

# RCC坝力学参数反演不唯一性概率统计 分析方法探讨

肖磊,黄耀英,万智勇

(三峡大学水利与环境学院,湖北宜昌 443002)

**摘要:**由于室内试验确定的混凝土坝力学参数与实际参数存在较大差异,目前混凝土坝工程上常基于实测变形采用优化算法或仿生算法反演获得混凝土坝力学参数,然而多参数反演不唯一性问题尚未解决。针对反分析不唯一性问题,考虑到大坝混凝土弹性模量和强度之间密切相关,基于大坝混凝土强度标准值的定义方法,建议基于实测变形进行多次力学参数反演,然后对反演结果进行概率统计分析获得概率分布函数,依据80%保证率确定反演参数。结合高寒地区某碾压混凝土(RCC)坝实测变形,验证了本文提出的反演参数不唯一性概率统计分析方法。分析表明该方法可以获得相对稳定的坝体及坝基力学参数反演值,可为高寒地区碾压混凝土坝安全性评估提供参考。

**关键词:**参数反演;不唯一性;概率统计分析;强度标准值;碾压混凝土坝

**中图分类号:**TV 642

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-5485(2019)07-0041-07

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## A Probability Statistical Analysis Method for Nonuniqueness of Mechanical Parameters Inversion of Roller Compacted Concrete Dam

XIAO Lei, HUANG Yao-ying, WAN Zhi-yong

(College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** As the mechanical parameters of concrete dam obtained by indoor test deviates largely from measured values, back analysis of parameters using optimization or bionic algorithm based on measured deformation is adopted in practical engineering. To address the nonuniqueness of parameter inversion, we propose to obtain the probability distribution function of multiple back analysis results based on measured deformation via probability statistical approach, and then determine the inversion parameters according to 80% guarantee rate. The proposed method is verified by the measured deformation values of a roller compacted concrete (RCC) dam in high and cold region. The method provides stable mechanical parameters of dam body and dam foundation, and offers a reference for the safety assessment of RCC dam in high and cold region.

**Key words:** back analysis of parameters; nonuniqueness; probability statistical analysis; strength standard value; RCC dam

### 1 研究背景

高寒地区修建的碾压混凝土(RCC)坝所处环境条件恶劣、年内和年际温度变化明显,导致大坝运

行期工作性态复杂。而在室内开展混凝土力学试验时,试件尺寸效应、湿筛、标准养护和“点参数”等因素,导致大坝混凝土实际力学参数与室内试验参数存在较大差异。为了获得大坝当前真实的物理力学参数,目前基于原型观测资料对坝体及坝基物理力

收稿日期:2017-12-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51779130);三峡大学学位论文培优基金项目(2018SSPY003)

作者简介:肖磊(1993-),男,湖北荆州人,硕士研究生,主要从事大坝安全监控方面的研究。E-mail:442342536@qq.com

通信作者:黄耀英(1977-),男,湖南郴州人,教授,博士,主要从事水工结构安全监控及数值计算方面的教学与研究。E-mail:huangyaoying@sohu.com

学参数进行反演分析已在混凝土坝工程上得到广泛应用。向衍等<sup>[1]</sup>根据监测资料,提出基于 MSC.Marc 平台的遗传算法,反演得到大坝坝体弹性模量和坝基变形模量;康飞等<sup>[2]</sup>提出了一种用于材料参数反演分析的混合单纯形人工蜂群算法;Gu 等<sup>[3]</sup>将均匀设计法、偏最小二乘回归及最小二乘支持向量机引入碾压混凝土坝多组参数反演中;雷鹏等<sup>[4]</sup>针对混凝土大坝坝体和岩基参数的区间不确定性,构造具有区间分析功能的 RNN(粗糙神经网络)模型,并运用该模型反演坝体和岩基区间参数;牛景太<sup>[5]</sup>将混沌遗传算法应用于碾压混凝土坝横观各向同性参数和渐变参数反演;Wang 等<sup>[6]</sup>提出了一种基于大坝地震响应的参数反演分析方法;Su 等<sup>[7]</sup>提出基于参数灵敏度的最优选择方法,并以某混凝土坝的坝体及坝基物理力学参数反演为例,验证了该方法的准确性和高效性;曹明杰等<sup>[8]</sup>将量子遗传算法引入碾压混凝土坝综合力学参数反演中;冯帆等<sup>[9]</sup>提出了以基于施工期大坝和基础监测的垂向压缩变形来反演施工期真实力学参数。

研究表明,当采用传统优化算法进行多参数反演时,反演结果依赖于初值的选取,优化结果容易陷入局部极值等。虽然人工神经网络、遗传算法等仿生算法引入反分析领域后,对推动反演分析的发展起到积极的作用,但是基于仿生算法反演的结果仍然存在容易早熟、计算量大和收敛慢等缺点。而且无论是传统优化算法还是仿生算法,均没有从理论上解决多参数反演不唯一性的问题。

