

DOI: 10.11779/CJGE201704019

# 基于粒子群支持向量机的高心墙堆石坝渗透系数反演

倪沙沙, 迟世春\*

(大连理工大学建设工程学部水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 渗流场参数的获取是研究运行期高心墙堆石坝渗流特性的难点之一。针对糯扎渡高心墙堆石坝, 利用饱和-非饱和渗流场有限元程序生成学习样本, 借助支持向量机的高度非线性映射能力, 建立了渗透系数与水头之间的映射关系。再以识别误差目标函数为适应值, 采用粒子群优化算法反馈搜索以建立大坝渗透系数反演模型。以大坝最大横剖面典型渗压计测点为实测点, 采用一维固结理论推导了大坝心墙超静孔隙水压力消散计算公式, 并对心墙水头实测值进行修正。通过对运行期库水位稳定时段渗流场的反演得到大坝待反演分区的渗透系数, 再利用水位上升期对应的渗流场进行验证。结果表明, 渗透系数反演结果是合理的。

**关键词:** 高心墙堆石坝; 支持向量机; 粒子群优化; 渗透系数反演; 饱和-非饱和渗流

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)04-0727-08

作者简介: 倪沙沙(1985-), 女, 博士研究生, 主要从事土石坝渗流场的数值计算及渗透系数反演等研究。E-mail: 548899337@qq.com。

## Back analysis of permeability coefficient of high core rockfill dam based on particle swarm optimization and support vector machine

NI Sha-sha, CHI Shi-chun

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** It is important to determine the seepage field parameters of high earth-rock-fill dam using the observed seepage data during operation period. For Nuozhadu core rockfill dam, the training samples are produced for saturated seepage field which is calculated by the finite element program. The nonlinear relationship between seepage parameters and water heads is established using the SVM mapping. Then taking the error objective function as the fitness value of particle swarm optimization (PSO), the seepage parameters should be identified by PSO. Based on the one-dimension consolidation theory, the dissipation formulae for the excess pore water pressure in the core wall are derived, and they are used to correct the measured seepage pressure values in the core wall. The recorded osmotic pressure curves of osmometers, which are distributed in the maximum section, are used for this back analysis. The permeability coefficients of the dam materials are retrieved using the corrected measured seepage pressure values under steady state of seepage condition, i.e., the water level remains unchanged. Meanwhile, the parameters are verified by the unstable saturated-unsaturated seepage field while the water lever rises. The results show that the permeability coefficients are reasonable.

**Key words:** high core rockfill dam; support vector machine; particle swarm optimization; permeability coefficient identification; saturated-unsaturated seepage field

## 0 引言

土石坝因具有投资省、施工简便、充分利用当地材料以及对地形、地质条件要求低等优点而被广泛采用。同时土石坝由于量大面广, 管理不到位, 也发生过不少事故。国际大坝委员会曾对溃坝事故进行过3次调研<sup>[1-2]</sup>。按溃坝坝型统计, 土石坝溃坝数量占总溃坝数的70%。其中约25%土石坝的溃决是由于渗透破坏导致, 如1976年美国发生的Teton坝溃坝事故<sup>[3]</sup>就是由渗透破坏引发的。水利部对中国溃坝失事的统计

先后也进行过3次。结果表明, 中国已溃决土石坝中由于渗透破坏造成的失事事故约占40%<sup>[4]</sup>, 如1970年发生在广东省揭阳市的横江水库垮坝事故就是由于坝身渗漏形成管涌造成。由此可见, 渗流对土石坝的安全至关重要。为了最大限度的降低土石坝发生渗流安全事故, 需要对运行期间的土石坝渗流进行实时监控,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379029)

收稿日期: 2016-01-20

\*通讯作者(E-mail: schchi@dlut.edu.cn)

并及时分析渗控监测资料, 以服务于大坝运行管理。

运行期土石坝渗流监控一般包括坝后渗透流量与坝内渗压水头, 这些实时的监测资料是大坝真实性的最直接反映。但根据这些监测数据一般并不能直接判断坝体的渗透安全性, 需要配以大坝渗流场分析等技术手段才能完成。而土石坝渗流场分析离不开对实际坝体各分区坝料的渗透系数的估计。因此, 利用土石坝渗流监测资料求取坝体各分区渗透系数, 以提高土石坝渗流场分析的可靠性, 实时准确判断大坝渗流安全有重要的实际意义。

利用饱和-非饱和渗流场的有限元程序生成学习样本, 借助支持向量机高度非线性映射能力, 建立了渗透系数与水头之间的映射关系。然后以识别误差为适应值, 通过粒子群优化算法反馈搜索坝体各分区的渗透系数。结合糯扎渡工程实例, 以大坝主要分区坝料的渗透系数为目标未知量, 通过对运行期库水位稳定时段(2012年12月21日—2013年6月20日)最大横剖面渗流场的反演, 获得了大坝各分区的渗透系数; 再利用库水位上升期(2013年7月10日—2013年10月8日)坝内各测点的渗压水头与反演渗透系数计算的渗流场进行比较, 验证了本文提出的土石坝渗透系数反演方法的有效性。

