

基于极限学习机的隧洞岩体蠕变参数反分析方法

张阳茁¹, 杨杰^{1,2}, 程琳^{1,2}, 唐友山¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要:以某水电站坝区左岸导流洞工程为依托,将极限学习机(ELM)应用于隧洞岩体蠕变参数反演计算中。通过正交实验设计,确定导流洞出口段的16组岩体力学参数,选取其中的14组用FLAC3D中的Cvisc模型进行数值分析,根据各组蠕变参数和与其对应的各测点计算位移,对ELM网络进行训练,输入岩体中关键点实际监测的位移变化过程线,反演出相应的岩体蠕变参数确定二者之间的非线性关系,其余两组用于检验训练结果。将该模型应用于某水电站左岸隧洞岩体蠕变参数反演分析中,计算结果与实测位移值拟合较好,说明该模型简单、实用,具有良好的反演精度,可满足工程设计要求。

关键词:隧洞; 围岩; 蠕变参数; 极限学习机; 反分析; FLAC3D 数值模拟

中图分类号:TV672

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2017)03-0205-06

Back analysis of rock creep parameter based on extreme learning machine

ZHANG Yangzhuo¹, YANG Jie^{1,2}, CHENG Lin^{1,2}, TANG Youshan¹

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an 710048, China)

Abstract: On the left bank of a hydropower station dam project diversion tunnel based on the extreme learning machine (ELM) is applied to the tunnel rock creep parameter inversion calculation. Through the orthogonal experimental design to determine 16 groups of rock mechanics parameters of diversion tunnel exit section, select one of the 14 groups using Cvisc FLAC3D model in numerical analysis, the calculation of creep parameters for each group and the corresponding of the displacement, the training of ELM network, the key point of rock displacement monitoring actual input the process line, the nonlinear relationship between the inversion of rock creep parameters determined two, the remaining two groups to test the training results. The model is applied to a hydropower station on the left bank of tunnel rock creep parameters inversion analysis, calculation results and the measured displacement values fitted well, which shows that the model is simple and practical, has good retrieval accuracy, which can meet the requirement of engineering design.

Key words: tunnel; rock mass; creep parameter; extreme learning machine; back analysis; FLAC3D

1 研究背景

水利水电工程设计中岩体的力学参数这一基本资料必不可少,而岩体的蠕变参数又是其重要组成部分,岩石蠕变是岩石在恒定应力条件下变形随时间而增长的力学现象^[1-2]。所谓位移反分析法,即以现场量测到的位移为基础,位移变化容易量测,且精度较高,因此位移反分析法应用最为广泛。通过反演模型推算出初始参数的方法,其目的是建立理

论预测模型能够最大程度接近现场实测结果,以便能够反映岩土体的力学行为^[3-8]。

为获得岩土体更真实的力学参数,前人在此方面做了很多研究性的工作。为分析地下岩体工程的长期稳定性,合理确定蠕变参数至关重要,而隧洞开挖施工时,岩体变形并非瞬时完成,受各种现场条件等诸多因素的影响,通过蠕变试验和室内常规试验获得的岩体力学参数往往不能很好地反映实际岩体性能。近年来,国内外学者在岩石蠕变参数分析方

收稿日期:2016-12-21; 修回日期:2017-02-06

作者简介:张阳茁(1991-),女,陕西周至人,在读硕士研究生,研究方向为水工结构数值仿真。

通讯作者:杨杰(1971-),男,四川大邑人,博士,教授,博士生导师,研究方向为大坝安全监测等。

面通过工程现场施工过程的监测资料,应用不同方法(以位移、应变、应力或荷载等为基础)反演得到工程岩体的蠕变力学参数^[9-11]。Oreste^[12]认为反分析隧道周边位移测量的工作和施工过程中支护结构载荷的目的是为了校准地面的地质力学参数;Chi ShueYeong等^[13]提出了一种隧道诱导接地运动的反分析的优化技术的应用;刘杰等^[14]对遗传算法进行改进,将其运用到弹塑性本构模型的反演上,采用普通算法得到的优秀个体,并对其进行优化并调整搜索区间,从而不断提高运行效率;张炳瑞等^[15]采用了BP神经网络的流变参数反演方法,提高了参数精度和计算时间。