《水工混凝土试验规程》(SL352—2006, DL/T5150—2001)在测定混凝土轴向抗拉强度时,同时测定抗拉弹性模量,以及在测定混凝土圆柱体抗压强度时测定抗压弹性模量。而在水电工程中,大体积混凝土的强度标准值定义为:按照标准方法制作、养护的边长为 15 cm 立方体试件,在设计龄期用标准试验方法测得的具有 80% 保证率的抗压强度;对于常态混凝土坝,设计龄期一般采用 90 d;对于碾压混凝土坝,设计龄期一般采用 180 d。考虑到大体积混凝土强度参数和弹性模量密切相关,而采用 80% 保证率的抗压强度作为标准值,其中一个原因在于不同试件测得的抗压强度存在一定的离散性,这与反分析参数不唯一有一定相似性。为了较好地解决反分析不唯一性问题,本文根据类比大体积混凝土强度标准值的定义,采用概率统计的方法对反演不唯一性数值解进行分析,并以高寒地区某碾压混凝土重力坝为例,将碾压混凝土作为横观各向同性材料考虑,采用工程类比法,引入包含周期项与滞后项

的冻胀分量<sup>[10-11]</sup>,建立考虑冻胀变形的统计模型,分离出大坝真实的水压分量相对值;然后基于均匀设计<sup>[12]</sup>、神经网络及有限元法对坝体及坝基物理力学参数进行多次反演;最后对反演值进行概率统计分析,依据 80% 保证率确定坝体和坝基反演值,获得相对稳定的反演值。

## 2 高寒地区碾压混凝土坝正分析基本原理

高寒地区碾压混凝土坝正分析主要包括 2 方面:①碾压混凝土本构模型,即考虑碾压混凝土坝的施工特点,假设碾压混凝土为横观同性材料,按照横观各向同性本构进行有限元计算;②基于大坝实测变形分离出真实水压分量,即针对高寒地区大坝实测变形受冻胀因子的影响,首先建立考虑冻胀因子的变形统计模型,然后分离获得大坝真实水压分量。以下对这 2 方面主要内容的基本原理进行介绍。

### 2.1 碾压混凝土横观各向同性本构

工程实践表明,碾压混凝土坝结构复杂,其计算参数和计算模型难以确定,以致坝工设计难以与工程实际相吻合。据已有研究成果,碾压混凝土本构关系包括等效横观各向同性本构、内时损伤本构、正交各向异性本构、基于神经网络的剪切本构关系等<sup>[13]</sup>。对于碾压混凝土坝,典型的成层结构体系特点导致大坝结构性态分析不能简单套用常态混凝土坝的计算理论与方法。因此,本文为便于计算,将碾压混凝土等效为横观各向同性材料,建立空间直角坐标系,使坐标面  $xOy$  与横观各向同性体的各向同性面重合,  $z$  轴垂直于层面。由文献[14]推导,碾压混凝土满足的应力-应变关系如式(1)所示,设  $\sigma = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{zx}]^T$ ,  $\varepsilon = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx}]^T$ , 其中:  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  分别为  $x, y, z$  方向的正应力;  $\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}$  分别为  $xOy$  面、 $yOz$  面、 $zOx$  面的剪应力;  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$  分别为正应力和剪应力对应的应变。

$$\sigma = D\varepsilon \quad (1)$$

式中弹性矩阵为  $D = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & S \end{bmatrix}$ , 其中:

$$R = \begin{bmatrix} \lambda n(1 - n\mu_2^2) & \lambda n(\mu_1 + n\mu_2^2) & \lambda n\mu_2(1 + \mu_1) \\ \lambda n(\mu_1 + n\mu_2^2) & \lambda n(1 - n\mu_2^2) & \lambda n\mu_2(1 + \mu_1) \\ \lambda n\mu_2(1 + \mu_1) & \lambda n\mu_2(1 + \mu_1) & \lambda(1 - \mu_1^2) \end{bmatrix},$$

$$S = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{2(1 + \mu_1)} & 0 & 0 \\ 0 & G_2 & 0 \\ 0 & 0 & G_2 \end{bmatrix},$$

$$\lambda = \frac{E_2}{(1 + \mu_1)(1 - \mu_1 - 2n\mu_2^2)}, \quad n = \frac{E_1}{E_2},$$

$$G_1 = \frac{E_1}{2(1 + \mu_1)}。$$

式中:  $E_1$  为横观各向同性面( $xOy$  平面)内的弹性模量;  $E_2$  为垂直横观各向同性面方向( $Oz$  轴方向)的弹性模量;  $\mu_1$  为横观各向同性面内的泊松比;  $\mu_2$  为垂直横观各向同性面方向的泊松比;  $G_1$  为横观各向同性面内的剪切模量,不是独立的弹性常数;  $G_2$  为垂直横观各向同性面方向的剪切模量。

