

重力坝坝基渗透参数进化反演分析

Back analysis of the permeability coefficients of gravity dam foundation by evolution method

王媛¹, 刘杰²

(1. 河海大学 土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 广州市建设委员会, 广东 广州 510032)

摘要: 利用水头实测资料, 以坝基材料的相对渗透系数为待反演的参数向量, 采用笔者提出的一种新型混合遗传算法来求解相应的参数问题, 成功确定了重力坝坝基岩体的相对渗透系数, 表明混合遗传算法能够在工程实践中应用, 有一定的推广价值。在此基础上, 对坝基水头分布及典型坝段的扬压力进行预测, 预测结果进一步验证了反演结果的合理性和可靠性。

关键词: 裂隙岩体; 渗透参数; 反演; 混合遗传算法

中图分类号: TV 641

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)05-0552-05

作者简介: 王媛(1969-), 女, 江苏阜宁人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程渗流与控制、裂隙岩体应力-渗流耦合及岩土工程数值分析等方面的科研工作。

WANG Yuan¹, LIU Jie²

(1. Geotechnical Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Construction Committee of Guangzhou City, Guangzhou 510032, China)

Abstract: On the basis of the observed field data of water head, a new type of hybrid genetic method was proposed for the inverse problem in which the relative coefficients of permeability are regarded as the unknown parameters. The relative coefficients of permeability of rock foundation under a gravity dam are successfully obtained, as well as the flexibility of applying hybrid genetic method in the practice is proved. The distribution of the water head and uplift pressure in a typical dam section are further predicted in order to verify the rationality and reliability of the proposed method.

Key words: fractured rock masses; the coefficient of permeability; back analysis; hybrid genetic algorithm.

0 前言*

裂隙岩体的渗流特性主要受裂隙在计算域的分布情况及各裂隙结构面的渗透性所控制, 因此, 合理确定结构面渗透系数是裂隙岩体渗流数值分析的一项关键任务。20世纪60年代国外学者提出的反演方法为确定流场介质的渗流参数提供了有力的工具。反演方法利用综合反映介质渗流特性的现场实测资料, 通过建立并求解渗流反问题的数学模型最终得到裂隙岩体的渗流参数。该类方法因其良好的代表性、广泛的适应性、较高的可靠性以及快速、经济等特点已成为确定裂隙岩体渗流参数的一种非常有效的重要手段。但在目前以传统优化算法为核心的反演方法中^[1~3], 反演结果严重依赖于参数的初值, 寻优过程极易陷入局部最优点, 优化过程数值稳定性差, 特别是当待求参数数目增加时, 计算效率成级数倍降低, 甚至会导致搜索不收敛。因此, 对参数较多、参数可能变化范围很大的非均质各向异性的裂隙岩体而言, 传统优化反演方法往往难以奏效。近年来新兴的遗传算法因其特有的魅力在位移反分析领域已得到广泛应用^[4,5], 以遗传算法为核心的智能化反分析方法越来越受到工程界的重视^[5], 遗传算法的发展也为解决裂隙岩体渗流反分析

提供了新的途径。

本文针对裂隙岩体渗流参数反问题目标参数众多, 参数可能变化范围较大的特点, 采用一种改进的新型混合遗传算法求解此类问题^[6], 并将该法应用于确定重力坝坝基岩体的相对渗透系数。在此基础上对坝基水头分布进行预测, 以验证反演结果的合理性和可靠性。

1 裂隙岩体渗流参数反问题模型

1.1 目标函数的建立

本文基于最小二乘准则, 依据实测水头资料构造常规最小二乘目标泛函

$$E(X) = \sum_{i=1}^N \omega_i^2 \left| \frac{H_i - H_i^{\text{obs}}}{H_i^{\text{obs}}} \right|^2 \quad (1)$$

式中 X 为待反演参数向量; H_i 为第 i 个水头测点的水头计算值; H_i^{obs} 为第 i 个水头测点的水头实测值; N 为水头测点数; ω_i 为相应的权函数。

