

# 基于遗传算法的带缝重力坝弹性模量反分析

王 刚, 马震岳\*

(大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 根据混凝土重力坝坝顶水平位移观测资料, 采用逐步回归方法分离出了坝顶水平位移的水压分量; 以大坝和基岩的弹性模量识别反问题作为优化问题, 利用改进的遗传算法, 并借助接触单元模拟坝体纵缝进行了有限元反演分析. 某带缝重力坝数值计算实例表明, 该计算方法能够较好地反映坝体结构的实际状况, 参数反演分析计算效率高, 计算结果与现场试验值及经验数据吻合较好, 具有较高的合理性与可靠性.

**关键词:** 重力坝; 纵缝; 接触单元; 优化问题; 遗传算法; 反分析

**中图分类号:** TV314 **文献标志码:** A

## 0 引 言

就混凝土重力坝而言, 一般沿坝轴线设置一条或多条纵向施工缝, 以便于坝体混凝土浇筑施工, 并满足温控设计要求. 然而, 在一些实际工程中, 键槽和灌浆处理不当, 将使坝体存在永久性纵缝, 从而使坝体成为一个不连续体系统. 为解决好这样一个复杂系统的接触问题, 数值计算中必须采用合理有效的分析方法或计算理论, 使得分析结果能够合理反映工程实际状况. 另外, 由于大坝及基岩工作条件复杂, 在技术设计和安全复核中, 对荷载、计算参数、边界条件等因素的精确模拟还较困难, 这使得目前水工结构分析还难于做到完全与工程实际相吻合, 有时甚至会有较大差别. 因此, 利用原位监测资料反演大坝及基岩的实际运行状况, 可以较好地评价大坝和基岩的实际安全度<sup>[1]</sup>.

但是, 目前针对带缝重力坝的反演分析, 由于考虑到计算效率的原因, 基本不考虑大坝纵缝对实际结构的影响, 或者寻求一些简化计算方法<sup>[2]</sup>, 总的来说, 反分析计算精度不高. 所以, 既能较好地利用原位监测资料, 又能合理有效地模拟实际工程结构, 使得数值仿真计算成果与坝体实际工作状况之间达到较高的吻合度, 是本文反分析研究的出发点.

## 1 接触单元及算法

目前, 为求解接触问题, 一般采用基于连续介质力学有限元理论所建立的特殊界面单元模型, 如联结单元模型、节理单元模型和薄层单元模型; 另外, 就是采用基于非连续介质理论或块体理论所建立的离散单元法和非连续变形分析方法<sup>[3]</sup>. 这两类方法均属于惩罚弹簧法(罚函数法), 由于弹簧刚度系数难于确定, 不能得到比较真实的结构变形、应力及接触特性. 而拉格朗日乘子方法和改进的拉格朗日方法可以隐式地得到结构的接触应力. 本文在连续介质有限单元法中, 采用接触对单元并结合改进的拉格朗日方法对大坝的纵缝进行模拟.

### 1.1 接触模式

相互接触的两部分实体, 在接触面的两侧一面定义为目标面单元, 另一面定义为接触面单元, 它们为无厚度的两层单元(亦称为接触对), 覆盖在接缝两侧的实体单元上(如图 1(a)). 如果不考虑接触限制(即不施加接触协调条件), 受压时必然会导致互相侵入或穿透(如图 1(b)), 这与实际情况不符. 因此, 必须控制接缝的开启  $u_n \geq 0$ <sup>[4]</sup>. 为此, 可以采用两种方法来定义接触协调条件: 罚函数法(如图 1(c)), 用一个弹簧施加接触协调条件, 弹簧刚度(或接触刚度)称为罚参数; 拉格朗日

乘法(如图 1(d)),增加一个附加自由度(接触压力),以满足不侵入条件.

而将上述两种方法结合起来施加接触协调条件,并采用许可侵入量来进行描述,称为改进的拉格朗日方法(如图 1(e)).

