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2008)05-0579-06

碾压混凝土坝由于在施工过程中层层碾压,因而存在众多的施工层面。与普通混凝土坝相比,碾压混凝土坝的碾压层本体与常规混凝土坝的渗漏性态相似,而碾压层的施工层面则与常规混凝土坝的渗漏性态相差较大,因此,在建立碾压混凝土坝渗漏安全监控模型时要综合考虑碾压层本体和施工层面不同的渗漏特性^[1-2]。对于碾压混凝土坝坝体,库水位、温度以及时效的变化是影响大坝渗漏的重要因素^[3]。库水位及温度的变化引起坝体孔隙水压力及渗漏量的变化,随着时间的推移,大坝的渗漏状态也会发生改变,而库水位、温度变化作用的效应各异。通过监测坝体温度场的资料可直接反映温度变化对大坝渗漏状态的影响,但库水位变化对大坝渗漏状态的影响存在滞后效应。大坝的渗漏状况不但受到分析时刻对应水压作用的影响,而且还受到前期水压作用的影响。大坝渗漏分析表明,库水位变化对大坝渗漏状态影响的滞后效应作用机理比较复杂,归纳起来主要有以下几点原因^[4-5]:(a)渗流场内的水压力传递时间与渗漏场介质的物理特性有关;(b)大坝运行过程中,库水位是连续变化的,坝体渗流场是库水位变动时非稳定渗流瞬时状态的反映,非稳定渗流是造成渗漏滞后于库水位变化的主要影响因素。

由此可知,库水位变化对碾压混凝土坝渗漏状态影响的滞后效应机理十分复杂,一般难以用常规的数学模型方法求得大坝的渗漏滞后时间,通常采用大坝渗漏监测量的过程线与库水位变化过程进行类比的方法来粗略确定两者相位之差(即两者出现的峰谷时间差)作为滞后时间。本文针对这一问题,结合碾压混凝土的自身特点,在常规分析方法的基础上,提出库水位滞后影响函数,并根据碾压混凝土坝坝体的实际渗漏监测资料,建立能反映滞后效应的碾压混凝土坝渗漏安全监控模型。

1 库水位变化对大坝渗漏的滞后效应

碾压混凝土坝渗漏状态监测指标一般包括测压孔水位和大坝渗漏量等监测效应量,以下简称渗漏监测量。下面以测压孔水位为例,分析库水位变化对测压孔水位变化的滞后效应。

一般测压孔水位 h 与库水位 H 之间的关系为隐函数,且 h 滞后于 H 变化,则在 t 时刻, h 与 H 存在下列关系:

$$h(t) = G[H(t), H(t - \tau_1(t)), H(t - \tau_2(t)), \dots, H(t - \tau_i(t)), \dots, H(t - \tau_m(t))] \quad (1)$$

式中: τ ——滞后时间, $\tau_i(t) \geqslant 0 (i = 1, 2, \dots, m)$; $H(t)$, $H(t - \tau_i(t))$ ——对应 t 时刻和 $t - \tau_i(t)$ 时刻的库水位。

收稿日期:2008-05-18
基金项目:国家自然科学基金(50539010)、国家科技支撑计划(2006BAC14B03)、国家重点基础研究发展计划(973计划)(2002CB412707)、水利部“948”项目(CI200612)
作者简介:顾冲时(1962—),男,江苏启东人,教授,博士生导师,主要从事水工结构工程研究。

由式(1)可见, $h(t)$ 是 $H(t)$ 的时间滞后函数, 它综合反映了库水位 H 变化与测压孔水位滞后变化的相关关系, 即 $h(t)$ 是 t 时间以前库水位连续变化的大坝渗漏的瞬时状态.

1.1 库水位滞后影响程度分布密度函数的建立

一般库水位变化对碾压混凝土坝渗漏状态的影响是渐变的. 对于某一库水位状态, 在该时刻以前连续库水位已经对大坝渗漏产生作用, 在该时刻之后, 连续库水位还会作用一段时间, 即某一库水位对大坝渗漏的作用在第 k 天产生最大效应. 在第 k 天之前该库水位对大坝渗漏的作用效应逐渐增大, 至第 k 天左右作用效应达到最大, 其后其作用效应逐渐减小. 其变化过程如图1所示, 图中 $W(t)$ 为某一库水位对大坝渗漏状态的影响程度分布密度函数.