## 1 糯扎渡大坝坝体坝基渗流监测

### 1.1 坝体坝基防渗系统

糯扎渡大坝坝体主要分为心墙、反滤料I料、反滤料II、细堆石、粗堆石料I及粗堆石料II 6个分区。心墙顶宽10 m, 上、下游坡度均为1:0.2, 心墙顶部高程820.5 m, 最低建基面高程560.0 m。为保证心墙与坝基岩石之间不发生沿接触面的集中渗漏及接触冲刷, 在心墙、反滤料I、反滤料II与基岩接触范围设置钢筋混凝土垫层, 并在垫层与心墙间设一层厚2 m

的高塑性接触黏土层, 垫层底部采用固结灌浆处理。沿心墙轴线布置坝基防渗帷幕, 左岸与引水发电系统及溢洪道的防渗帷幕相衔接, 右岸进行帷幕灌浆并延伸至相对隔水岩体以减小沿坝肩的绕坝渗流<sup>[5]</sup>。

### 1.2 坝体渗流监测概况及待反演参数确定

坝体自2009年1月开始填筑至2012年12月填筑到坝顶, 并于2011年12月开始蓄水。为监测坝体内孔隙水压力分布, 在坝体内布置了渗压计。以大坝最大横剖面为研究对象, 其二维渗流有限元计算模型如下图1所示, 图中实心的黑色方框代表渗压计测点。

受心墙填筑压密的施工过程及土料自身重力的影响, 通常心墙竖直方向渗透系数小于水平方向的渗透系数<sup>[6]</sup>, 故将心墙视为渗透各向异性材料, 水平与竖直方向作为不同的渗透系数进行反演。在大坝设计阶段进行了各分区坝料的渗透试验, 得到反滤料II与细堆石料的渗透系数约为 $5 \times 10^{-2} \sim 1 \text{ cm/s}$ , 比心墙渗透系数约大5个数量级; 粗堆石料I的渗透系数约为 $0.1 \sim 2 \text{ cm/s}$ , 比心墙约大6个数量级; 反滤料I与粗堆石料II的渗透系数约为 $5 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ , 比心墙约大3个数量级。考虑到反滤料II、细堆石料与粗堆石料I的渗透系数与心墙相差5~6个数量级, 其数值对渗流场的影响不大, 因此计算中将这些坝料的渗透系数取为定值不再进行反演。反滤料I与粗堆石料II无明显的渗透各向异性特征, 将其视为渗透各向同性材料。这样待反演的渗透系数共有4个, 分别是心墙的水平、竖向渗透系数及反滤料I与粗堆石料II的渗透系数。

大坝最大横剖面的3个待反演分区共布置24个渗压测点, 见上图1所示。由于部分渗压计损坏、基准值不准或测值无规律, 本文选取其中7个测值连续且规律较好的渗压计测点作为反演实测点, 水库上下游水位-时间过程线、部分分区填筑过程线及7个测点的水位-时间变化过程线如图2所示。