## 2.2 考虑冻胀的变形统计模型

在长效服役期间,普通环境条件下的大坝变形主要受到水压、温度、时效的影响<sup>[15]</sup>;而当处于高寒恶劣环境条件下,且坝顶位置不设保温措施时,坝顶测点附近易受温度场周期性冻胀影响。从数学角度出发,借鉴丰满大坝(老坝)工程实例,在传统统计模型基础上引入包含周期项与滞后项的冻胀分量表达式<sup>[10-11]</sup>;同时为体现冻胀变形的影响,建立适应冻胀变形的统计模型,将冻胀因子考虑在模型内,对冻胀变形数据系列采用基于 Heaviside 阶跃函数的自适应模型,即得到高寒地区混凝土坝变形统计模型统一表达式为

$$\delta = \delta_H + \delta_T + \delta_\theta + H(\lambda_0 - \lambda)\delta_D。 \quad (2)$$

式中:  $\delta_H$  为水压变形分量;  $\delta_T$ ,  $\delta_\theta$  分别为温度变形分量、时效变形分量;  $\delta_D$  为高寒地区需考虑的冻胀分量,包括周期项  $\delta_{D1}$  和滞后项  $\delta_{D2}$ , 即  $\delta_D = \delta_{D1} + \delta_{D2}$ 。

Heaviside 函数表达式为

$$H(\lambda_0 - \lambda) = \begin{cases} 0, & \lambda > \lambda_0 \text{ (不考虑冻胀因子)}; \\ 1, & \lambda < \lambda_0 \text{ (考虑冻胀因子)}. \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\lambda_0$  为混凝土内基准温度,  $\lambda_0 = 0^\circ\text{C}$ ;  $\lambda$  为温度。该函数“微分”是狄拉克  $\delta$  函数,考虑在  $\lambda = \lambda_0$  处有跳跃趋势,所以  $H(\lambda_0 - \lambda)$  称为阶跃函数。

周期项描述了大坝冻胀变形的复杂过程,非冻胀阶段周期项按最小值计算;滞后项反映了较长时段平均气温变化的影响,可以描述气温滞后引起的冻胀变形。各分量表达式为:

$$\delta_H = \sum_{i=0}^m a_i (H^i - H_0^i) ; \quad (4)$$

$$\delta_T = \sum_{i=1}^{m_1} \left[ b_{1i} \left( \sin \frac{2\pi i t}{365} - \sin \frac{2\pi i t_0}{365} \right) + b_{2i} \left( \cos \frac{2\pi i t}{365} - \cos \frac{2\pi i t_0}{365} \right) \right] ; \quad (5)$$

$$\delta_\theta = c_1(\ln \theta - \ln \theta_0) + c_2(e^{-0.1\theta} - e^{-0.1\theta_0}) + c_3(e^{-0.01\theta} - e^{-0.01\theta_0}) ; \quad (6)$$

$$\delta_{D1} = \sum_{i=2,4,8,\dots}^m \{d_{i1} I \sin[2\pi i(x - x_0)/365] + d_{i2} I \cos[2\pi i(x - x_0)/365]\} ; \quad (7)$$

$$\delta_{D2} = d_1 I_{20-10} + d_2 I_{20-20} + d_3 I_{20-30} + d_4 I_{30-10} + d_5 I_{30-20} + d_6 I_{30-30}。 \quad (8)$$

式中:  $a_i$  为水压分量回归系数;重力坝  $m=3$ ,拱坝  $m=4$ ;  $H$  为监测日水深;  $H_0$  为起测日水深;  $b_{1i}$ ,  $b_{2i}$  为温度分量回归系数;  $m_1$  为年周期、半年周期,  $m_1 = 1 \sim 2$ ;  $t$  为起测日至监测日的累积天数;  $t_0$  为起测日至所计算时段起始日的天数;  $c_1, c_2, c_3$  为时效分量回归系数;  $\theta$  为从起测日开始的天数折算 1%;  $\theta_0$  为从初始开始到起测日的累积天数折算 1%;  $d_{i1}$ ,  $d_{i2}$  为冻胀分量中的周期项回归系数;  $I$  为冻胀因子,以区别同一模型中的周期函数;  $x$  为时间长度;  $x_0$  为同年监测序列分析的起始日到开始有负温的时日天数;  $d_1, \dots, d_6$  为冻胀分量中的滞后项回归系数;  $I_{i-j}$  为气温滞后作用因子,其中  $i$  表示气温滞后时段,  $j$  表示滞后时段前按平均气温计算时的天数,一般以周、旬、月为单位,选取滞后天数要根据坝内实测温度与滞后气温进行试算,该因子计算结果为正值时按零等效。

## 3 参数优化反演步骤

针对优化反分析不唯一性问题,本文基于大体积混凝土强度标准值的定义方法,考虑到大坝混凝土弹性模量和强度之间密切相关,基于不同工况下的实测变形进行多次物理力学参数反演分析,然后对反演结果进行数理统计 K-S 检验,确定反演参数的概率分布函数,进而依据 80% 保证率确定反演参数。

在进行每次物理力学参数反演分析时,本文将均匀设计、BP 神经网络与有限元法应用于 RCC 重力坝及坝基物理力学参数反演,步骤如下。

Step1: 结合已有类似工程及该工程试验资料,确定待反演物理力学参数变化区间,然后采用均匀设计法在待反演物理力学参数  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  的可能空间中构造参数取值组合,形成待反演参数若干取值集合。