采用改进的拉格朗日方法,接触追踪向量定义为

$$(R_c \quad \tau) \tag{1}$$

式中: $R_c$  为接触压力; $\tau$  为接触面剪切应力.

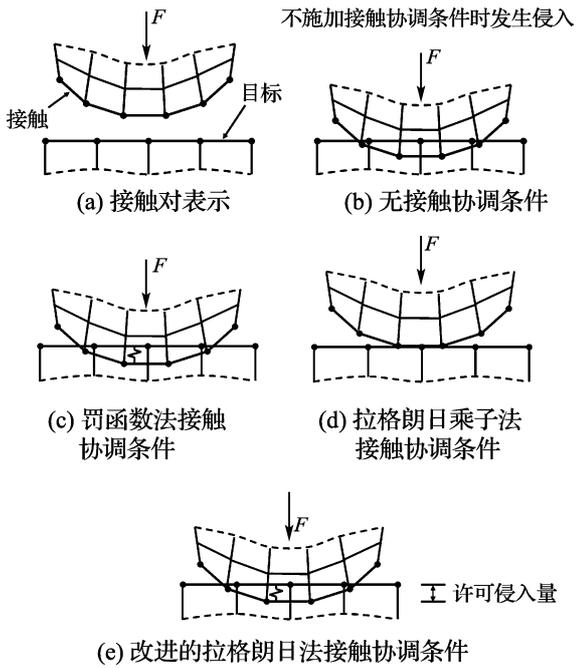


图 1 接触模型状态示意图

Fig. 1 Sketchs of contact states

### 1.2 接触压力定义

接触压力的计算作如下考虑:

$$R_c = \begin{cases} 0; & u_n > 0 \\ k_n u_n + \lambda_{i+1}; & u_n \leq 0 \end{cases} \tag{2}$$

$$k_n = fE \tag{3}$$

$$\lambda_{i+1} = \begin{cases} \lambda_i + k_n u_n; & |u_n| > \epsilon \\ \lambda_i; & |u_n| \leq \epsilon \end{cases} \tag{4}$$

式中: $k_n$  为法向接触刚度(Hertz 接触刚度); $E$  为接触单元周围实体的弹性模量; $f$  为系数; $\lambda_i$  为第  $i$  次迭代的拉格朗日乘子; $\epsilon$  为容差,用来定义接触许可侵入量.

### 1.3 摩擦定义

本文计算采用库仑粘结-滑移摩擦模型对摩擦进行模拟,计算式表示为

$$\tau_{lim} = \mu R_c + c \tag{5}$$

$$|\tau| \leq \tau_{lim} \tag{6}$$

式中: $\tau$  为接触面等效剪应力; $\tau_{lim}$  为接触面剪应力极限; $\tau_{max}$  为最大许可剪应力; $\mu$  为接触面摩擦因数; $c$  为接触面粘聚力系数.一旦等效剪应力  $\tau$  超出剪应力极限  $\tau_{lim}$ ,接触面将产生相对滑移,如图 2 所示.

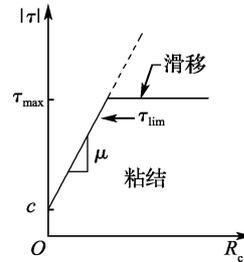


图 2 摩擦模型

Fig. 2 The model of friction

## 2 改进的遗传算法

### 2.1 遗传算法的特点

遗传算法计算简单,功能性强,对于搜索空间基本不需要限制性(如连续、可导及单峰等)假设<sup>[5]</sup>.标准遗传算法(即简单遗传算法,SGA)一般采用二进制进行编码,且只使用选择算子、交叉算子和变异算子 3 种基本遗传算法算子<sup>[6,7]</sup>.其遗传进化操作过程简单、容易理解,是其他一些遗传算法的雏形和基础.但也存在一些明显缺陷,如局部搜索能力差、容易陷入局部极值、存在未成熟收敛(早熟)等.

本文将对标准遗传算法的各算子进行改进并引入伪并行遗传算法的思想,提高遗传算法的全局搜索能力,克服早熟和停滞现象.