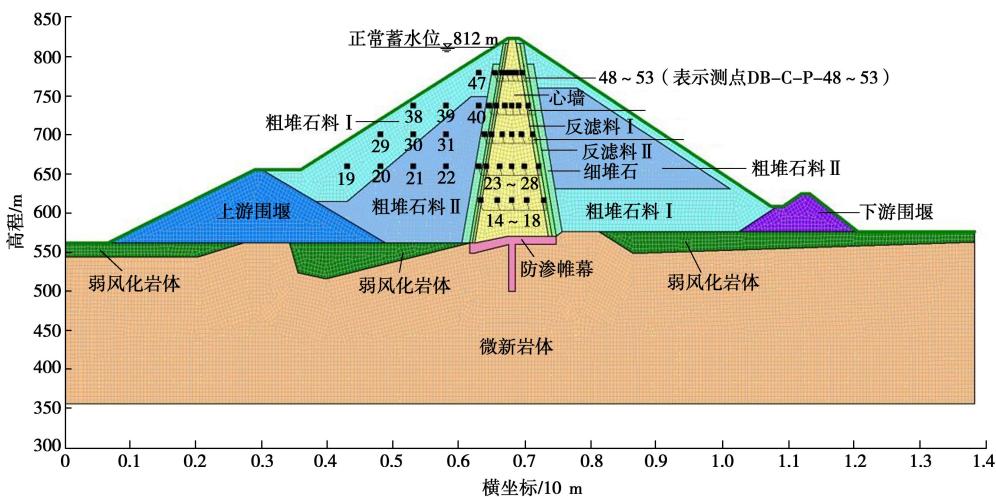


图1 糯扎渡心墙堆石坝最大剖面有限元网格及测点布置图

Fig. 1 2D finite element meshes and measuring points of Nuozhadu dam

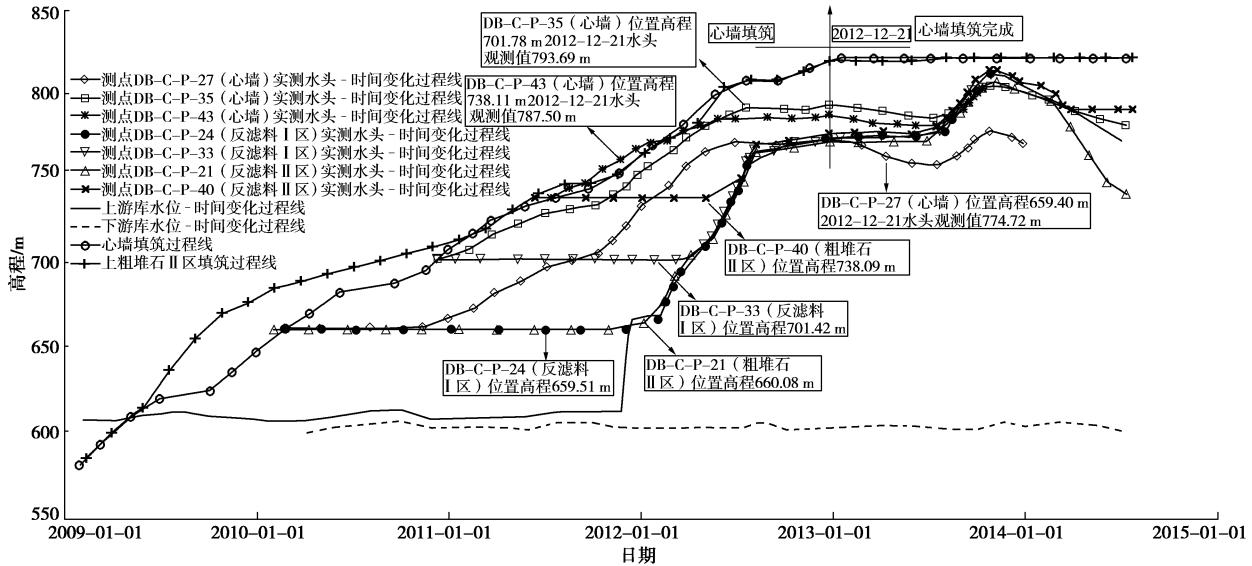


图2 坝体部分分区填筑过程线及测点实测水位-时间变化过程线

Fig. 2 Filling process curves of some partitions and measured time-varying hydraulic head curves

### 1.3 大坝心墙孔隙水压力消散简化计算

由图2可知, 心墙渗压计测点在水库蓄水前, 已经存在较高的孔隙水压力。这是由于心墙碾压施工引起体积收缩, 在心墙内部形成孔隙水压力, 从而使渗压计产生读数。随着心墙的往上填筑心墙所受压力的增大, 渗压计读数也逐渐增大, 但这部分渗透不是上下游水头差形成的渗透压力, 在用心墙测点的水头实测值反演渗透系数时应将这部分超静孔隙水压力扣除。心墙上下游侧为渗透系数较大的反滤料, 可视为排水边界, 心墙测点超静孔隙水压力在心墙填筑完成后会表现出随时间逐渐消散。

由非饱和土力学知识可知, 当土壤含水率很高时, 气相完全为液体所包围, 体积微小, 并只能随液体一起流动, 可视为一种挟气水的二相体系, 此时, 土壤的气渗透极小。通常认为饱和度高于95%的土可作饱和土处理。糯扎渡大坝心墙碾压填筑后的饱和度为93%~97%, 为简化计算, 本文在计算心墙测点孔隙水压力消散时近似视心墙掺砾料处于饱和状态。因此, 在自重作用下心墙中的孔隙水向上下游两侧反滤料排出的问题可视为一维固结问题, 且符合太沙基单向固结理论的基本假定。现从心墙中深度 $z$ 处取一微元体, 如图3所示。

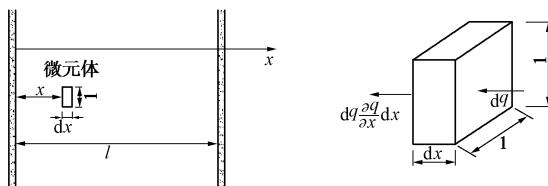


图3 一维排水固结过程

Fig. 3 One-dimensional drainage consolidation process  
微元体的固体体积为

$$V_1 = \frac{1}{1+e_1} dx = \text{常量} \quad , \quad (1)$$

孔隙体积为

$$V_2 = e V_1 = e \left( \frac{1}{1+e_1} dx \right) \quad , \quad (2)$$

式中,  $e_1$  表示渗流固结前土的孔隙比。

在  $dt$  时间内, 微元体中孔隙体积的变化(减小)等于同一时间内从微元体中流出的水量, 亦即

$$\frac{\partial V_2}{\partial t} dt = \frac{\partial q}{\partial x} dx dt \quad , \quad (3)$$

式中,  $q$  代表单位时间内流过单位横截面积的水量。

将式(2)、(3)联立, 得

$$\frac{1}{1+e_1} \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial x} \quad , \quad (4)$$

由土的压缩系数公式和饱和土体有效应力原理可得

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -a \frac{\partial \sigma'_z}{\partial t} = a \frac{\partial u}{\partial t} \quad . \quad (5)$$

式中  $a$  表示土的压缩系数;  $\Delta\sigma'_z$  表示粒间有效应力;  $u$  表示孔隙水压力。

达西定律:  $q = k_x i = \frac{k_x}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial x}$  ,  $(6)$

将式(5)、(6)代入式(4)得

$$\frac{k_x (1+e_1)}{a \gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad , \quad (7)$$