虽然针对岩石蠕变的参数反演研究成果较多,但实际工程中不同种类的围岩性质存在很大的差异,而蠕变参数实验在条件上还存在很大的不足。为此,本文提出了一种基于极限学习机(ELM)和FLAC3D数值模拟的隧洞岩体蠕变参数反分析方法。ELM算法计算速度快且不用迭代求解,在提前设定好隐含层节点个数后,训练过程中无需调整任何网络参数。采用该反分析方法对某水电站左岸出口段关键位置的蠕变参数进行了反演,以验证方法的精确性和实用性。

2 洞室岩体蠕变模型

由于本文模拟的岩体埋深较大且地应力偏高,岩体本身很有可能在开挖过程中产生很大的塑性变形,采用Cvisc模型(由Burgers模型与Mohr-Coulomb模型串联组成)来表示岩土体的力学性质,它能描述材料的黏弹塑性和黏塑性特性^[16-17]。

Burgers模型是由Maxwell体和Kelvin体串联组成,其蠕变方程为:

$$\varepsilon = \varepsilon_M + \varepsilon_K = \frac{\sigma}{E_M} + \frac{\sigma}{\eta_M}t + \frac{\sigma}{E_K}(1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_K}t}) \quad (1)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)}, G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (2)$$

式中: σ 为应力,Pa; ε 为应变; E_M, η_M 分别为Maxwell弹性模量、黏性系数,GPa、GPa·s; E_K, η_K 分别为Kelvin黏弹性模量、黏性系数,GPa、GPa·s; E 为弹性模量,GPa; G 为剪切模量,GPa; K 为体积模量,GPa; μ 为泊松比。

Mohr-Coulomb屈服准则常用剪切破坏时的大、小主应力表示,其判别表达式为:

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} + 2c \sqrt{\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}} \quad (3)$$

$$f_t = \sigma_3 - \sigma_1 = \sigma_3 - \frac{c}{\tan\varphi} \quad (4)$$

式中: σ_1, σ_3 分别为最大、最小主应力,Pa; c, φ 分别为材料的黏聚力和内摩擦角,MPa、(°)。

本次数值模拟中采用Cvisc模型,此模型可以把复杂蠕变性质表达出来。其中黏弹性蠕变体的组合定义服从Burgers模型的本构定律(由开尔文体和麦克斯韦体串联构成),塑性体的力学行为采用Mohr-Coulomb模型加以表征^[18-21]。

3 极限学习机

极限学习机相对于传统前馈神经网络训练速度慢等缺点来看是一种针对单隐含层前馈神经网络(Single-hidden Layer Feedforward Neural Network, SLFN)的新算法,它对大量非结构性、非精确性规律具有很好的适应、容错、复杂映射和计算能力。

其基本原理是:训练前设置合适的隐含层节点数,训练过程中无需调整任何网络参数,在执行过程中只需要为输入权值和隐含层随机赋值,使得输出的误差最小,整个过程一次完成,无须迭代,并且产生唯一的最优解^[22]。

Huang Guangbin^[23]等在前人基础上提出了两个定理:

(1)任意给定 Q 个不同样本 (x_i, t_i) ,其中

$$x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]^T \in R^n, \quad (5)$$

$$t_i = [t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in}]^T \in R^m$$

在任意赋值 $W_i \in R^n$ 和 $b_i \in R$ 的情况下,一个任意区间无限可微的激活函数 $g: R \rightarrow R$,对于具有 Q 个隐含层神经元的SLFN,其隐含层的输出矩阵 $[H]$ 可逆且有

$$\|H\beta - T^T\| = 0 \quad (6)$$

其中: W_i 为隐含层与输入层间的连接权值向量, b_i 为第 i 个隐含层神经元的阈值矩阵。

对于任意的 W 和 b ,SLFN都可以零误差逼近训练样本,前提是隐含层神经元与训练集样本个数相等,即

$$\sum_{j=1}^Q \|t_j - y_j\| = 0 \quad (7)$$

其中 $y_i = [y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im}]^T$ ($j = 1, 2, \dots, Q$)。