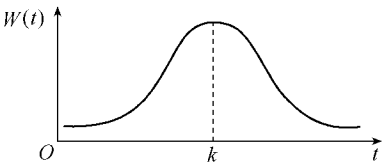


图1 库水位滞后过程线
Fig.1 Lag in reservoir water level change

设碾压混凝土坝内某渗漏测压孔的测值受监测日前 m 个库水位 $H_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 的影响, 其等效水位为 H_a . 其中 H_a 表示在上述一系列库水位变化作用下的综合效应, 即在 H_a 作用下能产生上述一系列库水位变化作用下同样的效果, 则 H_a 可表示为

$$H_a = \varphi(H_1, H_2, \dots, H_i, \dots, H_m, W_1, W_2, \dots, W_i, \dots, W_m) \tag{2}$$

式中 H_i, W_i 为第 i 个库水位及其对应的等效水位经过规一化后的影响程度.

设 $W = (W_1, W_2, \dots, W_i, \dots, W_m)$ 并有 $\sum_{i=1}^m W_i = 1, H = (H_1, H_2, \dots, H_i, \dots, H_m)$, 则等效水位 H_a 为

$$H_a = HW^T = \sum_{i=1}^m W_i H_i \tag{3}$$

由于库水位与渗漏监测量是随时间变化的连续函数, 因此, 等效水位也是时间 t 的连续函数. 设相应的影响程度分布密度函数为 $W(t)$, 则在影响大坝渗漏状态的前期水位时间域内 $W(t)$ 为时间的连续函数.

由渗漏和坝工理论以及监测资料分析结果可知, $W(t)$ 通常呈正态分布, 则前期水位影响程度分布密度函数 $W(t)$ 可表示为

$$W(t) = \frac{1}{A \sqrt{2\pi x_2}} e^{-\frac{(t-x_1)^2}{2x_2^2}} \tag{4}$$

式中: A ——调整参数; x_1 ——库水位滞后天数; x_2 ——水位影响天数.

对于某一测点而言, 在一定时段内, 可以认为 x_1 和 x_2 为一定值. 因此在某一监测日($t = t_0$), A 为常数. 根据 $W(t)$ 的定义, 则有

$$\int_{-\infty}^{t_0} W(t) dt = 1 \quad (W(t) \geq 0) \tag{5}$$

式中 $W(t)$ 为反映前期库水位对等效水位影响的分布密度函数.

1.2 考虑前期库水位作用的大坝渗漏的水压分量

设在 $t = t_0$ 时刻对应的等效水位为 H_a , 其对应的前期水位的影响程度分布密度函数为 $W(t)$, 由式(2)~(5)可得

$$H_a = \int_{-\infty}^{t_0} W(t) H(t) dt = \int_{-\infty}^{t_0} \frac{1}{A \sqrt{2\pi x_2}} e^{-\frac{(t-x_1)^2}{2x_2^2}} H(t) dt \tag{6}$$

由于式(6)中的 H_a 综合反映了测值当天及其前期库水位变化对大坝渗漏状态的影响, 因此式(6)可全面体现库水位变化的作用效应.

2 碾压混凝土坝坝体渗漏安全监控模型的因子选择

碾压混凝土坝的渗漏量主要来自于碾压层本体和施工层面两部分, 其中碾压层本体的渗漏量变化规律与常规混凝土坝类似, 而施工层面部分渗漏量变化规律较为特殊, 也是碾压混凝土坝渗漏量的主要部分. 设碾压混凝土坝碾压层的渗漏量为 Q_1 , 碾压层本体和施工层面的渗漏量分别为 Q_2, Q_3 , 则

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 \tag{7}$$

下面分析 Q_2 和 Q_3 的影响因子及其表达式.

2.1 碾压混凝土坝碾压层本体渗漏量影响因子及其表达式

2.1.1 水压分量 Q_{2H}

由文献 [6-8] 及碾压混凝土坝渗漏量监测资料分析结果可知, 碾压混凝土坝碾压层本体的渗漏量变化规律与常规混凝土坝相似. 因此, 研究碾压混凝土坝碾压层本体的渗漏量变化规律时, 其影响因子的选择类似于常规混凝土坝. 渗漏量与水深的 1~3 次方有关, 即水压分量 Q_{2H} 的表达式为

$$Q_{2H} = \sum_{i=1}^{m_1} a'_i H_s^{m_i} \tag{8}$$

式中: a'_i ——回归系数; m_1 ——水深的最高次方数, 一般取为 3; H_s ——坝前水深.