令  $C_v = \frac{k_x (1+e_1)}{a \gamma_w}$ , 称土的固结系数( $m^2/a$ 或 $cm^2/a$ ),

得一维渗流固结微分方程:  $C_v \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad , \quad (8)$

心墙一维固结的初始条件和边界条件如下:

初始条件: 当  $t=0$  时,  $0 \leq x \leq l$ ,  $u=u_0=\varphi(x)$  ,  $(9)$

$$\text{边界条件: } \begin{cases} 0 < t \leq \infty, x = 0, u = 0 \\ 0 < t \leq \infty, x = l, u = 0 \\ t = \infty, 0 \leq z \leq H, u = 0 \end{cases}, \quad (10)$$

由分离变量法可求得该问题的解为

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-C_v \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 t} \sin\left(\frac{n\pi}{l}\right)x, \quad (11)$$

$$\text{式中, 叠加系数 } C_n = \frac{2}{l} \int_0^l \varphi(x) \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) dx. \quad (12)$$

对于心墙内的某一点  $A$ , 其初始孔隙水压为已知值  $p$ , 其叠加系数可由式(12)求得, 即

$$\int_0^l p \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) dx = C_n \cdot \frac{l}{2} \Rightarrow \begin{cases} C_n = \frac{4p}{n\pi} & n \text{ 为正奇数} \\ C_n = 0 & n \text{ 为正偶数} \end{cases}. \quad (13)$$

心墙内某一点处孔隙水压力消散问题的解答:

$$u = \frac{4}{\pi} p \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) e^{-n^2 \frac{\pi^2}{4} T_v}. \quad (14)$$

式中,  $n$  为正奇数,  $(1, 3, 5, \dots)$ ;  $T_v$  为时间因数, 无因次, 表示为  $T_v = \frac{4C_v t}{l^2}$ 。

反演渗透系数时所取的库水位稳定运行时段(2012年12月21日—2013年6月20日)距大坝建成(2012年12月21日)不久, 超静孔隙水压力水头消散较少, 反演心墙料渗透系数时, 心墙测点水头值暂时取为测点水头实测值的平均值减去心墙填筑完成时各测点的超静孔隙水压力水头; 由该次反演得到的心墙料水平渗透系数和已知的心墙料体积压缩系数试验值求得固结系数; 由式(14)求出测点超静孔隙水压力修正值; 再由修正的超静孔隙水压力水头修正心墙测点水头实测值, 再次进行渗透系数反演。经过反复修正超静孔隙水压力和反演渗透系数, 直至前后两次求得的超静孔隙水压力修正值的差值满足工程精度为止。将心墙填筑完成时三测点超静孔隙水压力水头列于表1。

表1 心墙填筑完成时心墙测点超静孔隙水压力水头

Table 1 Excess pore water pressure heads at measuring points distributed in core wall

心墙测点	43	35	27
超静孔隙水压力水头/m	49.39	91.91	115.32

## 2 坝体渗透系数反演

### 2.1 大坝渗透系数反演数学模型

设大坝最大横剖面共布置  $n$  个水头观测点, 有  $m$  个待反演的渗透系数, 测点水头实测值为  $H_i^*$ , 给定大坝各分区渗透系数的有限元模型计算值为  $H_i$ ,  $H_i^*$

与  $H_i$  具有相同的时间和空间坐标。以测点水头实测值  $H_i^*$  与计算值  $H_i$  之间的误差最小为目标函数, 以待反演渗透系数  $k_j$  的取值范围为约束条件, 建立大坝渗透系数反演模型<sup>[7]</sup>

$$\text{目标函数: } \min S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i (H_i - H_i^*)^2 \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (15)$$

$$\text{约束条件: } \underline{k}_j \leq k_j \leq \bar{k}_j \quad (j=1, 2, \dots, m). \quad (16)$$

式中  $w_i$  为测点权重, 各测点权重相等均为 1.0;  $k_j$  为待反演渗透系数,  $\underline{k}_j$ ,  $\bar{k}_j$  为  $k_j$  的上、下限。

### 2.2 饱和-非饱和渗流场计算的有限单元法

由质量守恒定律及达西定律推得渗流控制方程<sup>[8]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (17)$$

式中  $k_x$ ,  $k_y$  是  $x$ ,  $y$  方向的渗透系数;  $Q$  为施加的边界流量;  $m_w$  为体积水含量驻留曲线的斜率;  $\gamma_w$  为水的重度;  $H$  为测点的计算水头;  $t$  为时间。

由伽辽金加权余量法求得有限元渗流控制方程<sup>[8]</sup>

$$(\Delta t [K] + [M]) \{H_1\} = \Delta t \{Q_1\} + [M] \{H_0\}, \quad (18)$$

式中,  $\Delta t$  为时间增量,  $[K]$  为单元特征矩阵,  $[M]$  为单元质量矩阵,  $\{H_1\}$  为时间增量末尾水头值,  $\{Q_1\}$  为时间增量末尾节点流量,  $\{H_0\}$  为时间增量初水头值。