当训练样本个数 M 较大时,隐含层神经元个数 K 取比 Q 小的数,可以减少计算量。

(2)给定任意 Q 个不同样本 (x_i, t_i) ,其中

$$x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]^T \in R^n, \quad (8)$$

$$t_i = [t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{im}]^T \in R^m$$

在任意赋值 $W_i \in R^n$ 和 $b_i \in R$ 的情况下,给定任意小误差 $\varepsilon > 0$ 和一个任意区间无限可微的激活函数 $g:R \rightarrow R$,则总存在一个含有 $K(K \leq Q)$ 个隐含层神经元的 SLFN,有

$$\| H_{N \times M} \beta_{M \times m} - T^T \| \leq \varepsilon \quad (9)$$

SLNF 的训练误差逼近一个任意的 $\varepsilon > 0$,即

$$\sum_{j=1}^Q \| t_j - y_j \| \leq \varepsilon \quad (10)$$

因此当激活函数 $g(x)$ 无限可微时, W 和 b 在训练前可以随机选择,且在训练过程中保持不变,SLFN 的参数并不需要全部进行调整,通过求以下方程组的最小二乘解获得隐含层和输出层的连接权值 可以:

$$\min_{\beta} \| H\beta - T^T \| \quad (11)$$

$$\text{其解为: } \hat{\beta} = H^+ T^T \quad (12)$$

式中: H^+ 为隐含层输出矩阵 H 的 Moore - Penrose 广义逆; T 为训练样本的待拟合部分^[24-26]。

4 基于极限学习机的蠕变参数反分析流程

本文将建立基于极限学习机的岩体蠕变参数的

反演方法。图 1 为该方法的基本计算流程,其具体的计算步骤如下:

(1) 根据工程基本资料中的岩体基本力学参数,确定左岸出口段岩体的蠕变模型。

(2) 采用 FLAC3D 中的 CVSIC 模型进行黏弹塑性蠕变分析,同时建立参数反演的目标函数,确定待反演的蠕变参数的取值范围。

(3) 采用正交试验设计构造出蠕变参数组合,建立所需要研究区域的 FLAC3D 数值模型,利用构造好的蠕变参数组合计算出隧洞岩体监测位置的位移变化过程,构造出一定数量的学习样本。

(4) 将样本代入 ELM 程序,进行网络训练。

(5) 输入岩体中关键点实际监测的位移变化过程线,反演出相应的岩体蠕变参数。

(6) 将反演出的岩体蠕变参数输入到 FLAC3D 中进行数值检验,计算出数值模拟的关键点位移变化和实测的位移变化之间的误差,若其小于设定的允许误差,输出本次反演出的岩体力学参数;若其大于设定的允许误差,将本次反演出的力学参数和计算出的关键点的位移变化加入到样本,重复操作。