计算经验表明, 选择对待反演参数敏感程度高的实测点资料反演, 能在很大程度上提高反演的计算效

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59909002)

收稿日期: 2002-11-16

率,增加反演过程的稳定性和反演结果的可靠性。因此本文通过实测点水头值对目标未知参数的敏感性分析构造目标泛函的权函数 ω_i :

$$\omega_i = \frac{\max_j \left| \frac{\partial H_i}{\partial x_j} \right|}{\sum_{i=1}^N \max_j \left| \frac{\partial H_i}{\partial x_j} \right|} \quad (j = 1, 2, \dots, M), \quad (2)$$

式中 $\partial H_i / \partial x_j$ 为测点水头 H_i 对参数 x_j 的敏感系数。采用该形式的权函数可最大限度地利用敏感性好的有利量测信息,改善反问题的适定性,同时也利用了敏感性较差的实测点水头值,增加了实测信息的数量,防止因量测资料过少而使反演结果严重失真。

1.2 目标未知参数的确定

本文采用统一域混合模型进行裂隙岩体渗流的有限元分析,通过实测水头资料反演确定等效连续介质区域裂隙组的渗透系数及离散裂隙单元内部沿裂隙面的渗透系数。当等效连续介质岩体中有 L 组裂隙同时存在时,由 Snow 理论及张量运算的有关性质,该区域岩体的渗透张量可按式计算:

$$k_{ij}^c = \sum_{l=1}^L k_{jl} (\delta_{ij} - n_{li} n_{lj}) \quad (i, j = 1, 2, 3). \quad (3)$$

式中 k_{jl} 为第 l 组裂隙的渗透系数; δ_{ij} 为狄拉克函数; n_{li} 为第 l 组裂隙面的法向单位矢量。

设等效连续介质区域可根据岩体水文地质特性和裂隙分布特征分为 N_{MC} 个分区,将第 i 分区的任一组裂隙 l 的渗透系数表示为 k_{jl}^i , k_{jl}^i 满足下列约束条件:

$$k_{jl}^{id} < k_{jl}^i < k_{jl}^{iu} \quad (i = 1, 2, \dots, N_{MC}; l = 1, 2, \dots, L), \quad (4)$$

式中 k_{jl}^{iu} , k_{jl}^{id} 分别为渗透系数的上、下界,可根据地区经验以及压水试验成果等资料确定。

设计算区域共有 N_{MD} 条大的离散裂隙,将第 i 条离散裂隙沿裂隙面的渗透系数表示为 k_x^i , k_y^i , 分别满足下列约束条件:

$$\left. \begin{aligned} k_x^{id} < k_x^i < k_x^{iu} \quad (i = 1, 2, \dots, N_{MD}) \\ k_y^{id} < k_y^i < k_y^{iu} \quad (i = 1, 2, \dots, N_{MD}) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

因此,等效连续介质区域需反演确定的目标未知参数为 k_{jl}^i , 对于离散裂隙介质而言, k_x^i , k_y^i 即为需反演确定的目标未知参数。

考虑到稳定渗流分析时渗流区域的水头分布取决于介质分区渗透系数的相对值,与绝对值无关,所以在只有水头量测信息的情况下,本文取各待定量相对于某一分量的比值为优化目标未知参数,式(1)的优化目标未知参数向量可具体写为如下形式:

$$\mathbf{X} = (x_1, \dots, x_j, \dots, x_M)^T \quad (M = LN_{MC} + 2N_{MD} - 1), \quad (6)$$

式中

$$x_j = \begin{cases} k_{jl}^{i-1} / k_{f1}^1 & (1 \leq j \leq LN_{MC} - 1), \\ k_x^i / k_{f1}^1 & (LN_{MC} - 1 < j \leq M, 1 \leq i \leq N_{MD}), \\ k_y^i / k_{f1}^1 & (LN_{MC} - 1 < j \leq M, 1 \leq i \leq N_{MD}), \end{cases} \quad (7)$$

$$i = \begin{cases} (m+1)/2, m \text{ 为奇数}, \\ m/2, m \text{ 为偶数}, \end{cases}$$

$$m = j - (LN_{MC} - 1).$$

为叙述方便,此处指定 k_{f1}^1 为参考值,实际工程中也可以指定其他便于通过试验等手段确定其绝对值的渗透系数作为参考值。经过这样处理后,待反演参数数目可减少一个,这可以有效降低反演计算的工作量,也可以在一定程度上改善参数反问题的适定性。