### 2.3 基于支持向量机的二维渗流响应面函数

近年来出现的支持向量机(support vector machine, SVM)像多层感知器网络和径向基函数网络一样, 可用于非线性回归。该方法具有严格的理论基础和数学基础, 不存在局部最小问题, 小样本也具有很强的泛化能力, 对样本数量的依赖性弱, 且能以任意精度逼近任意函数<sup>[9-10]</sup>。本文通过对一定取值范围内渗透系数组合方案进行渗流有限元计算, 获得渗透系数与测点水头相对应的数据样本, 再利用这些样本训练支持向量机, 从而建立渗流的支持向量机响应面函数用以代替渗流有限元计算。渗透系数与其计算水头之间的支持向量机模型为

$$\left. \begin{aligned} \text{SVM}(\bar{k}) : R^n \rightarrow R, \\ \bar{h} = \text{SVM}(\bar{k}), \\ \bar{k} = (k_1, k_2, \dots, k_m), \quad \bar{h} = (h_1, h_2, \dots, h_n). \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中  $\bar{k}$  为待反演的渗透系数向量;  $m$  为参数个数;  $\bar{h}$  为测点水头向量;  $n$  为观测点个数。

结合式(19)简述支持向量机的计算过程: 设有  $l$  个训练样本对  $\{\bar{k}_i, f(\bar{k}_i)\}$ , ( $i=1, 2, \dots, l$ ,  $l$  为样本个数;  $\bar{k}_i \in R^d$ ,  $f(\bar{k}_i) \in R$ ),  $\bar{k}_i$  为第  $i$  个渗透系数训练样本的输入向量,  $f(\bar{k}_i)$  为对应的由有限元计算得到的计算水头训练样本输出向量。支持向量机模型通过隐含层计

算支持向量  $\bar{k}_i$  和输入空间抽取的向量  $\bar{k}$  之间的内积核函数, 然后通过输出层的线性回归函数拟合数据  $\{\bar{k}_i, f(\bar{k}_i)\}$ , 从而实现渗透系数  $\bar{k}_i$  到测点水头  $f(\bar{k}_i)$  的非线性映射。本文中内积核函数采用径向基函数

$$k(\bar{k}_i, \bar{k}) = \exp\left(-\frac{|\bar{k}_i - \bar{k}|^2}{\sigma^2}\right), \quad (20)$$

式中,  $\sigma$  为径向基核参数。

## 2.4 基于粒子群算法的优化求解

研究表明<sup>[10]</sup>, SVM 的径向基函数的核参数  $\sigma$  和惩罚因子  $C$  对其拟合精度有较大影响, 通过试算来确定有很大的盲目性。因此, SVM 核参数  $\sigma$  和惩罚因子  $C$  的选取及渗透系数求解都是优化问题。传统优化方法存在求导困难及易陷入局部极优等问题, 本文引入编程简单、全局搜索能力强、收敛速度快的粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO)<sup>[11]</sup>。该算法中每个粒子都代表问题的一个潜在解, 每个粒子对应一个由适应度函数 (观测水头与计算水头的均方误差, 见式 (20)) 决定的适应度值, 粒子的速度决定粒子移动的方向和距离, 粒子随自身及其他粒子的移动经验进行动态调整以实现个体在可解空间中的寻优, 寻优流程如下图 4 所示。

$$\text{fit} = \frac{1}{n m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (h_{ij} - h_{ij}^*)^2 \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m). \quad (21)$$

式中  $h_{ij}$ ,  $h_{ij}^*$  各表示第  $i$  个测点、第  $j$  个样本的水头计算值与水头观测值;  $n$  为测点个数;  $m$  为样本个数。

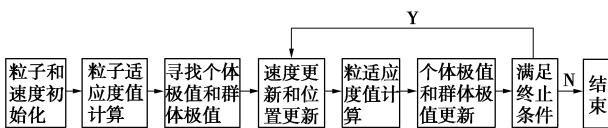


图 4 粒子群算法流程图

Fig. 4 Flow chart of particle swarm optimization algorithm

对初始粒子位置和粒子速度赋予随机值, 通过计算粒子的适应度值确定个体极值和群体极值; 根据式 (22) 与式 (23) 更新粒子位置和速度; 根据新种群中粒子适应度值更新个体极值与群体极值, 直至迭代收敛或达到最大迭代步数为止。

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{id}^k), \quad (22)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1}. \quad (23)$$

式中  $\omega$  为惯性权重;  $d=1, 2, \dots, D$ , ( $D$  表示搜索空间的维数);  $i=1, 2, \dots, N$  ( $N$  表示粒子个数);  $k$  为当前迭代次数;  $V_{id}$  为粒子的速度;  $c_1$  和  $c_2$  为加速度因子, 取  $c_1=c_2=2$ ;  $r_1$  和  $r_2$  是分布于  $[0, 1]$  之间的随机数。 $V_{id}^k$  和  $V_{id}^{k+1}$  分别为粒子的当前和更新后速度;  $X_{id}^k$  和  $X_{id}^{k+1}$

分别为粒子的当前和更新后的位置。

## 3 基于粒子群支持向量机的糯扎渡大坝渗透系数反演

糯扎渡心墙堆石坝渗流计算有限元模型见图 1, 其范围在坝基深度及下游方向各取约二分之一倍坝高, 上游方向由于上游围堰底宽较大取四分之一倍坝高, 模型的下边界及左右边界视为不透水边界。