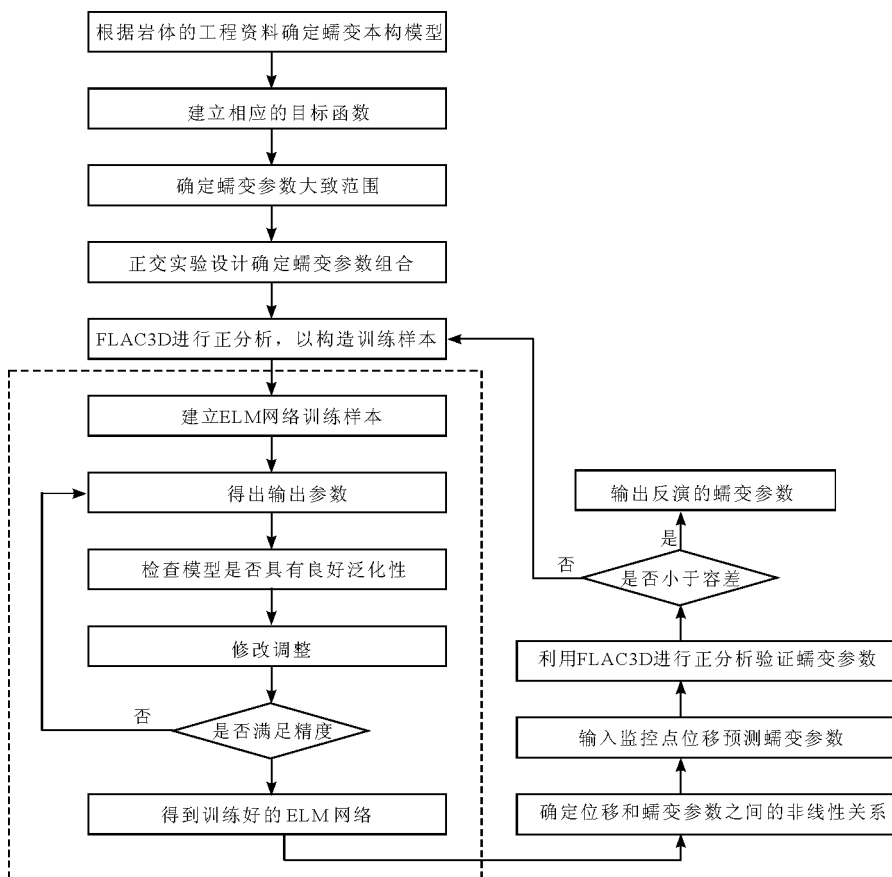


图 1 基于极限学习机的蠕变参数反演的计算流程图

5 工程实例

某水电站位于金沙江下游河段,坝址所处河段位于云南省昆明市禄劝县和四川省凉山州会东县交界处,电站装机容量 10 200 MW,为 I 等大(1)型工程,导流隧洞按照一级建筑物设计。

根据全年隧洞导流方案,左岸布置 2 条导流洞,导流洞靠山里侧布置,并且与电站尾水洞结合。出口段导流洞断面尺寸 16.5 m × 24.0 m,长度大约 285 m,最大埋深 222 m。隧洞断面尺寸和支护布置如图 2 所示。

5.1 数值计算模型

数值模拟区域为左岸出口段,从左往右依次为 2 号导流洞和 1 号导流洞,导流洞为城门洞形断面,轴向长度 285 m,沿 1 号导流洞轴线向右扩 57 m,沿 2 号导流洞轴线向左扩 50.5 m。II 类围岩,围岩范围径向取 3 倍洞径左右。

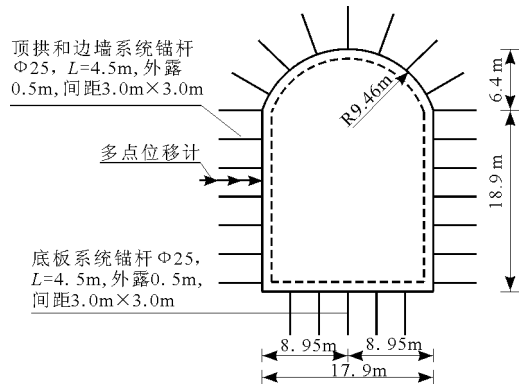


图 2 导流洞断面布置图

岩体统一采用空间八节点六面体单元,模型共划分三维块体单元 451 341 个(如图 3);锚杆支护采用 cable 结构单元模拟,模型共划分 cable 单元 17 290 个(如图 4)。

锚杆的力学参数表如表 1,岩体常规力学参数的取值范围如表 2,岩体蠕变参数的取值范围如表 3。

表 1 锚杆的力学参数

弹性模量/ GPa	横截面积/ m ²	水泥浆摩 擦角/(°)	水泥浆外圈 周长/(r · m ⁻¹)	水泥浆刚 度/MPa	黏结力/ (N · m ⁻¹)	抗压强度/ MPa	回填砂浆体和锚杆的 综合抗拉强度/MPa
200	4.906 × 10 ⁻⁴	30	0.48	17.5	20 × 10 ⁵	100	0.3

表 2 岩体力学参数取值范围

体积模量/ GPa	密度/ (kg · m ⁻³)	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)	受拉应力 最大值/MPa
15.4 ~ 26.7	2690	1.2 ~ 1.8	53 ~ 58	0.6 ~ 0.8

表 3 岩体的蠕变参数的取值范围

Kelvin 体剪切 模量/GPa	Kelvin 体黏性 系数/(MPa · s)	Maxwell 体剪切 模量/GPa	Maxwell 体黏性 系数/(GPa · s)
4.80 ~ 1.80	20.32 ~ 108.0	3.64 ~ 11.6	54.6 ~ 103.70