2 应用混合遗传算法反演确定坝基裂隙岩体相对渗透系数

2.1 混合遗传算法简介

针对基本遗传算法在应用中存在的一些缺陷,笔者提出了混合遗传算法^[6]。其基本思路是在进化操作中将交叉、变异概率与个体的适应度结合,提出了一种个体自适应概率并对算法加以改进,将改进后的算法与传统的单纯形搜索算法相结合,提出了一种混合遗传算法,并在算法中增加了加速循环操作,提高了遗传算法在求解优化问题特别是工程应用中的有效性。本文在求解上述参数反问题时即采用混合遗传算法。

2.2 工程概况及地质条件

福建省某水库枢纽工程由宽缝重力坝、坝顶溢洪道、左右输水道及坝后水电站组成。水库正常高水位 54 m (罗零基面),最大坝高 38.0 m,坝顶长 210.9 m,共分 16 个坝段,从左到右依次编号为 2[#] ~ 17[#] 坝段。在坝基设有帷幕,并在挡水坝段的坝脚设有间距 4 m,孔深 6 m 的排水孔。坝基处于真武殿逆断层下盘的正长岩上,坝址附近裂隙较发育,主要有两组近顺河方向的高倾角小断层和两组近平行坝轴线的高倾角裂隙。左岸各坝段存在三层自上游倾向下游约 25° ~ 40° 的缓倾角夹泥层。

2.3 计算地质模型及边界条件

大坝稳定复核计算表明,7[#], 8[#] 和 9[#] 坝段抗滑稳定安全系数偏低,因此水库长期在限制高水位 53 m 运行,为了确保大坝安全并提高运行水位到 54 m,管理部门最新安装了大坝安全监测自动化系统,并在 7[#], 9[#] 坝段两个重点坝段设置了坝基扬压力监测点。综合考虑工程的实际需要和反演计算的特点,本文选取 7[#], 8[#], 9[#] 坝段进行渗透系数的反演和渗流预测分析。

根据坝址处的工程地质条件,建立了本文计算采用的概化地质模型:坝基包含两组正交裂隙和两个风化夹层大裂隙;其中一组裂隙平行于坝轴线,一组顺河方向;第一风化夹层主要分布在 7[#], 8[#] 坝段坝基下,分布高程约 28 m, 厚约 3~7 cm; 第二风化夹层呈上小下大, 布满 7[#], 8[#], 9[#] 三个坝段整个坝基。分布高程从 30 m 延伸到 23 m, 厚约 6~10 cm。