(1) 以多维空间点集生成的数论方法为基础, 以点集的 CD2 偏差最小为准则, 选取最优的点集生成向量, 实现多维空间的最佳一致选点<sup>[12]</sup>。采用 MATLAB 编制数论选点程序<sup>[12]</sup>, 产生  $50$  组  $(0, 1)$  范围内数据, 将部分归一化数据列于表 2。根据待反演参数的取值范围, 见下表 3 所示, 由反归一化公式 (24), 便可求得  $50$  组渗透系数样本。

表 2 部分归一化渗透系数列表

Table 2 Partial normalized permeability coefficients

样本	心墙 (x 方向)	心墙 (y 方向)	反滤料 I	粗堆石 II
1	0.979	0.654	0.915	0.811
2	0.957	0.322	0.830	0.622
3	0.936	0.102	0.746	0.433
4	0.915	0.615	0.661	0.244
5	0.893	0.304	0.576	0.054
6	0.872	0.169	0.491	0.865
7	0.851	0.575	0.406	0.676
8	0.829	0.285	0.322	0.487
...	...	...	...	...
49	0.104	0.016	0.438	0.058
50	0.084	0.060	0.353	0.869

表 3 大坝各分区渗透系数

Table 3 Permeability coefficients of Nuozhadu dam

材料分区	渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )
心墙(x 方向)	$1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-5}$
心墙(y 方向)	$1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-5}$
反滤料 I	$5 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-2}$
粗堆石料 II	$5 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-2}$
反滤料 II	0.2
细堆石料	0.2
粗堆石料 I	1
上下游围堰	1
弱风化岩体	$5 \times 10^{-5}$
帷幕灌浆	$5 \times 10^{-6}$
微新岩体	$1 \times 10^{-5}$

反归一化公式:

$$k = k_{\min} + (k_{\max} - k_{\min})x, \quad (24)$$

式中,  $k_{\max}$ ,  $k_{\min}$  表示  $k$  的最大值、最小值。 $x$  为对应在  $(0, 1)$  区间的值。

(2) 以库水位稳定时段的平均库水位 (上游 774.02 m, 下游 601.42 m) 为水头边界条件, 求得每组渗透系数条件下的测点水头计算值, 以测点水头计

算值为输出向量,与之对应的渗透系数为输入向量,建立50组样本。

(3)对糯扎渡大坝稳定渗流期的水头观测平均值进行初步修正(见表4),运用粒子群支持向量机模型反演渗透系数。按照前述超静孔隙水压力的修正方法经过两次修正便得到满足要求的超静孔隙水压力修正值。由修正的水头实测值反演渗透系数,粒子适应度值迭代过程见图5所示,渗透系数反演结果见表5。

表4 库水位稳定时段测点水头实测值

Table 4 Average hydraulic heads under steady seepage condition

测点编号 (DB-C-P-)	超静孔隙 水压力水头/m	实测水头 平均值/m	修正 水头/m
27	115.32	763.35	648.03
35	91.91	783.97	692.06
43	45.39	777.49	732.10
24	—	772.91	772.91
33	—	773.12	773.12
21	—	773.80	773.80
40	—	773.39	773.39

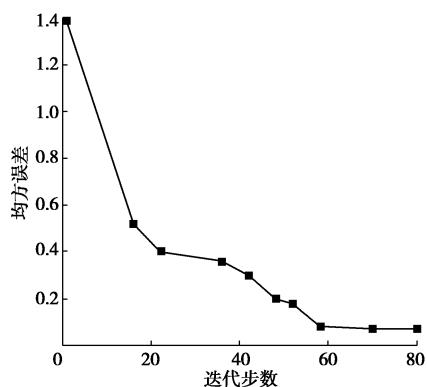


图5 最优个体适应度值随迭代收敛过程

Fig. 5 Converging of best particle fitness value with iteration

表5 渗透系数反演值

Table 5 Back analysis results of permeability coefficients

坝体 分区	心墙(水 平方向)	心墙(竖 直方向)	反滤 料 I	粗堆石 料 II
$k$ 预测值 $/(m \cdot d^{-1})$	$2.04 \times 10^{-3}$	$3.94 \times 10^{-4}$	$1.68 \times 10^{-2}$	$3.85 \times 10^{-2}$

(4)以稳定渗流期的稳定渗流场为初始渗流场,计算大坝在库水位上升时段(2013年7月10日—2013年10月8日)的非稳定渗流场。除围堰、防渗帷幕与坝基一直处于水下不考虑非饱和特性外,其他坝体材料均需要考虑非饱和特性。材料的土水特性曲线由饱和体积含水率(孔隙比)与样条函数估计,渗透系数曲线由饱和渗透系数、土水特性曲线与Fredlund-xing

模型估计<sup>[13-14]</sup>。各分区材料的孔隙比见下表6所示,各分区材料的土水特性曲线及渗透系数曲线见图6、7。

(5)由反演得到的心墙渗透系数求得固结系数,并进一步求得水位上升期两个时刻(2013年7月20日与2013年8月9日)心墙测点超静孔隙水压力修正值及水头实测值的修正值。将非稳定渗流有限元计算值与修正后的水头实测值进行比较。稳态与非稳态渗流3种工况下测点水头计算值与实测值对比图、绝对误差柱状图及相对误差柱状图如图8~10所示。由图可知,3种工况下,7个测点的水头计算值与实测值的绝对误差最大值为3.05 m,相对误差最大值为3.36%,水头计算值与实测值在总体上较好地反映了坝体稳态渗流场和非稳态渗流场的分布规律,且计算值与实测值吻合较好,说明反演所得的渗透系数是合理的。