Step2: 建立碾压混凝土坝三维准有限元模型,选定相应的计算工况,将设计的待反演参数样本值输入到有限元模型中计算,得到相应的水压分量计算值。

Step3:将已知参数样本值与相应的水压分量计算相对值作为神经网络训练样本组,即将有限元计算的水压分量相对值作为输入,而将均匀设计得到的物理力学参数作为输出。

Step4:将大坝关键监测点统计模型分离的实测水压分量相对值输入到已训练好的神经网络模型,即自动得到相应的物理力学参数值。

Step5:将步骤 Step4 中的物理力学参数输入到有限元模型进行正分析计算,若计算值与实测值误差较小,则认为该力学参数为所求;若不满足,继续重复 Step2—Step4,直至满足要求为止。

据此,可以得到基于均匀设计、BP 神经网络及有限元法的大坝及坝基物理力学参数反演技术路线,见图 1。

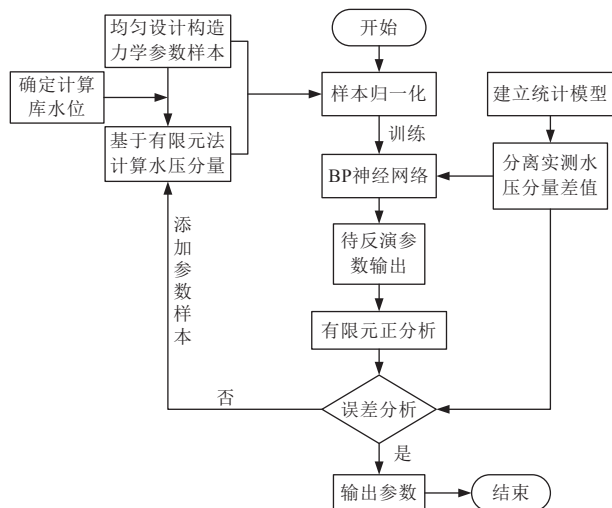


图 1 物理力学参数反演技术路线

Fig.1 Technical route for inversion of physical-mechanical parameters

## 4 实例分析

### 4.1 工程概况及监测布置

#### 4.1.1 工程概况

某水利枢纽工程位于西北高寒地区,是一项大型水利枢纽工程。枢纽水库总库容 24.19 亿  $\text{m}^3$ , 水库正常蓄水位 739.00 m, 死水位 680.00 m。枢纽主坝采用全断面碾压混凝土重力坝, 坝长 1 489 m, 主坝最大坝高 121.50 m, 坝顶高程 745.50 m。水利枢纽规模为 I 等大(1)型工程, 该枢纽坝址处多年平均气温 2.7  $^{\circ}\text{C}$ , 历史上曾观测到极端最低气温达到 -49.8  $^{\circ}\text{C}$ , 极端最高气温达到 40.1  $^{\circ}\text{C}$ , 环境条件极为恶劣。

#### 4.1.2 监测点布置

选取典型挡水坝段作为分析坝段, 该坝段共布置 3 个正垂线监测点, 所在地基深处布置一个倒垂线锚

固点。即测点 PL5-1 布置在高程 675.10 m 处, 测点 PL5-2 布置在高程 706.50 m 处, 坝顶测点 PL5-3 布置在 742.70 m 处, 坝基测点 IP5 布置在高程 586.30 m 处。典型坝段垂线布置见图 2。其中监测点编号下方的数字表示正倒垂线的长度, 单位为 m。