以上述概化的地质模型为基础,采用统一域混合模型进行渗流有限元分析及参数反演。取 X 轴垂直坝轴线指向下游, Y 轴与坝轴线重合, Z 轴垂直向上; 计算范围上游边界自坝轴线向上游截取 50 m, 约 1.5 倍坝高; 自坝轴线向下游截取 75 m, 约 2 倍坝高作为下游边界; 自坝基面垂直向下截取约 2 倍坝高, 作为基底边界, 基底平面高程 $Z = -30$ m; 计算区域的有限元网格剖分见图 1, 采用 8 节点空间等参单元, 共剖分 5880 个单元, 节点总数为 6615; 图 2 显示了计算区域内大裂隙的分布形状。三个坝段均宽 11.5 m, 以 7[#] 坝段的左侧边界作为 XZ 坐标平面, 沿 Y 轴负向依次为 7[#], 8[#], 9[#] 三个坝段。坝基渗流有限元计算模型示意图如图 3 所示。有限元计算时, 上下游水平面边界作为已知水头边界, 各宽缝节点作为零压力边界节点, 其他边界均为不透水边界。由于缺乏下游水位监测资料, 而实际的下游水位很低, 以下的分析中下游边界作为零压力边界。依据概化的地质模型, 计算区域内渗透介质可分为 4 类, 即坝基帷幕、多裂隙岩体、夹层 1 和夹层 2。坝基帷幕视为均质各向同性的渗透介质, 渗透系数记为 k_g ; 多裂隙岩体包含两组正交裂隙, 各组裂隙均符合 Snow 假定, 记平行于坝轴线方向的裂隙组渗透系数为 k_{f1} , 顺河方向的裂隙组渗透系数记为 k_{f2} ; 依据本章采用的统一域混合渗流模型, 忽略夹层法线方向的渗流, 认为夹层内只发生二维流动, 并视夹层 1 和夹层 2 具有均质各向同性的渗流特性, 即 $k_x' = k_y' = k_d'$, 分别记夹层 1 和夹层 2 的渗透系数为 k_{d1} , k_{d2} 。