5.2 蠕变参数反演

5.2.1 蠕变变形监测点的布置 为了监测开挖后岩体的蠕变位移变化,施工是在关键断面 2 号洞的 K1 + 630 断面上布置了一支多点位移计,具体位置如图 2 中所示。测点分别对应 FLAC3D 模型中的 gridpoint 248273、259312、259316。按照施工要求 1、2 号导流洞均采用 3 层开挖,而具体的开挖时间及顺序为:2013 - 12 - 09 开挖 2 号洞第 1 层;2014 - 01 - 01 开挖 1 号洞第 1 层;2014 - 01 - 25 开挖 2 号洞第 2 层;2014 - 02 - 01 开挖 1 号洞第 2 层;2014 - 03 - 01 开挖 2 号洞第 3 层;2014 - 03 - 15 开挖 1 号洞第 3 层。

5.2.2 ELM 网络训练 利用正交实验设计出 16 组蠕变参数的数据见表 4,使用 FLAC3D 数值分析软件计算出各组参数对应的监测点位移变化过程,选取其中的前 14 组用作样本,其余两组用于检验训练结果。训练过程的误差曲线如图 5 所示。

根据训练误差曲线,在 30 步以内误差逐渐减小,而后呈现一直保持不变状态。所以,随着步数的增多,计算出数值模拟的关键点位移变化和实测的位移变化之间的误差小于设定的允许误差,即将本次反演出的力学参数和计算出的关键点的位移变化加入到样本。

5.2.3 蠕变参数的反演及数值正分析验证 将监测点的位移变化过程离散为对应时间点位移数组,将其作为输入量,利用训练好的 ELM 网络反演出对应的蠕变参数结果表 5。

采用相同的模拟方案,将反演出的蠕变参数赋予模型中的岩体,按照施工要求 1、2 号导流洞均采用 3 层开挖,在每层开挖时需将蠕变模式关闭,并进行 150 步的弹性求解,以释放应力,然后打开蠕变模式在建立的 FLAC3D 模型中,记录图 2 所示的监测点的水平位移,计算出开挖和初期支护期间 2 号洞

边墙监测点的位移变化,并与开挖后埋设的多点位移计记录的实测位移相比较。所计算出的测点位移变化与实测值变化如图 6、图 7、图 8 所示。

从计算结果来看,左岸导流洞 1 号洞和 2 号洞开挖之间有相互作用,因为在 2 号洞开挖时,监测到 1 号洞左边墙部分测点会向 2 号洞一侧变形,这一

点在早期支护设计时应给予考虑。由于监测是在开挖完成以后,隧洞尺寸较大,采用 3 层开挖,埋设多点位移计只能监测 2 号洞第 2 层开挖完成以后的位移变化。而 FLAC3D 数值模拟却能根据反演出的蠕变参数,计算出在此之前各层开挖和蠕变引起的位移变化。

表 4 正交实验设计结果

样本编号	体积模量/ GPa	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	受拉应力 最大值/ MPa	Kelvin 体 剪切模量/ GPa	Kelvin 体 黏性系数/ ($\text{MPa} \cdot \text{s}$)	Maxwell 体 剪切模量/ GPa	Maxwell 体 黏性系数/ ($\text{GPa} \cdot \text{s}$)
1	25.29	2690	1.80	58.00	1.50	4.84	20.32	5.67	54.60
2	25.30	2690	1.50	57.50	1.50	8.84	70.35	9.62	64.70
3	22.79	2690	1.80	58.00	1.20	8.84	76.38	5.63	84.70
4	23.80	2690	1.80	58.00	1.20	9.84	86.22	3.64	94.70
5	17.80	2690	1.80	57.60	1.20	12.8	96.37	6.62	86.60
6	15.80	2690	1.20	55.00	0.80	6.84	96.29	5.62	94.70
7	17.00	2690	1.20	56.00	0.80	7.84	99.30	6.63	98.70
8	17.69	2690	1.20	57.00	0.80	8.24	97.29	7.92	97.68
9	18.66	2690	1.30	58.00	0.80	9.23	97.46	8.92	98.69
10	19.70	2690	1.30	57.00	0.90	7.23	89.30	9.96	86.70
11	21.78	2690	1.40	58.00	1.00	9.24	99.30	8.94	96.68
12	19.59	2690	1.25	58.00	0.90	9.74	97.30	10.50	92.70
13	20.00	2690	1.40	58.00	1.00	10.90	108.0	10.49	99.70
14	19.19	2690	1.30	58.00	1.00	10.28	97.50	10.48	99.70
15	20.20	2690	1.40	58.00	1.20	11.76	98.50	10.50	94.70
16	19.68	2690	1.35	56.50	1.20	10.73	96.20	11.58	103.20