由于库水位变化对大坝渗漏的作用有滞后效应, 因此 H_s 应该是综合考虑滞后效应的等效水深. 从本文库水位变化对渗漏作用的滞后效应分析可知, H_s 应为式 (6) 中的 H_a , 其值可通过式 (6) 获得.

2.1.2 温度分量 Q_{2T}

坝体温度变化对测压管水位变化有一定的影响. 在温度荷载作用下, 坝体受力状态以及混凝土孔隙率等改变, 引起测压管水位的变化. 从宏观上看, 碾压混凝土坝受温度变化的影响与常规混凝土坝相似. 参照文献 [1], 其温度分量 Q_{2T} 可表示如下.

a. 若坝体有温度监测资料, 则选用各温度计监测值作为温度影响因子, 其温度分量 Q_{2T} 为

$$Q_{2T} = \sum_{i=1}^{m_2} b_i T_i \tag{9}$$

式中: b_i ——第 i 支温度计对应的回归系数; T_i ——第 i 支温度计测值; m_2 ——温度计支数.

若坝体温度计较多, 则可采用等效温度作为温度影响因子, 其温度分量 Q_{2T} 可表示为

$$Q_{2T} = \sum_{i=1}^{n_2} b_{1i} \bar{T}_i + \sum_{i=1}^{n_2} b_{2i} \beta_i \tag{10}$$

式中: b_{1i} , b_{2i} ——第 i 层温度计测得的等效平均温度和温度梯度的温度载常数; $\bar{T}_i$, β_i ——第 i 层温度计测得的等效平均温度和温度梯度; n_2 ——温度计层数.

b. 当无坝体温度计监测资料时, 可选用气温监测资料作为温度因子, 其温度分量 Q_{2T} 为

$$Q_{2T} = \sum_{i=1}^{n_3} b_i \bar{T}_{ai} \tag{11}$$

式中: b_i ——回归系数; $\bar{T}_{ai}$ ——测日前前期气温平均值; n_3 ——测日前前期气温平均值选取的时段个数.

对于运行时间较长的大坝, 其坝体温度场基本呈准稳定温度场变化, 则温度因子可选用简谐波形式, 其温度分量 Q_{2T} 为

$$Q_{2T} = \sum_{i=1}^{n_4} \left(b_{3i} \sin \frac{2\pi it}{365} + b_{4i} \cos \frac{2\pi it}{365} \right) \tag{12}$$

式中: t ——始测值至监测值的累计天数; n_4 ——周期数; b_{3i} , b_{4i} ——回归系数.

2.1.3 时效分量 $Q_{2\theta}$

时效分量是综合反映大坝渗漏量随时间变化的过程. 时效形成的过程较为复杂, 一般大坝蓄水初期增长较快, 其后逐渐趋于稳定. 参照文献 [1-2], 时效分量 $Q_{2\theta}$ 为

$$Q_{2\theta} = c_1 \theta + c_2 \ln \theta \tag{13}$$

式中: c_i ——回归系数; θ ——始测日主监测值累计天数除以 100.

2.2 碾压混凝土坝施工层面渗漏量影响因子及其表达式

2.2.1 水压分量 Q_{3H}

由于碾压混凝土坝施工层面的渗漏特性具有层面渗漏的特点, 在分析其渗漏量变化规律时可利用岩体裂缝渗漏的立方定律^[9]来模拟层面渗漏的变化, 即施工层面由于库水位变化引起的渗漏量表达式为

$$Q_{3H} = Db^3 J \tag{14}$$

式中: D ——影响系数, 与碾压混凝土坝施工层面的运动黏滞系数等有关; b ——碾压混凝土坝施工层面的厚

度; J ——碾压混凝土坝施工层面中水流的水力坡降.

对于大坝渗漏来说,一般通过廊道中的集水沟汇集渗漏水,因此可以认为施工层面的渗漏路径为一确定值,则式(14)中水流的水力坡降 J 主要与上游水深 H_s 有关,因此,式(14)可变为

$$Q_{3H} = Gb^3 H_s \quad (15)$$

式中 G 为影响系数,与碾压混凝土坝施工层面的运动黏滞系数及渗漏路径大小有关.在确定 H_s 时,应综合考虑监测当天以前前期库水位变化的影响,即 H_s 用式(6)确定的等效水深 H_a 来代替.