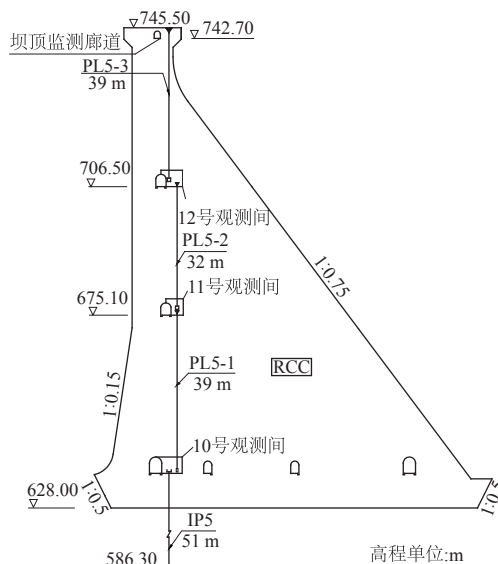


图 2 典型坝段垂线布置

Fig.2 Vertical line of a typical dam section

### 4.2 考虑冻胀因子的变形统计模型建立

高寒地区建设的混凝土坝所处环境较为恶劣。如丰满大坝(老坝)的监测资料分析表明<sup>[14]</sup>, 大坝所处环境温度年均值为 6.38  $^{\circ}\text{C}$ , 最高温度为 31.5  $^{\circ}\text{C}$ , 最低温度为 -29.5  $^{\circ}\text{C}$ 。对比丰满大坝(老坝)坝址处环境条件可知, 本工程所在地区环境条件较丰满大坝坝址环境条件恶劣。依据大坝监测资料和温度场仿真计算, 坝顶附近出现负温, 最低温度达到 -17.8  $^{\circ}\text{C}$ , 则坝顶位移会受到周期性冻胀的影响; 而 PL5-1, PL5-2, IP5 测点附近年周期温度为正温。为此, 建立统计模型时, PL5-3 测点考虑冻胀变形的影响, 其他测点不考虑冻胀变形的影响。各测点统计模型计算系数见表 1, 由各测点建立的统计模型分离出各分量(相对于起测日), 见图 3。其中, PL5-3 测点的冻胀分量回归系数为:  $d_{21} = -6.23 \times 10^{-1}$ ,  $d_{22} = 0.00$ ,  $d_{41} = -9.12 \times 10^{-2}$ ,  $d_{42} = -1.26 \times 10^{-1}$ ,  $d_{81}, d_{82}, \dots = 0.00$ ;  $d_1 = d_2 = d_3 = d_5 = 0.00$ ,  $d_4 = -4.32 \times 10^{-2}$ ,  $d_6 = -2.32 \times 10^{-2}$ 。

由图 3 可见: 低温季节坝顶测点存在冻胀位移, 非低温季节基本上呈现为一条直线段, 无冻胀位移。非坝顶测点各位移分量呈现一般的变化规律。由表 1 可知, 典型坝段各测点建立的统计模型复相关系数达到 0.95 以上, 拟合效果很好, 说明所建立的位移变形统计模型精度总体较高, 基本上能拟合出大坝实际测值的变化规律, 满足分析要求。

表 1 各监测点模型计算系数  
Table 1 Values of model coefficients of monitoring points

测点编号	回归系数							
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$b_{11}$	$b_{21}$	$b_{12}$	$b_{22}$
PL5-1	1.42	$1.72 \times 10^{-1}$	$2.24 \times 10^{-3}$	$-2.39 \times 10^{-4}$	$8.24 \times 10^{-2}$	$-1.18 \times 10^{-1}$	$-6.34 \times 10^{-2}$	$-1.17 \times 10^{-1}$
PL5-2	2.60	$3.17 \times 10^{-1}$	$2.57 \times 10^{-3}$	$-3.63 \times 10^{-4}$	$3.14 \times 10^{-1}$	$-3.18 \times 10^{-1}$	0.00	$-1.06 \times 10^{-1}$
PL5-3	$-6.43 \times 10^{-3}$	$2.96 \times 10^{-1}$	$-3.16 \times 10^{-2}$	$1.04 \times 10^{-3}$	$-6.72 \times 10^{-1}$	$-7.38 \times 10^{-1}$	0.00	0.00
IP5	$3.68 \times 10^{-1}$	$3.20 \times 10^{-2}$	$1.07 \times 10^{-3}$	$-5.78 \times 10^{-5}$	$4.58 \times 10^{-2}$	$-3.91 \times 10^{-2}$	$7.90 \times 10^{-3}$	0.00

测点编号	回归系数			复相关系数 $R$	剩余标准差 $S$	显著性水平 $F$
	$c_1$	$c_2$	$c_3$			
PL5-1	1.51	5.28	4.03	$9.60 \times 10^{-1}$	$6.40 \times 10^{-1}$	$2.01 \times 10^3$
PL5-2	2.27	9.59	4.89	$9.79 \times 10^{-1}$	$8.11 \times 10^{-1}$	$3.89 \times 10^3$
PL5-3	$1.60 \times 10^{-1}$	$-3.97 \times 10^{-1}$	$7.81 \times 10^{-1}$	$9.74 \times 10^{-1}$	0.31	$1.53 \times 10^3$
IP5	$5.08 \times 10^{-1}$	1.90	1.11	$9.92 \times 10^{-1}$	$7.47 \times 10^{-2}$	$1.21 \times 10^4$