### 2.2 遗传算法的改进

2.2.1 编码方法 由于二进制编码存在Hamming 悬崖、求解精度需要事先确定等缺点<sup>[6]</sup>,在本文中尝试采用十进制进行编码.十进制编码除了能克服上述缺点,在求解高维和复杂优化问题上比二进制编码在平均计算效率上有很大提高.

2.2.2 选择操作 在遗传算法求解过程中,若采用基于适应值比例的选择策略常常会出现过早收敛(早熟)和停滞现象<sup>[7]</sup>.本文采用基于排名的选择策略,这种选择策略首先确定个体的适应值在群体中的排名;其次,通过适应度尺度变换对个体的适应度进行适当的扩大或缩小,避免产生超级

个体或过早被淘汰,以维护群体的多样性;同时,选出适应度最好的几个个体(最优个体)不参与交叉和变异,直接保留到下一代,而对其他个体进行交叉和变异操作,以产生新的个体,形成新的种群.

2.2.3 交叉操作 本文计算采用算术交叉<sup>[7]</sup>.假设在两个个体之间进行交叉,则运算后所产生的两个新个体即为

$$\begin{cases} X_A^{i+1} = \alpha X_B^i + (1 - \alpha) X_A^i \\ X_B^{i+1} = \alpha X_A^i + (1 - \alpha) X_B^i \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\alpha$ 为一参数,它为在每一代群体中由 $[0,1]$ 中产生的随机数.

通过算术交叉产生的后代,其分量仍在定义区间之内,却能够遍历整个定义区间取值.

2.2.4 变异操作 本文采用高斯变异操作<sup>[6]</sup>.群体中的一个个体是由解向量  $\mathbf{X} = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n)$  加一个摄动向量  $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_1 \ \sigma_2 \ \dots \ \sigma_n)$  组成.其中,摄动向量中的各元素为服从均值为0正态分布的随机数,且与群体的进化代数相关,可以表示为

$$\sigma_i = \left[ 1 - r \cdot \frac{k}{G} \right] \cdot randn; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中: $G$ 为最大进化代数; $k$ 为当前进化代数; $r$ 为控制参数,在 $[0,1]$ 取值; $randn$ 为服从正态分布的随机数.

高斯变异改进了遗传算法对重点搜索区域的局部搜索性能.

2.2.5 伪并行遗传算法 伪并行遗传算法实际上是在一台计算机上实现遗传算法的并行计算<sup>[6]</sup>.具体实现时,将全体种群划分为几个子种群,每隔一定的进化代数,从各个种群中取出一定比例的最优个体取代另一个种群中相应数目的最差个体,这一过程又称为“迁移”.伪并行遗传算法能够维持群体的多样性,从而达到抑止早熟现象的效果.

### 3 带缝重力坝反分析模型及其遗传算法描述

#### 3.1 反问题目标函数和遗传算法适应度函数的建立

根据已有研究,用坝顶水平位移观测数据识别坝体混凝土的弹性模量  $E_c$  和坝基岩石的弹性模量  $E_r$  具有较高的灵敏度<sup>[8]</sup>.实际分析中,可采用水位荷载作用引起的观测点处位移值分量反演

弹性模量,其一般的数学模型可由弹性力学位移法基本方程和附加条件组成.

若基本方程采用有限元位移法求解,可将其化为节点位移的整体有限元支配方程:

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{R} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{K}$ 为结构整体刚度矩阵; $\mathbf{u}$ 为节点位移列阵; $\mathbf{R} = \mathbf{R}_b + \mathbf{R}_c$ 为节点等效荷载列阵, $\mathbf{R}_b$ 为库水压节点荷载列阵, $\mathbf{R}_c$ 为接触面节点等效荷载列阵(接触压力).

附加条件方程可以表示为

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{X}) = (u_1 \ u_2 \ \dots \ u_{nd})^T$ 为有限元法计算的结构位移值,其中向量  $\mathbf{X} = (E_r \ E_c)^T$ ;  $E_r$ 、 $E_c$ 分别为坝基岩石和坝体混凝土的弹性模量; $\bar{\mathbf{u}} = (\bar{u}_1 \ \bar{u}_2 \ \dots \ \bar{u}_{nd})^T$ 为水位荷载作用下的观测位移值; $nd$ 是附加条件数量(测量位移个数).