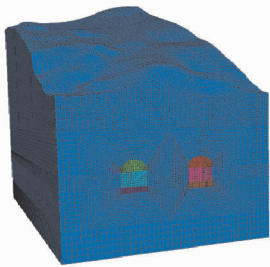


图 3 山体的三维有限差分网格模型

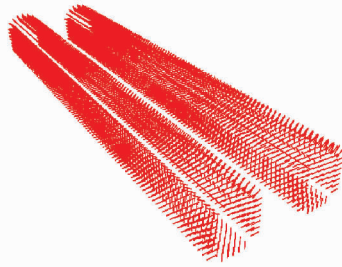


图 4 三维模型中锚索结构单元的布置

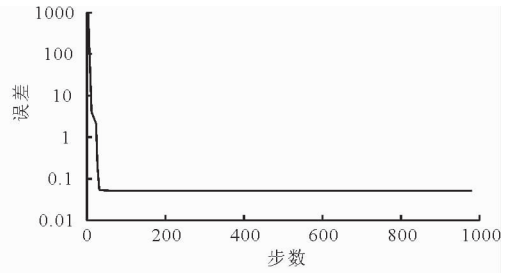


图 5 训练误差曲线(纵坐标为对数坐标)

表 5 反演的蠕变参数

体积模量/ GPa	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	受拉应力 最大值/MPa	Kelvin 体剪 切模量/GPa	Kelvin 体黏性 系数/($\text{MPa} \cdot \text{s}$)	Maxwell 体剪切 模量/GPa	Maxwell 体黏性 系数/($\text{GPa} \cdot \text{s}$)
25.42	2690	0.82	54.89	1.18	7.89	107.66	8.27	100.36

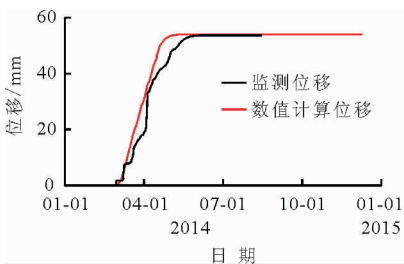


图 6 孔口处测点位移变化过程线

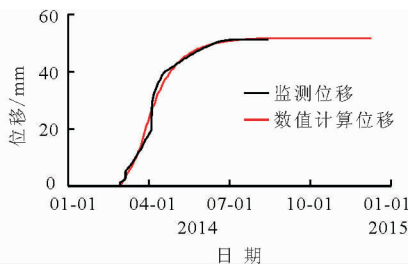


图 7 3.5m 处测点位移变化过程线

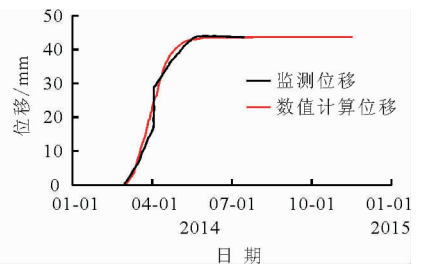


图 8 6.5m 处测点位移变化过程线

6 结 论

经过采用基于极限学习机的计算程序,对此工程左岸出口段隧洞岩体蠕变参数进行了反演分析,对计算出的位移变化和多点位移计记录的实测位移相比较,初步得到以下结论:

(1)左岸导流洞的围岩的初始蠕变和匀速蠕变主要在1~2个月内完成,建议衬砌工程尽量在开挖后及时进行施工。

(2)ELM数学模型简单,无需调整任何参数,大大提高了机器学习效率。在使用FLAC3D蠕变模式模拟隧洞的蠕变行为时,计算所取的时间步与蠕变时间成近线性关系时,会方便计算,并能取得很好的模拟效果。

(3)运用ELM结合FLAC3D软件进行隧洞蠕变参数的反演,计算过程快捷、简单,反演结果与实测值拟合较好,表明该方法为岩石蠕变参数的反演计算提供一种新思路,能够用于各种断面形式和应力条件复杂的隧洞围岩蠕变参数的反分析。

参考文献:

[1] 张春生,褚卫江,侯靖,等.锦屏二级水电站引水隧洞大型原位试验研究I-试验方案[J].岩石力学与工程学报,2014,33(8):1691-1701.