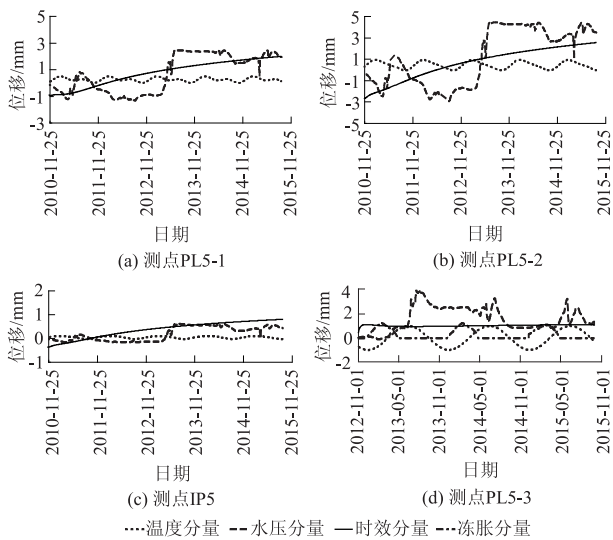


图 3 典型坝段各测点位移分量  
Fig.3 Curves of displacement components of monitoring points

4.3 碾压混凝土横观各向同性参数反演

4.3.1 有限元模型建立

模型计算范围:向上下游及地基深度方向取 2 倍坝高,坐标系  $x$  向为顺河向,上游指向下游为正向; $y$  向为垂直向,铅直向上为正; $z$  向为横河向,由右岸指向左岸为正。计算域上下游施加顺河向连杆约束,左右岸施加横河向连杆约束,底部施加完全位移约束。采用六面体八节点等参单元及少量的退化四面体单元进行网格剖分,网格剖分时尽量将测点布置在节点上。有限元模型单元数共 13 620 个,节点数 17 274,其中大坝 10 540 个单元,典型挡水坝段有限元模型如图 4。

4.3.2 参数上下限确定

假设碾压混凝土为横观各向同性材料,坝基为各向同性材料。考虑到碾压混凝土坝横观各向同性体 5 个独立参数中泊松比对坝体位移影响较小,故坝体与坝基泊松比不参与反演。实践表明,坝体横

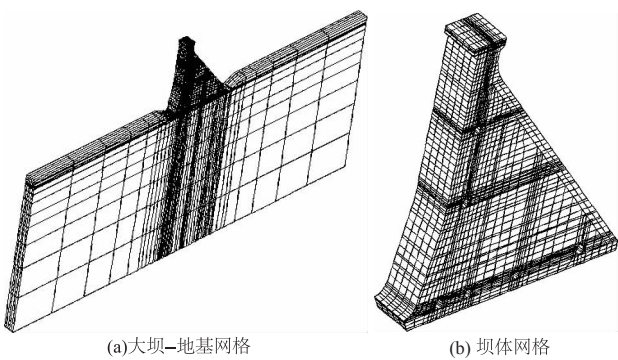


图 4 典型挡水坝段有限元模型  
Fig.4 Finite element model of typical dam section

向弹性模量与竖向弹性模量比值为 1 : 2 左右,结合地质情况及碾压混凝土试验资料,选定坝体横向综合弹性模量取值范围为 20 ~ 65 GPa,横向综合弹性模量与竖向综合弹性模量比值为 1 : 2,竖向综合剪切模量取值范围为 10 ~ 28 GPa,坝基综合变形模量  $E_r$  为 20 ~ 50 GPa,坝基泊松比取 0.30,横向泊松比取 0.168,竖向泊松比取 0.18。

4.3.3 计算工况选取

针对反演分析存在不唯一性的问题,结合典型坝段实测资料,选取不同时段相应的上下游水位,共 8 种不同计算工况,如表 2 所示,每种工况下选取前后 2 个不同时刻上下游水位,进行多次参数反演得到多组反演参数值。每一种工况下的实测值均为前后 2 个不同时刻的相对位移值,即  $\delta_1 = \Delta u'_1 - \Delta u_1, \delta_2 = \Delta u'_2 - \Delta u_2, \delta_3 = \Delta u'_3 - \Delta u_3$ 。其中,  $\Delta u_1, \Delta u_2, \Delta u_3$  为由统计模型分离出的前一时刻正垂线测点 PL5-1, PL5-2, PL5-3 的水压位移分别相对倒垂线测点 IP5 的相对值;  $\Delta u'_1, \Delta u'_2, \Delta u'_3$  为后一时刻的相对值。计算结果见表 2。

4.3.4 反演模型建立

根据假设给定的坝体及坝基待反演参数变化区间,采用均匀设计法生成待反演参数样本,水平数为 31,根据均匀设计表  $U_{31}^*(31^4)$  进行设计,得到 31 组训



表 2 各测点位移水压分量实测相对值

Table 2 Relative values of measured displacement of water pressure component at each monitoring point

工况	日期	水位/m		相对位移/mm		
		上游	下游	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$
1	2014-07-10	738.35	642.85	0.72	1.54	2.16
	2014-10-01	728.99	643.30			
2	2015-04-01	725.39	642.50	1.34	2.66	2.12
	2015-06-02	738.29	645.73			
3	2015-03-31	726.45	642.35	0.92	1.89	0.75
	2015-05-08	735.20	642.90			
4	2015-06-02	738.29	645.73	0.42	0.96	1.99
	2015-06-08	731.72	644.35			
5	2015-05-31	738.22	642.35	0.57	1.21	2.09
	2015-04-10	730.52	641.99			
6	2015-03-27	730.36	641.91	0.63	1.36	1.51
	2015-07-13	737.06	643.16			
7	2015-05-20	736.49	642.91	1.00	2.06	1.21
	2015-03-31	726.45	642.35			
8	2015-05-28	738.07	642.95	1.04	2.19	1.94
	2015-03-31	726.45	642.35			

练样本,分别计算不同工况下的水压分量相对值,计算结果见表3。表中 $\delta'_1$ ,  $\delta'_2$ ,  $\delta'_3$ 分别表示由有限元计算的测点 PL5-1, PL5-2, PL5-3 相对坝基测点 IP5 的位移。