考虑到模型误差和测量误差的客观存在,式(10)难以精确满足.采用反问题最优控制解的定义,即认为待定弹性模量虽能使式(9)成立,但只能使式(10)近似成立,所以该问题的控制指标为使  $\|\mathbf{u} - \bar{\mathbf{u}}\|^2$  达到最小值.其中  $\|\cdot\|$  是定义在数据空间上的某种范数,若取  $L_2$  范数,则整个反问题目标函数可表述为

$$F = (\mathbf{u} - \bar{\mathbf{u}})^T (\mathbf{u} - \bar{\mathbf{u}}) \quad (11)$$

由此可见,本文的反问题实际上是一个求最小值  $\min F$  的优化问题.采用遗传算法进行求解最小值的优化计算时,可将  $F$  定义成适应度函数,其中  $\mathbf{X} = (E_r \ E_c)^T$  为遗传决策变量.

#### 3.2 坝顶水平位移水压分量的分离

大坝水平位移  $d$  按其成因可分为3个分量:水压分量  $d_h$ ;温度分量  $d_T$ ;时效分量  $d_\theta$ .在工程上,对实际坝顶位移监测数据一般须先选用合理的统计回归因子,然后采用回归方法进行分离<sup>[1,9]</sup>.如果采用逐步回归方法,可分离出各个分量,其中

$$d_h = a_0 + a_1 H + a_2 H^2 + a_3 H^3 + a_4 H^4 \quad (12)$$

式中: $a_0 \sim a_4$ 为回归系数; $H$ 为与经过归一化处理的上游水位.

#### 3.3 基于改进遗传算法大坝反分析的算法描述

基于改进遗传算法的带缝重力坝弹性模量反演分析模型的计算流程如图3所示,整个流程分为统计回归分析、遗传算法和有限元分析三大部分,三部分形成一个有机循环系统.

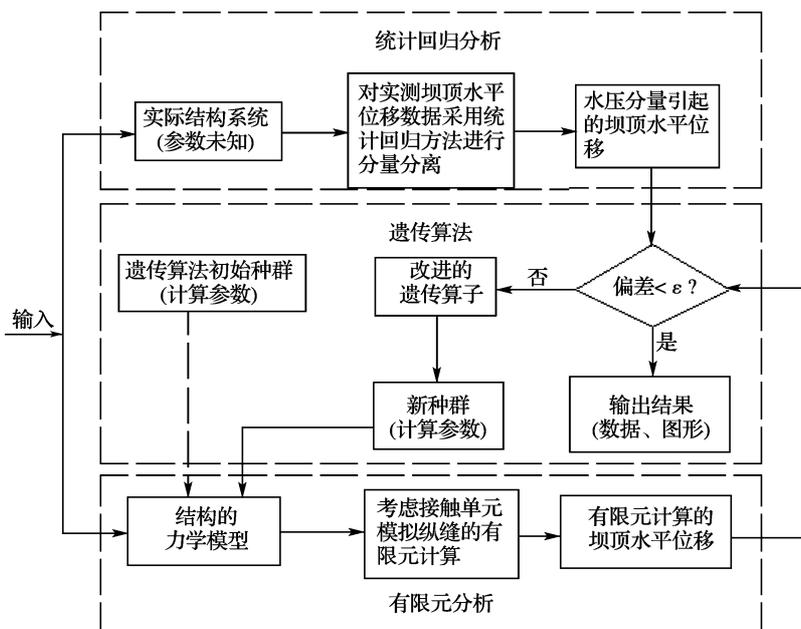


图 3 基于改进遗传算法带缝重力坝弹性模量反分析计算流程图

Fig. 3 The progress of inverse analysis of elastic parameters of gravity dam with longitudinal joints using improved GA