2.2.2 温度分量 Q_{3T} 和时效分量 $Q_{3\theta}$

碾压混凝土坝坝体温度的改变一方面会引起施工层面厚度的改变,而另一方面会引起渗水黏滞性能的改变.随着时间的推移,施工层面的孔隙等也会改变,从而引起施工层面渗漏变化规律的改变.在建立施工层面渗漏安全监控模型时,将坝体温度改变引起的坝体结构变形性态的改变,从而引起坝体施工层面渗漏量的改变部分称为温度分量,用 Q_{3T} 表示,其表达式同式(9)~(12).此外,由于温度改变引起渗水的黏滞性能的改变和因施工层面孔隙等的改变引起的渗漏量改变部分称为时效分量,用 $Q_{3\theta}$ 表示,其表达式同式(13).

2.3 碾压混凝土坝渗漏安全监控模型的表达式

由本文分析可知,碾压混凝土坝碾压层本体和施工层面渗漏量主要受库水位、温度及时效变化影响,因此碾压混凝土坝坝体渗漏安全监控模型可表示为

$$Q = Q_H + Q_T + Q_\theta \quad (16)$$

式中: Q ——碾压混凝土坝坝体渗漏量; Q_H ——坝体渗漏量中的水压分量; Q_T ——坝体渗漏量中的温度分量; Q_θ ——坝体渗漏量中的时效分量.

由此可得到碾压混凝土坝坝体渗漏安全监控模型为

$$Q = a_0 + \sum_{i=1}^{m_1} a_i H_a^i + db^3 H_a + \begin{cases} \sum b_i T_i \\ \sum (b_{1i} \bar{T}_i + b_{2i} \beta_i) \\ \sum b_i \bar{T}_{ai} + c_1 \theta + c_2 \ln \theta \\ \sum \left(b_{1i} \sin \frac{2\pi i t}{365} + b_{2i} \cos \frac{2\pi i t}{365} \right) \end{cases} \quad (17)$$

式中: a_0 ——常数项; a_i 、 d 、 b_i 、 b_{1i} 、 b_{2i} 、 c_1 、 c_2 ——对应各因子的回归系数; b ——碾压混凝土坝施工层面的厚度. $db^3 H_a$ 项综合反映了碾压混凝土坝施工层面库水位变化对大坝渗漏量的影响.

3 碾压混凝土坝坝体渗漏安全监控模型的建立方法

对于碾压混凝土坝坝体渗漏安全监控模型,在建模过程中要重点分析和确定滞后参数,在此基础上确定比较符合客观情况的滞后天数和影响天数.而分析渗漏量的滞后效应需要进行非线性优化,本文采用遗传算法进行最优化求解^[10].

3.1 建模分析思路

利用遗传算法进行建模分析,主要包括参数编码、适应度函数、遗传算子和运行参数等环节.即首先对滞后影响参数进行遗传编码,并随机产生一组滞后影响参数向量作为算法的种群;然后,通过回归分析求解复相关系数,并对种群的个体适应性进行评价,最终通过选择、交叉、变异等一系列遗传分析产生子代种群,并以是否满足收敛精度为准则判断其收敛性.

a. 参数编码.库水位变化滞后影响参数有滞后天数和影响天数,因此进行遗传编码的参数有2个,即 x_1 、 x_2 .因滞后天数以天计,故可直接采用二进制编码方法进行参数编码.在进行实际问题分析时,设待编码参数 $S \in [0, S_{\max}]$,编码长度为 N ,则由个体基因类型 L 到个体表现型 S 的解码公式为

$$S = \frac{S_{\max}}{2^N - 1} L \quad (18)$$

b. 适应度函数.为了引导搜索向最优化方向进行,对各个被遗传到下一代群体中的概率确定合适的适应度函数.在建立渗漏安全监控模型时,每次回归分析得到的复相关系数 R 是衡量最终精度的标准,因而在遗传计算时,将复相关系数 R 作为适应度函数的取值.此外,为了保证群体多样性和提高个体的竞争能

力,采用如下适应度线性尺度变换:

$$g = aR + b \tag{19}$$

式中: g ——适应度函数; a, b ——变换系数.

c. 选取算子.采用回放式随机采样的方法选取算子.设群体大小为 E ,第 i 个个体的适应度为 Z_i ,则第 i 个个体选中的概率 p_i 为

$$p_i = Z_i / \sum_{j=1}^E Z_j \tag{20}$$

为保证高适应度个体被淘汰,在进行算子选取时,对当前群体中适应度最高的个体不参与交叉和变异运算,而是用它替换本代群体经过交叉、变异等遗传操作后所产生的适应能力最差的个体.