表6 糯扎渡大坝饱和-非饱和非稳定渗流参数

Table 6 Unsteady saturated-unsaturated seepage parameters of Nuozhadu dam

坝体 分区	心 墙	反滤 料 I	反滤 料 II	细堆 石	粗堆 石 I	粗堆 石 II
孔隙比	0.33	0.37	0.41	0.32	0.28	0.25

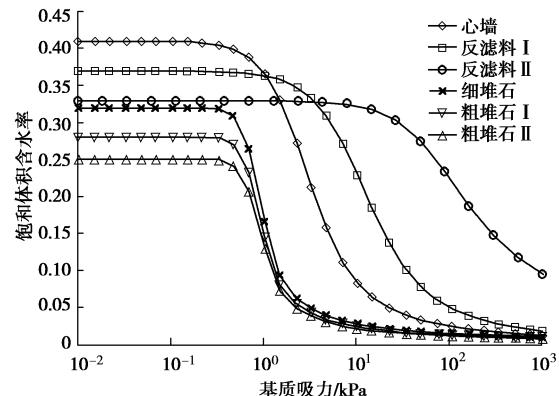


图6 土水特性曲线

Fig. 6 Soil-water characteristic curves

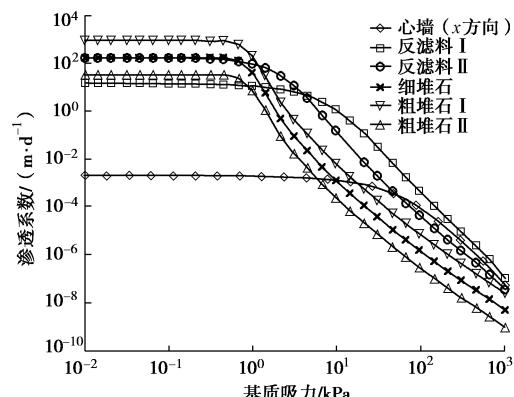


图7 渗透系数曲线

Fig. 7 Permeability coefficient curves

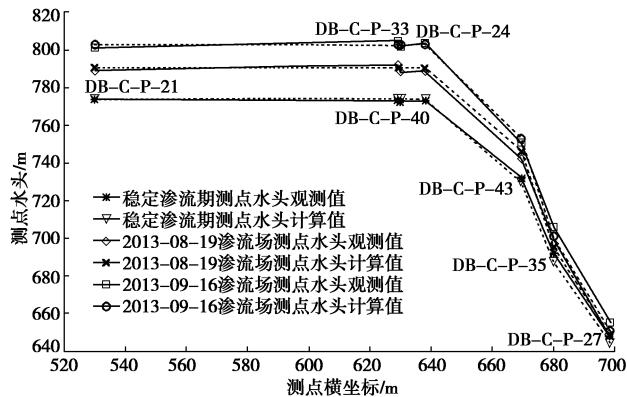


图 8 测点水头计算值与观测值对比图

Fig. 8 Comparison between measured and simulated water heads

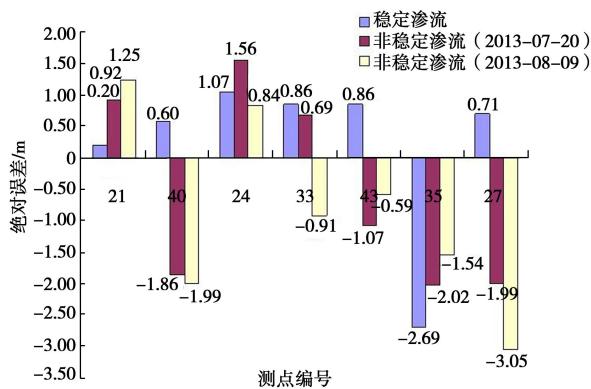


图 9 测点水头计算值与观测值绝对误差柱状图

Fig. 9 Histogram of absolute error of measured and simulated water heads

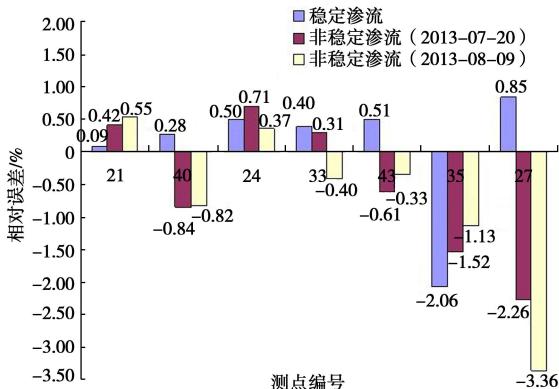


图 10 测点水头计算值与观测值相对误差柱状图

Fig. 10 Histogram of relative error of measured and simulated water heads

## 4 结 论

本文采用粒子群算法优化的径向基神经网络反演糯扎渡大坝的渗透系数, 得到如下结论:

(1) 糯扎渡大坝心墙饱和度较高(93%~97%), 可近似视为处于饱和状态, 在自重作用下心墙内超静

孔隙水向上下游两侧渗透系数较大的反滤料排出的现象可简化为一维固结问题。本文推求了心墙内测点孔隙水压力消散计算的解析解, 并应用于测点水头观测值的修正, 结果表明该处理方法是合理的。

(2) 将粒子群算法与支持向量机相结合, 借助支持向量机高度非线性映射能力, 建立了渗透系数与水头之间的映射关系; 以识别水头误差为目标函数, 通过粒子群优化算法反馈搜索坝体各分区的渗透系数。该方法编程简单, 计算耗时短, 能够寻得全局最优解。

(3) 将大坝心墙填筑完成时的超静孔隙水压力水头视为初始值修正静态渗流下心墙测点水头实测值进行渗透系数反演, 由反演得到的渗透系数重新求消散后的超静孔隙水压力, 经反复迭代求得最终的渗透系数; 计算非静态渗流计算时刻的超静孔隙水压力水头, 用于修正心墙测点水头实测值, 与水头有限元计算值拟合较好, 说明反演的渗透系数是合理的。

## 参考文献:

- [1] 汝乃华, 牛运光. 大坝事故与安全·土石坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. (RU Nai-hua, NIU Yun-guang. Accidents and safety of dam·earth-rock dam[M]. Beijing: China Waterpower Press, 2001. (in Chinese))
- [2] MIDDLEBROOKS T A. Earth-dam practice in United States[J]. Transaction of the American Society of Civil Engineers, 1953(118): 697~722.
- [3] U.S. Department of the Interior Teton Dam Failure Review Group. U S, Failure of teton dam: a report of findings[R]. Washington D C: U S Department of the Interior Teton Dam Failure Review Group, 1977.
- [4] 解家毕, 孙东亚. 全国水库溃坝统计及溃坝原因分析[J]. 水利水电科技, 2009, 40(12): 124~128. (XIE Jia-bi, SUN Dong-ya. Statistic of dam failures in China and analysis on failure causations[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(12): 124~128. (in Chinese))
- [5] 张宗亮. 糯扎渡水电站工程特点及关键技术研究[J]. 水利发电学报, 2005, 31(5): 4~7. (ZHANG Zong-liang. The project characteristics of Nuozhadu hydropower station and its key technology research results[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 31(5): 4~7. (in Chinese))
- [6] 吴中如, 顾冲时. 大坝原型反分析及其应用[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2000. (WU Zhong-ru, GU Shi-chong. The prototype back analysis and application of dam[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 2000. (in Chinese))

- [7] 姜谙男, 梁冰. 基于粒子群支持向量机的三维含水层渗流参数反馈识别[J]. 岩土力学, 2009, **30**(5): 1527 - 1531.  
(JIANG An-nan, LIANG Bing. Feedback identifying seepage parameters of 3D aquifer based on particle swarm optimization and support vector machine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(5): 1527 - 1531. (in Chinese))
- [8] KRAHN John. Seepage modeling with SEEP/W[M]. Calgary: Geo-Slope International Ltd, 2001.
- [9] VAPNIK V. The nature of statistical learning theory[M]. New York: Springer-Verlag, 1995: 36 - 43.
- [10] 赵洪波, 冯夏庭. 位移反分析的进化支持向量机研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(10): 1618 - 1622. (ZHAO Hong-bo, FENG Xia-ting. Study on genetic- support vector machine in displacement back analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(10): 1618 - 1622. (in Chinese))
- [11] 宋志宇, 李俊杰. 基于微粒群算法的大坝材料参数反分析
- [12] 华罗庚, 王元. 数论在近似分析中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1978. (HUA Luo-geng, WANG Yuan. The application of Number-theoretic method in approximate analysis[M]. Beijing: Science Press, 1978. (in Chinese))
- [13] FREDLUND D G, RAHARD JO H. Saturated soil mechanics[M]. CHEN Zhong-yi, trans. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [14] FREDLUND D G, XING Anqing, HUANG Shangyan, Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**: 533 - 546.

### 第三届地基处理和地基控制技术国际会议预告

**会议背景:** 地基处理和地基控制技术是目前岩土工程学科的重要研究领域, 我国长三角广泛分布的软基工程以及滨海地区大规模的围海造地工程为地基处理和控制的理论和技术研究提供了广阔的舞台, 同时也促进着我国在相关研究和应用领域赶超世界领先水平。本次会议旨在为了进一步加强各国在该领域的学术交流与合作, 促进地基处理和控制技术的理论研究和工程应用, 有效提升我国在地基处理领域中的学术地位及国际影响力。

**主办单位:** 浙江工业大学。

**时间、会场:** 2017年10月27—10月29日; 地点: 杭州之江饭店。

**参会代表:** 会议主席 Cai Yuanqiang, Zhejiang University of Technology, China; 国际评委委员会主席 Buddhima Indraratna, University of Wollongong, Australia; 本地组织委员会主席 Gong Xiaonan, Zhejiang University, China。

本次会议境外参会代表多、来自全球各个地区, 扩大了我校的国际影响力。会议详细信息参见: [www.icgi2017.org](http://www.icgi2017.org)。

(会议组委会 供稿)