表 3 神经网络训练样本计算结果

Table 3 Calculated results of neural network training samples

工况	测点位移水压分量计算 相对值/mm			坝体及坝基物理力学 参数/GPa			
	$\delta'_1$	$\delta'_2$	$\delta'_3$	$E_1$	$E_2$	$E_r$	$G_2$
1	0.95	2.08	4.06	23.00	16.43	40.00	25.60
2	0.90	1.89	3.57	27.50	15.03	29.00	22.60
3	0.70	1.53	2.98	32.00	26.67	50.00	19.60
4	0.68	1.43	2.71	36.50	22.39	39.00	16.60
5	0.73	1.46	2.69	41.00	41.00	28.00	13.60
6	0.55	1.15	2.19	45.50	31.82	49.00	10.60
7	0.56	1.13	2.09	50.00	26.88	38.00	26.80
8	0.63	1.22	2.18	54.50	44.31	27.00	23.80
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30	0.51	1.02	1.89	57.50	49.15	41.00	15.40
31	0.55	1.07	1.90	62.00	38.75	30.00	12.40

选择 3 层神经网络模型进行反分析,将表 3 中测点位移水压分量相对值作为输入值,相应的坝体、坝基物理力学参数作为输出值,建立神经网络模型。为较好地防止计算过程中出现“过拟合”等问题,在网络训练前,对数据进行“归一化”处理。经多次试算,确定隐含层为 10 单元,传递函数采用 S 型正切函数,输出为 purelin 函数。将表 3 中的样本值输入到 BP 神经网络进行训练,经过 4 133 次学习训练,建立水压分量相对值与力学参数之间 3-10-4 的高度非线性映射关系。神经网络模型结构示意图见图 5。

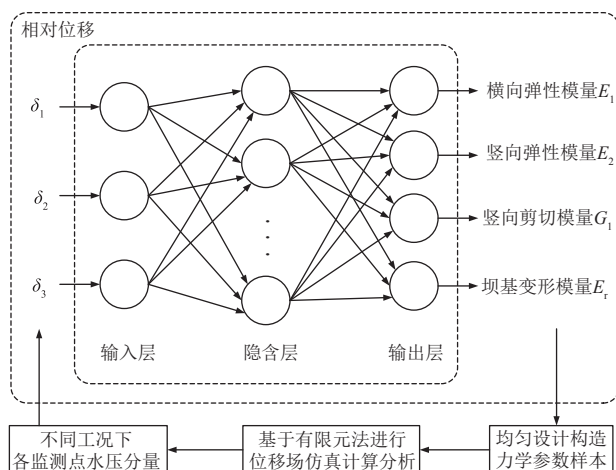


图 5 神经网络结构模型示意图

Fig.5 Structure of neural network model

#### 4.3.5 参数反演结果

基于上述建立的参数优化反演模型及选取的计算工况,按照第 2 节参数优化反演步骤进行计算,若不满足,则添加样本训练,直至得到合理的待反演物理力学参数。8 种不同工况反演计算结果见表 4。

表 4 8 种不同工况力学参数反演值

Table 4 Values of mechanical parameters obtained from inversion under eight different working conditions

工况	$E_1$ /GPa	$E_2$ /GPa	$E_r$ /GPa	$G_2$ /GPa
1	48.93	34.17	45.23	25.72
2	36.21	30.33	43.20	20.02
3	33.20	24.30	34.20	18.20
4	47.32	26.90	45.83	17.25
5	47.82	28.84	42.43	15.41
6	48.40	25.50	37.50	13.20
7	44.20	34.30	32.70	19.40
8	40.12	30.10	37.50	17.50

由表 4 可见,上述 8 种工况的反演结果不唯一,甚至不同工况下反演值存在较大的差异。考虑到大坝碾压混凝土抗压强度标准值采用 80% 保证率,而反演的弹性模量与大坝混凝土强度密切相关。为此,从数理统计角度考虑,依据 80% 保证率对表 4 获得的样本进行分析。依据数理统计 K-S 检验法可知,碾压混凝土横向综合弹性模量  $E_1$ 、竖向综合弹性模量  $E_2$ 、坝基变形模量  $E_r$ 、竖向综合剪切模量  $G_2$  均服从正态分布,即分别满足  $E_1 \sim N(43.275, 5.0738)$ ,  $E_2 \sim N(29.305, 2.920)$ ,  $E_r \sim N(39.824, 4.349)$ ,  $G_2 \sim N(18.338, 2.532)$ , 然后分别按 80% 保证率取值,得到  $E_1 = 39$  GPa,  $E_2 = 26.85$  GPa,  $E_r = 36.16$  GPa,  $G_2 = 16.21$  GPa。横向综合弹性模量与竖向综合弹性模量之比约为 1.45,对比已有文献,由于本工程规模较大及环境条件较为复杂,故反演的坝体力学参数值偏大。