### 4 工程实例分析

我国东北某混凝土重力坝,其坝顶高程为 267.7 m. 坝体从左岸到右岸共分 60 个坝段,每个坝段长 18 m. 该坝设置了 3 条纵缝,沿横向将每个坝段从上游到下游分割为 A、B、C、D 四个坝块. 该大坝观测工作始于 1954 年,观测项目包括坝顶水平位移、坝顶垂直位移、纵向扬压力、横向扬压力和漏水量等. 1984 年建成真空激光观测系统,并于 1986 年底实现了计算机控制自动化观测,1993 年实现从数据采集到数据整理分析的一整套自动化系统,不但观测精度高,而且观测效率也很高. 本文取大坝的 49<sup>#</sup> 挡水坝段进行反演分析计算,该坝段高为 64.7 m.

#### 4.1 有限元模型与接触刚度敏感性分析

按平面应变问题进行有限元结构分析时,3 条纵缝采用接触单元进行模拟,基岩取坝体上、下游以及深度方向约 1.5 倍的坝高范围;而基岩的约束条件为上、下游端面为法向单约束,底面为固定约束. 有限元模型见图 4.

一般而言,在保证确定的接触许可侵入量(满足工程计算精度需要即可)的情况下,罚刚度  $k_n$  的取值不同,会造成接触面间的接触压力  $R_c$  不同,进而造成有限元迭代计算出的结构变形产生差异. 针对于本文有限元模型,计算出坝顶水平位移变化相对值与接触刚度比值[见式(3)]间的关

系如图 5 所示. 根据计算结果,虽然随着接触刚度的增加,坝顶水平位移计算值呈降低趋势,但总体而言接触刚度成倍增加或减小,引起的坝顶位移的变化并不明显,接触刚度增加 1 倍的情况下,坝顶最大水平位移只减小 5.5% 左右. 所以,在进行

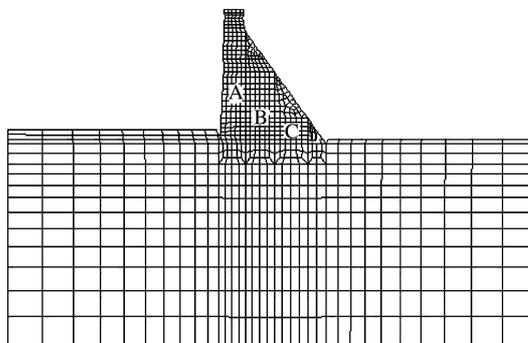


图 4 49<sup>#</sup> 坝段有限元网格分布

Fig. 4 Finite element mesh of No. 49 dam section

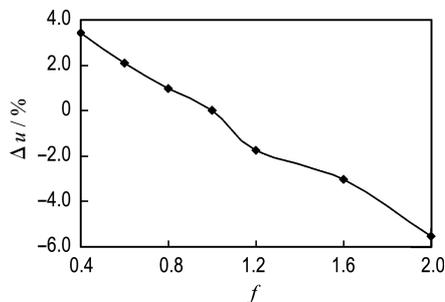


图 5 接触刚度与位移变化  $\Delta u$  的关系

Fig. 5 Relation between contact stiffness and displacement  $\Delta u$

有限元接触分析时,本文取1倍的坝体弹性模量估算纵缝的接触刚度是满足工程计算需要的。

#### 4.2 坝顶水平位移回归分析

根据1998年1月~2001年12月坝顶水平位移的实测数据,采用逐步回归方法进行处理,得到的各分量分布如图6所示,回归计算的各因子复相关系数为97.74%,标准差为0.432 mm<sup>2</sup>。其中,根据式(12)分离出的水压分量(mm)为