d. 交叉算子.本文采用均匀交叉算子,即对 2 个配对个体每一个基因座上的基因都以同样的交叉概率进行交换,由此形成 2 个新的个体.在分析时,首先随机产生一个与个体编码长度等长的屏蔽字 U_L .设 2 个父代个体为 x, y ,按交叉概率 p_L 对每个基因座交叉产生的 2 子代个体为 U, V ,并满足

$$U_i = \begin{cases} x_i & (U_L = 0) \\ y_i & (U_L = 1) \end{cases} \quad V_i = \begin{cases} a_i & (U_L = 1) \\ b_i & (U_L = 0) \end{cases} \tag{21}$$

由于交叉概率的大小控制交叉操作的频率,故选择合适的 p_L 非常重要.若 p_L 太小则搜索会停止不前,若 p_L 太大则高适应度个体易被破坏,一般建议的取值范围是 0.4~0.99.

e. 变异算子.为保证群体的多样性,防止出现早熟现象,在计算时采用非一致变异算子.设 $V_t = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots)$ 是第 t 代种群中的 1 个个体, x_i 代表第 i 个参数的基因编码.若以变异概率 p_b 选择进行 x_i 变异,则变异结果为 $V_t = (x_1, x_2, \dots, x'_i, \dots)$ 其中

$$x'_i = F(x_i, \Delta(t, n)) \tag{22}$$

式中: $F(x_i, \Delta(t, n))$ ——对 x_i 的 $\Delta(t, n)$ 位进行变异; n —— x_i 子串的编码长度.在计算中 $\Delta(t, n)$ 采用下列形式:

$$\Delta(t, n) = n \left(1 - r^{(1-\frac{t}{T})^f} \right) \tag{23}$$

式中: r ——[0, 1] 之间均匀分布的随机数; T ——最大进化代数; f ——子系统参数.

由式 (23) 可以看出,随着 t 的增大, $\Delta(t, n)$ 趋近于 0 的概率增大,变异计算对 x_i 的影响减小.变异概率 p_b 取值的大小是控制种群多样性的一个最重要因素.若 p_b 取值太大,则能够产生出较多的新个体,但也有可能破坏较好的原有模式;若 p_b 取值太小,则变异计算产生新个体和防止早熟情况的能力较差. p_b 通常取值在 0.0001~0.1000 之间效果较好.

f. 运行参数.在遗传算法分析过程中,运行参数包括种群大小 E 、进化代数 T 、交叉概率 p_L 、变异概率 p_b 和收敛精度 ϵ 等,上述参数一般根据经验确定.本文计算中 E 取 100, T 取 120, p_L 取 0.65, p_b 取 0.05, ϵ 为 10^{-3} .

3.2 建模步骤及流程

根据上述遗传算法的分析思路,研制了相应的碾压混凝土坝坝体渗漏安全监控模型的分析程序,主要计算步骤为:

- 对库水位变化、渗漏滞后天数和影响天数进行了二进制编码,并确定对应的解码方法.
 - 在各参数允许取值范围内,随机产生种群规模为 E 的初始染色体,形成初始染色体,形成初始种群.
 - 通过回归分析,计算前一代种群中各个体对应的复相关系数 R ,对目标函数进行分析计算.
 - 利用 R 计算各个个体的适应度 Z ,据此确定最大适应度 $E_{\max}$ 对应的最优个体,以及种群平均适应度 $\bar{E}$.
 - 以种群中最大适应度 $E_{\max}$ 与平均适应度 $\bar{E}$ 之差小于收敛精度 ϵ 为收敛判据,并以 T 为辅助判据,若满足条件,则计算结束,转向 h,否则继续 f 进行下一部运算.
 - 按比例选择算子产生子代个体,并将父代最优个体直接增加到子代个体当中.
 - 利用交叉概率 p_L 和变异概率 p_b ,经过交叉和变异计算产生新一代种群个体,并进行代数 $t = t + 1$,返回 c 进行循环计算.
 - 输出迭代次数、收敛精度及滞后天数、影响天数、回归参数等最终信息,分析结束.
- 根据上述建模分析思路,建立了相应的碾压混凝土坝坝体渗漏安全监控模型,其分析流程见图 2.