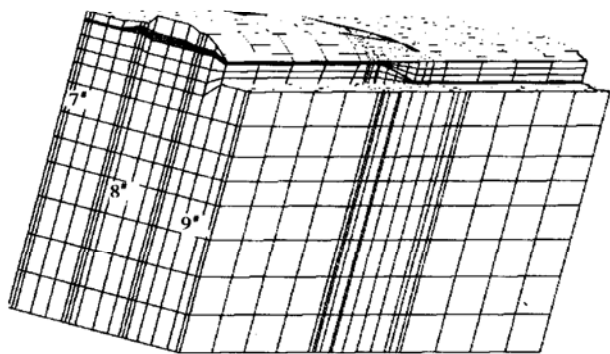


图 1 重力坝坝基有限元剖分网格侧视图

Fig. 1 Side view of the FEM mesh of the dam foundation

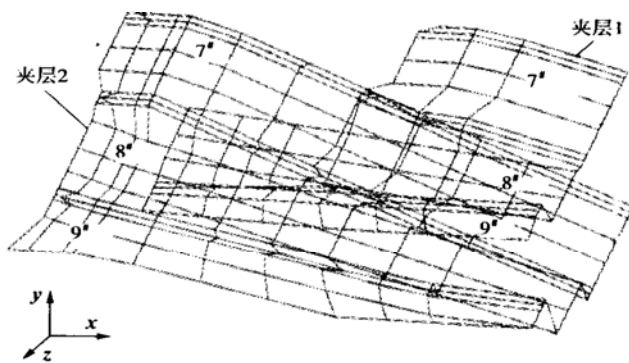


图 2 坝基大裂隙示意图

Fig. 2 Large fractures in dam foundation

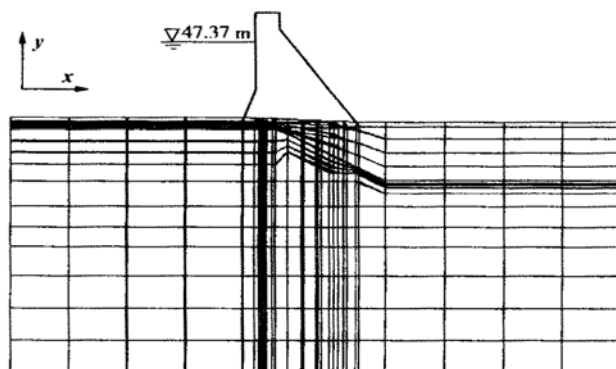


图 3 7[#] 坝段渗流有限元计算模型平面示意图

Fig. 3 Plan figure of the No. 7 dam section for FEM simulation

2.4 参数反演结果分析

新装的大坝安全监测系统具有完备的监测系统可监测上游水位和相应的坝基扬压力值, 7[#], 9[#] 坝段的坝基扬压力监测点布置如图 4 所示, 其中 7[#] 坝段设 3 个测点, 9[#] 坝段设 4 个测点, 分别设在有限元计算区域内 $y = -4.5$ m 和 $y = -26.0$ m 的平面上, 表 1 给出了各测点的坐标值。本文仅利用实测的水头资料, 只能反演确定坝基各介质渗透系数的相对比值, 在缺乏渗透系数实测值的情况下, 此处以大坝帷幕的渗透系数为基准, 本节待反演参数即为其他各渗透系数与 k_g 的比值, 不妨设 $k_g = 1.0$, 由式 (6)~(7) 知, 目标未知参数可表示为 $X = (k_{f1}/k_g, k_{f2}/k_g, k_{d1}/k_g, k_{d2}/k_g)^T$ 。表 1 给出了反演依据的监测点实测水头资料, 为方便反演计算, 网格剖分时将测点设置为有限元节点, 对应的整体节点编号见表 1。表 2 显示了预测分析时各上游水位对应的实测水头资料。需要指出的是, 由表 1 容易看出, 测孔 7[#]-2 实测水头明显偏高, 仅低于上游水位几米, 属异常测点, 工程人员也建议资料分析时可剔除该点, 因此本文在实际反演过程中仅采用了表 1 中剔除该点(表中“*”标记的点)以后的实测点水头资料。依据表 1 的实测资料, 首先采用新型混合遗传算法(HGA)进行参数反演, 综合考虑计算量的限制以

及算法搜索性能的要求,取种群个体总数 $N_{ps} = 50$, 依据计算经验,取交叉概率 p_c 为 0.9, 取变异概率 p_m 为 0.1。加速循环的最优个体数目 N_A 取为 N_{ps} 的 20%, 需单纯形局部搜索的个体数目 N_s 取为 N_{ps} 的 10%, 其他算法运行参数同前。采用 HGA 方法优化时,需给出待反演参数的可变范围,依据该地区的工程经验,表 3 给出了各渗透系数相对值的可变范围。

依据上述输入参数,运行笔者编制的反演程序,进化迭代 5 次即收敛,即可得到枯水期实测水头资料对应的参数反演成果及一些程序运行效率指标,如表 4 所示。为了进一步显示反演的效果,表 5 给出了 HGA 方法反演收敛时,各监测点水头计算值与实测值之间的误差。

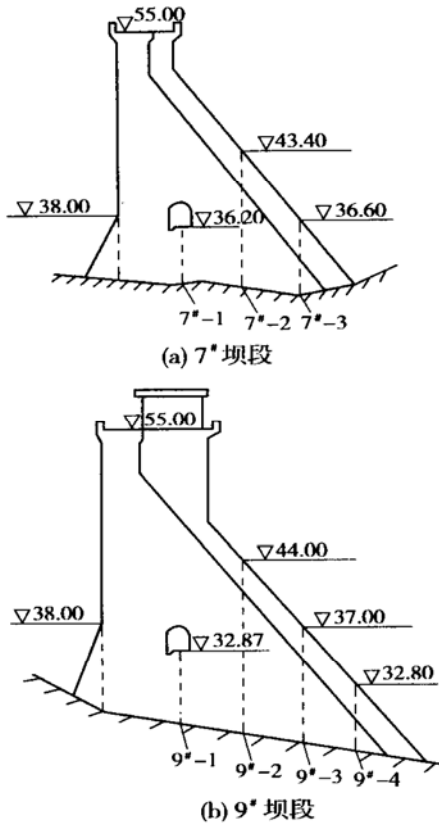


图 4 坝基扬压力测点布置示意图

Fig. 4 Location of the uplift pressure measurement point at dam foundation

表 1 反演依据的实测点水头资料

测孔编号	节点号	节点坐标 (X, Y, Z)	水位 47.37 m 对应水头值/m
7 [#] -1	4909	(6.50 m, -4.50 m, 29.65 m)	36.64
7 [#] -2	4573	(9.62 m, -4.50 m, 29.47 m)	40.23
7 [#] -3	4273	(12.73 m, -4.50 m, 29.28 m)	35.62
9 [#] -1	4291	(6.50 m, -26.00 m, 29.65 m)	35.03
9 [#] -2	4006	(9.62 m, -26.00 m, 29.47 m)	34.29
9 [#] -3	3744	(12.73 m, -26.00 m, 29.28 m)	35.01
9 [#] -4	3465	(15.85 m, -26.00 m, 29.10 m)	31.91