#### 4.3.6 反演结果合理性判断

为验证反演计算的正确性,将得到的坝体及坝

基物理力学参数输入有限元中进行正分析计算,得到计算相对值与实测相对值,相应的各测点位移值对比见表5。从计算结果看,有限元法正分析结果与水压分量实测值较为接近。由于实测值相对较小,一定程度影响反演精度。但总体来看,基于反演值的计算位移与各测点实测值误差基本上 $<5\%$ ,这说明本文反演的坝体及坝基物理力学参数是可行的,而从概率统计角度处理优化反分析不唯一问题,可以得到相对稳定的反演值。

表5 位移水压分量实测值与计算值对比

Table 5 Comparison of displacement of water pressure component between measured value and calculated value

工况	水压分量实测 相对值/mm			有限元计算 相对值/mm			相对误差/%		
	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta'_1$	$\delta'_2$	$\delta'_3$	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$
1	0.72	1.54	2.16	0.75	1.56	2.05	4.17	1.30	5.09
2	1.34	2.66	2.12	1.26	2.63	2.14	5.97	1.13	0.94
3	0.92	1.89	0.75	0.95	1.95	0.8	3.26	3.17	6.67
4	0.42	0.96	1.99	0.44	1.01	2.06	4.76	5.21	3.52
5	0.57	1.21	2.09	0.56	1.16	2.18	1.75	4.13	4.31
6	0.63	1.36	1.51	0.63	1.29	1.53	0.00	5.15	1.32
7	1.00	2.06	1.21	0.94	1.96	1.19	6.00	4.85	1.65
8	1.04	2.19	1.94	1.10	2.28	1.85	5.77	4.11	4.64

## 5 结 论

针对反分析中多参数反演不唯一性问题,本文结合高寒地区某碾压混凝土坝实测变形探讨了一种反演分析不唯一性概率统计分析方法,具体结论如下:

(1)基于不同工况下实测值进行反演时,反演参数不唯一,甚至反演结果差异较大。为此,提出以多种工况作为计算分析对象,得到多组反演参数值,然后进行数理统计 K-S 检验,得到反演参数的概率分布,最后类比大体积混凝土抗压强度标准值的取值方法,按 80%保证率确定反演参数。

(2)结合高寒地区某碾压混凝土坝工程,展示了本文提出的参数反演不唯一性概率统计分析方法。分析表明,从概率统计角度处理优化反分析不唯一问题,可以得到相对稳定的反演值,为大坝的运行管理提供合理可靠的参考。

## 参考文献:

- [1] 向 衍,苏怀智,吴中如.基于大坝安全监测资料的物理力学参数反演[J].水利学报,2004,35(8):98-102.
- [2] 康 飞,李俊杰,许 青.混合蜂群算法及其在混凝土坝动力材料参数反演中的应用[J].水利学报,2009,40(6):736-742.
- [3] GU Chong-shi, LI Bo, XU Guang-lei, *et al.* Back Analysis of Mechanical Parameters of Roller Compacted Concrete Dam [J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(3): 848-853.
- [4] 雷 鹏,苏怀智,张贵金.基于 RNN 模型的坝体和岩基区间参数反演方法研究[J].岩土力学,2011,32(2):547-552.
- [5] 牛景太.基于混沌遗传算法的碾压混凝土坝力学参数反分析[J].南水北调与水利科技,2012,10(4):140-143.
- [6] WANG Wei-qiang, KUANG Ya-hong, LI Shao-hua, *et al.* Back Analysis of Dam Parameter under Seismic Action [J]. Procedia Engineering, 2012, 28: 429-433.
- [7] SU Huai-zhi, WEN Zhi-ping, ZHANG Shuai, *et al.* Method for Choosing the Optimal Resource in Back-Analysis for Multiple Material Parameters of a Dam and Its Foundation[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2016, 30(4): 04015006.
- [8] 曹明杰,曹 鑫,徐政治.量子遗传算法在混凝土重力坝综合弹性模量反演中的应用[J].长江科学院院报,2016,33(4):111-114.
- [9] 冯 帆,邱信蛟,张国新,等.基于施工期变形监测的特高拱坝力学参数反演研究[J].岩土力学,2017,38(1):237-246.
- [10] 张进平,卢正超,黎利兵,等.混凝土大坝冻胀变形统计分析模型研究[J].大坝与安全,2007(4):28-32.
- [11] 卢正超,张进平,黎利兵,等.丰满混凝土重力坝的冻胀变形分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2006,4(1):53-57.
- [12] 方开泰.均匀设计与均匀设计表[M].北京:科学出版社,1994.
- [13] 刘海成,宋玉普,吴智敏,等.基于应变空间的碾压混凝土各向异性损伤本构模型[J].工程力学,2004,21(6):149-155.
- [14] 黄耀英,吴中如,王德信.薄层单元基本假设和简化探讨[J].力学与实践,2008,30(2):49-52.
- [15] 吴中如.水工建筑物安全监控理论及其应用[M].北京:高等教育出版社,2003.

(编辑:罗 娟)



欢迎关注《长江科学院院报》微信公众号