$$d_h = -1.81 + 9.22H^4 \quad (13)$$

式中: $H = (h - 200)/70$ ;  $h$ 为水位高程,m。

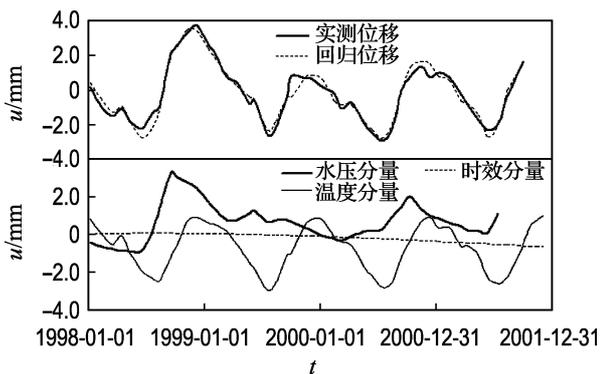


图6 49#坝段坝顶水平位移拟合曲线

Fig. 6 Regression curves of the horizontal displacements at the crest of the No. 49 dam section

由于坝顶位移的实测数据均为相对于坝体左、右两岸观测零点的相对值,在用有限元进行参数识别时必须采用不同水位下的相对位移进行计算。在本文有限元计算中,分别选取了上游水位为263.5、250.0和243.6 m的作用效应,并取前两种水位情况下的坝顶水平位移与最后一种情况下位移的相对值,然后结合实测数据以式(11)为目标函数进行反演分析。

#### 4.3 遗传算法参数选取及反演计算结果

对于遗传算法各操作的参数选取如下:种群个体数为20;每一代选择两个最优个体直接保留到下一代;种群中对于每个个体适应度变换尺度为 $\sqrt{n}$ ;交叉概率为0.80;分为两个子种群,迁移概率为0.2,每间隔20代进行子种群间的迁移;遗传算法终止条件为最大进化代数G,即进化到第150代计算结束。反演计算时,材料的弹性模量取值范围根据工程经验取为:坝体5~40 GPa;基岩1~35 GPa。在进行遗传算法操作时,将这两个分量(决策变量)均映射到[0,1]上,即

$$\begin{aligned} E_c &= 5 + f \cdot (40 - 5) \\ E_r &= 1 + g \cdot (35 - 1) \end{aligned} \quad (14)$$

式中  $f, g$  为[0,1]的随机数。

按照图3给出的计算流程,对采用接触单元考虑坝体纵缝以及不考虑坝体纵缝的计算模型,分别采用标准遗传算法和本文改进遗传算法进行坝体和基岩弹性模量反演计算,结果列于表1中,图7绘出了考虑坝体纵缝时前100代最优个体的目标函数F随遗传进化计算代数的变化过程。标准遗传算法和本文遗传算法对于相同计算模型能够得到相同计算结果,只是在计算效率上有所不同。

表1 不同方法与模型反演计算成果比较

方法		$E_c$ /GPa	$E_r$ /GPa	遗传进化代数
标准遗传算法	考虑纵缝	21.41	11.14	50
标准遗传算法	不考虑纵缝	19.66	11.08	52
本文改进遗传算法	考虑纵缝	21.41	11.14	32
本文改进遗传算法	不考虑纵缝	19.66	11.08	27

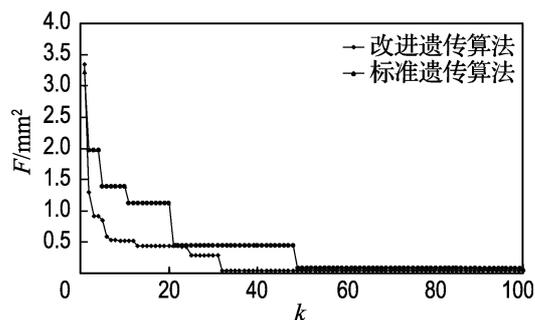


图7 目标函数的收敛过程

Fig. 7 Convergence process of the objective function

考虑纵缝时,反演计算出来的坝体混凝土和基岩的弹性模量分别为21.41和11.14 GPa;不考虑纵缝时,反演出来两者弹性模量分别为19.66和11.08 GPa,相对于考虑纵缝时分别减小8.2%和0.54%。计算结果显示,坝体的弹性模量反演计算结果相差要明显一些,坝基弹性模量的反演值差别不大。这说明,考虑纵缝与否,对反演计算结果是有影响的,但是,由于采用接触单元模拟纵缝充分考虑到纵缝结构的影响,其物理模型更接近工程实际状况。