4 结 语

本文从理论上研究了库水压力作用对碾压混凝土坝渗漏作用的滞后效应,提出了相应的滞后效应等效水头,并针对碾压混凝土坝的结构特点,建立了碾压混凝土坝坝体渗漏安全监控模型。

a. 深入研究了库水压力作用对碾压混凝土坝渗漏的滞后变化规律,建立了综合考虑库水压力作用滞后的等效水头表达式。

b. 针对碾压混凝土坝碾压层本体和施工层面渗漏的不同特点,分别研究了本体和施工层面的渗漏特性,提出了碾压层本体和施工层面渗漏量各主要影响因素的表达式。

c. 在系统考虑库水压力作用滞后效应、碾压混凝土坝碾压层本体和施工层面渗漏特性的基础上,提出了碾压混凝土坝坝体渗漏安全监控模型,并利用遗传算法进行建模分析。

d. 提出的分析模型可推广应用于常规混凝土坝和土坝等渗漏分析。

参考文献：

[1] 杨全华,任旭华.碾压混凝土的层面结合与渗流[M].北京:中国水利水电出版社,1999.

[2] 黄文雄,朱岳明.碾压混凝土结构的非线性应力分析[J].河海大学学报,1997,25(2):90-94.

[3] CAI Y M,WU Z,ZHU Y.Nonlinear analysis for the coupled problem of temperature,seepage and stress fields in cold-region tunnels[J].Tunnelling and Underground Space Tech,1998,13(4):435-440.

[4] 吴中如,顾冲时,吴相豪.碾压混凝土坝安全监控模型理论及其应用[M].北京:科学出版社,2001.

[5] 张乾飞.复杂渗流场演变规律及转异特性研究[D].南京:河海大学,2002.

[6] 朱岳明,匡峰,王铎.江垭碾压混凝土重力坝渗流特性分析[J].河海大学学报:自然科学版,2004,32(3):266-271.

[7] 顾冲时,苏怀智,周红.碾压混凝土坝渗流场与应力场耦合模型研究[J].应用数学与力学,2005,26(3):325-332.

[8] 柴军瑞,仟彦卿.碾压混凝土坝层(缝)面渗流及其对坝体应力的影响[J].水电能源科学,2001,19(1):55-58.

[9] 王媛,速宝玉,徐志英.三维裂隙岩体渗流耦合模型及有限元模拟[J].水文地质工程地质,1995(3):1-5.

[10] 周明,孙树栋.遗传算法原理及应用[M].北京:国防工业出版社,1999.

Safety monitoring model of roller-compacted concrete dam seepage

GU Chong-shi , LI Bo , XU Bao-song , HU Jiang

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : In view of the lag of seepage flow change for a roller-compacted concrete dam under water pressure , the lag effect of reservoir water level change on dam seepage was studied , and an expression of equivalent water head that took the lag effect of water pressure into account was established. According to the structural characteristics of the roller-compacted concrete dam , the expressions of each component of seepage through dam body and interface were established respectively , on the basis of which the safety monitoring model of roller-compacted concrete dam seepage was proposed. The lag effect of water pressure needed to be analyzed during the process of establishing the model , so the genetic algorithm was applied to obtain the optimal solution , and the modeling steps and process were presented.

Key words : roller-compacted concrete dam ; seepage ; lag effect ; safety monitoring model

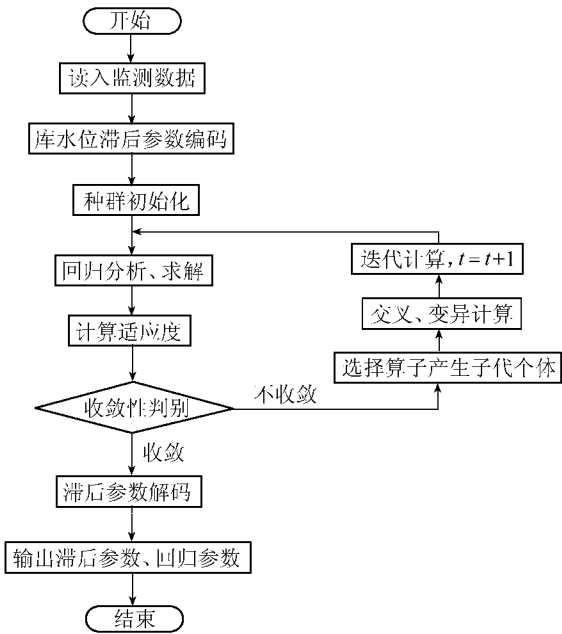


图2 碾压混凝土坝坝体渗漏安全监控模型建模流程
Fig.2 Flowchart of the safety monitoring model of roller-compacted concrete dam seepage