表 2 预测依据的水库不运行时期实测点水头资料

Table 2 Values of water heads at measuring points for different water levels in reservoir

测孔编号	节点号	水位 47.75 m 对应水头值/m	水位 52.37 m 对应水头值/m
7 [#] -1	4909	36.03	36.56
7 [#] -2	4573	39.61	40.62
7 [#] -3	4273	34.44	37.38
9 [#] -1	4291	34.73	34.95
9 [#] -2	4006	36.48	34.35
9 [#] -3	3744	34.47	34.03
9 [#] -4	3465	31.74	33.49

表 3 待反演参数取值范围

Table 3 Bounds of the objective parameters

反演参数向量 X	反演参数下限	反演参数上限
k_{f1}/k_g	1.0	10^2
k_{f2}/k_g	1.0	10^2
k_{d1}/k_g	1.0	10^3
k_{d2}/k_g	1.0	10^3

表 4 HGA 方法反演结果

Table 4 The results of back analysis by HGA method

X	k_{f1}/k_g	k_{f2}/k_g	k_{d1}/k_g	k_{d2}/k_g
反演值	1.7919	3.0526	64.3428	521.4277

上游水位 47.37 m; 目标函数值 0.004302; 运行时间约 28 h。

表 5 HGA 方法反演误差分析

Table 5 Errors at the monitoring points in back analysis

测点编号	实测水头 H_0	计算水头 H_c	相对误差
7 [#] -1	36.64	35.9433	1.90%
7 [#] -3	35.62	34.0995	4.27%
9 [#] -1	35.03	34.9223	0.31%
9 [#] -2	34.29	34.0533	0.69%
9 [#] -3	35.01	33.1673	5.26%
9 [#] -4	31.91	32.0871	0.55%

上游水位 47.37 m; 目标函数值 0.004302; 误差公式为 $\left| \frac{H_c - H_0}{H_0} \right|$ 。

由表 4 5 可以看出,在 5 次迭代以后目标函数值已经很小,与最优解对应的测点处水头有限元计算值以及实测值也相当吻合,表明本文方法是可靠的,可以在只给出参数较大变化范围的情况下,得到可靠的满足工程精度需要的渗流参数反演解。由反演结果也可以判断,该工程在长时期运行后,坝基帷幕老化严重,渗透性加大,基本接近坝基微裂隙岩体的渗透性,两者相差不到 3 倍,因此帷幕的作用效果不理想,致使坝基扬压力偏高。通过参数反演确定渗透系数,能够反映坝基渗透性的当前状态,推断渗透性随时间的变化,这也是通过试验方法确定渗透系数难以做到的,是参数反演方法具有的不可比拟的优越性。同时可以看到, HGA 算法的计算量虽然较大,但就运行时间指标来看,现有的计算资源基本可以满足大型工程实践的需

要。由此可见,提出的 HGA 算法可以在目前的渗流参数反演工程实践中推广。

3 重力坝坝基水头分布预测

渗流参数反演的意义不仅在于确定各类介质的渗透系数,更重要的是对工程未来运行状态进行合理预测。本文依据上述反演结果对水库运行各时期的坝基水头分布进行预测。

依据表 4 的渗透系数反演结果,利用笔者编制的空间渗流程序进行正分析,对水库运行不同水位下的测点水头的预测结果及误差分析如表 6 所示,相应的坝基水头分布预测结果如图 5 所示。由表 6 的测点水头预测结果可以看出,上游水位为 47.75 m 的预测效果令人满意,剔除异常测点后,预测误差基本控制在 5% 以下,绝大多数测点精度比较高,预测结果可以满足工程精度要求,由此可见,本文提出的反演方法是有效的,反演成果是可靠的。