[2] 褚卫江,张春生,陈志平,等.锦屏二级水电站引水隧洞大型原位试验研究II-试验结果分析[J].岩石力学与工程学报,2014,33(8):1702-1710.

[3] 赵旭峰,孙钧.挤压性软岩流变参数反演与本构模型辨识[J].铁道工程学报,2008,25(5):5-8+19.

[4] 刘世君,徐卫亚,邵建富.岩石粘弹性模型辨识及参数反演[J].水利学报,2002,33(6):101-105.

[5] 杨文东,张强勇,张建国,等.刚性承压板下深部岩体压缩蠕变参数反演[J].岩土力学,2009,30(3):762-768.

[6] 胡斌,冯夏庭,王国峰,等.龙滩水电站左岸高边坡泥板岩体蠕变参数的智能反演[J].岩石力学与工程学报,2005,24(17):3064-3070.

[7] 伍国军,陈卫忠,贾善坡.大型地下洞室围岩体蠕变参数位移反分析研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S2):4043-4049.

[8] 张强勇,张建国,杨文东,等.软弱岩体蠕变模型辨识与参数反演[J].水利学报,2008,39(1):66-72.

[9] 王涛,韩焯,赵先宇,等.FLAC3D数值模拟方法及工程应用-深入剖析FLAC3D 5.0[M].北京:中国建筑工业

出版社,2015.

[10] 向文,张强勇,张建国.坝区岩体蠕变参数解析-智能反演方法及其工程应用[J].岩土力学,2015,36(5):1505-1512.

[11] 李鹏.高填石路堤蠕变模型与参数反演分析及其应用研究[D].长沙:湖南大学,2005.

[12] Oreste P. Back-analysis techniques for the improvement of the understanding of rock in underground constructions [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005,20(1):7-21.

[13] Chi ShueYeong, Chern Jincheng, Lin Chincheng. Optimized back-analysis for tunneling-induced ground movement using equivalent ground loss model [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(3):159-165.

[14] 刘杰,王媛.岩体流变参数反演的加速遗传算法[J].大坝观测与土工测试,2001,25(6):24-27.

[15] 张炳瑞,冯夏庭,丁秀丽,等.基于模式-遗传-神经网络的流变参数反演[J].岩石力学与工程学报,2005,24(4):553-558.

[16] 江宗斌,姜谔男,石静.基于Cvisc蠕变模型的CFG桩路基施工沉降分析[J].岩土工程学报,2013,35(S2):346-351.

[17] 李海德.隧道围岩流变参数的粘弹性位移反演和验证[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(2):74-79.

[18] 徐平,丁秀丽,全海,等.溪洛渡水电站坝址区岩体蠕变特性试验研究[J].岩土力学,2004,24(S):220-222+226.

[19] 田泽润,李守巨,于申.白山抽水蓄能泵站地下厂房的岩体力学参数反演[J].岩土力学,2014,35(S2):508-513.

[20] 张建国.水电坝区复杂岩体压缩蠕变参数反演方法及其工程应用[D].济南:山东大学,2008.

[21] 马非,贾善坡.泥岩巷道围岩弹塑性参数反演分析与长期稳定性预测[J].岩土力学,2014,35(7):1987-1994.

[22] 薄军.基于极限学习机的燃气日负荷预测[J].煤气与热力,2016,36(2):39-42.

[23] Huang Guangbin, Zhu Qinyu, Siew C K. Extreme learning machine: Theory and applications [J]. Neurocomputing, 2006, 70(1-3):489-501.

[24] 蒋昱州,张明鸣,李良权.岩石非线性黏弹塑性蠕变模型研究及其参数识别[J].岩石力学与工程学报,2008,27(4):832-839.

[25] 叶智峰,曹青.极限学习机在初始地应力场反演中的应用[J].水电能源科学,2016,34(6):158-160.

[26] 甘露.极限学习机的研究与应用[D].西安:西安电子科技大学,2014.