另外,就计算效率而言,考虑纵缝时本文改进遗传算法只需32代左右便接近最优解,而标准遗传算法需要50代左右,可见,本文提出的改进遗传算法达到了有效提高算法收敛效率的目的。

当然,本文反演计算得到的弹性模量是整体坝体的概化参数,将具有不同标号混凝土分区的坝体进行了均一化处理.该工程曾对坝体混凝土进行现场取芯实验,坝体混凝土材料不均匀性很大,其弹性模量在 17~32 GPa;而对于坝基岩石变形模量已有的工程经验数据为 9.5~38.9 GPa<sup>[9]</sup>.不过,本文计算方法反演出来的坝体和岩基弹性模量均在实测值范围之内,可见,计算成果具有较高的工程可信度.

## 5 结 论

(1)采用接触单元模拟大坝纵缝,并对大坝和基岩的弹性模量进行反演是行之有效的,相对于以往的不考虑坝体纵缝的有限元反演分析,研究模型更加切合实际;

(2)利用本文改进的遗传算法进行目标搜索,实现具有非线性接触问题的结构的反演优化分析是可行的,而且具有较高的计算效率;

(3)对实测位移资料各影响分量进行分离,回归计算各因子复相关系数为 97.74%,标准差为 0.432 mm<sup>2</sup>,达到较高的精度;

(4)基于改进遗传算法带缝混凝土重力坝弹性模量反演分析的结果,与现场实验得到的材料参数吻合较好,达到了很好的工程精度,该方法在工程应用中是可行和实用的;

(5)本文的计算方法为实际工程的物理力学参数反演提供了明确思路,具有较高的实用价值.

## 参考文献:

- [1] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2003
- [2] 杨 杰,吴中如,顾冲时,等. 坝体与坝基材料参数的薄层单元有限元反分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(2):3087-3092
- [3] 栾茂田,黎 勇,林 泉. 非连续变形计算力学模型及其在有缝重力坝静力分析中的应用[J]. 水利学报, 2001, **4**(4):40-46
- [4] 陈 龙,顾冲时,侯祥东. 双节点单元和接触算法分析带缝大坝性状[J]. 水电能源科学, 2004, **1**(3):56-59
- [5] 刘迎曦,王登刚,李守巨,等. 识别混凝土重力坝弹性模量的一种新方法[J]. 大连理工大学学报, 2000, **40**(3):144-147  
(LIU Ying-xi, WANG Deng-gang, LI Shou-ju, et al. Parameter identification of concrete dam with neural networks [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2000, **40**(3):144-147)
- [6] 周 明,孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2005
- [7] 潘正君,康立山,陈毓屏. 演化计算[M]. 北京:清华大学出版社, 1998
- [8] 李守巨,刘迎曦,王登刚,等. 混凝土重力坝弹性参数识别的灵敏度分析及实例[J]. 岩土工程学报, 2000, **3**(5):381-383
- [9] 刘迎曦,李守巨,陈昌林,等. 丰满混凝土重力坝材料参数识别研究[J]. 水利学报, 1999, **9**(9):38-44

## Inverse analysis of elastic parameters of gravity dam with longitudinal joints using improved GA

WANG Gang, MA Zhen-yue\*

( School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** Based on the monitoring data about the crest displacement of a gravity dam, the component of horizontal displacement caused by impounded water was separated by progressive regressive method. At the same time, an inverse problem about elastic parameter of dams and basic rocks identification using improved genetic algorithm was analyzed as an optimization problem. Also, during the inverse calculating process, contact elements were used to simulate the longitudinal joints of the dam. It is shown that the methods proposed are coincident better with the actual structure, and the results of the inverse analysis are reasonable and reliable in high degree.

**Key words:** gravity dam; longitudinal joints; contact elements; optimization problem; genetic algorithm; inverse analysis