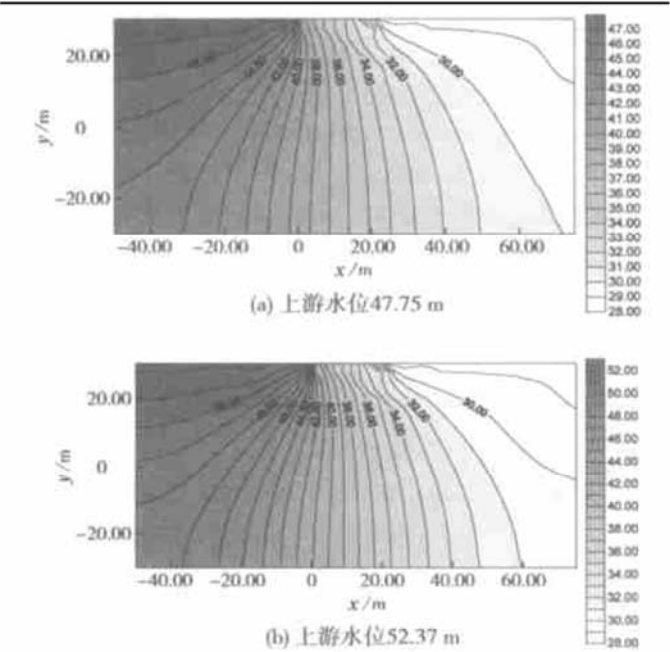


图 5 7# 坝基预测水头分布等值线

Fig. 5 Predicted water head contours of No. 7 dam

表 6 水位各运行期测点水头预测误差分析

Table 6 Errors of predicted water level at the monitoring points during different periods

测点 编号	同期水位 47.75 m			高水位 52.37 m		
	实测水 头 H_0	预测水 头 H_f	相对 误差	实测水 头 H_0	预测水 头 H_f	相对 误差
7# - 1	36.03	36.0873	0.16%	36.56	37.8380	3.5%
7# - 2	39.61	35.2592	10.98%	40.62	36.6882	9.21%
7# - 3	34.44	34.2064	0.68%	37.38	35.5060	5.01%
9# - 1	34.73	35.0531	0.93%	34.95	36.6425	4.85%
9# - 2	36.48	34.1675	6.35%	34.35	35.5565	3.5%
9# - 3	34.47	33.2657	3.49%	34.03	34.4616	1.27%
9# - 4	31.74	32.1648	1.32%	33.49	33.1103	1.13%

误差公式为 $\left| \frac{H_f - H_0}{H_0} \right|$ 。

4 结 语

新型混合遗传算法在典型重力坝坝基裂隙岩体渗流参数反演实践中得到成功应用,表明该方法是可靠的,可在只给出参数较大变化范围的情况下,得到可靠的满足工程精度需要的渗流参数反演解,而且就算法的运行时间指标来看,现有的计算资源基本可以满足大型工程实践的需要,可见,本文采用的 HGA 反演方法值得在目前的渗流参数反演工程实践中推广。

参考文献:

[1] 朱岳明,刘望亭. 裂隙岩体渗透系数张量的反演分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 461- 470.

[2] Frind E O, Pinder G F. Galerkin solution of the inverse problem for aquifer transmissivity [J]. Water Rour Res, 1973, 9(5): 1397- 1410.

[3] 周志芳,马庆新,吴继敏,等. 有限分析法在反求裂隙岩体渗透张量中的应用[J]. 水利学报, 1993, 23(5): 68- 75.

[4] 冯夏庭,张治强,杨成祥,等. 位移反分析的进化神经网络方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 529- 533.

[5] 高 玮,郑颖人. 岩体参数的进化反演[J]. 水利学报, 2000, 30(8): 1- 5.

[6] 刘 杰. 裂隙岩体渗流场及其与应力场耦合的参数反问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2002.