

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.01.012

糯扎渡水电站调压井围岩力学参数反演与反馈分析

聂卫平^{1,2}, 杨云浩^{1,2}, 石 崇^{1,2}, 刘兴宁³

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 3. 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650051)

摘要: 针对糯扎渡水电站调压井工程区的特点, 建立三维仿真模型, 根据实测位移分析、BP 神经网络和最小残差原理, 反演出工程区各岩层弹性模量, 并将反演参数导入模型进行三维弹塑性反馈计算。实测位移分析表明, 调压井拱顶位移随着开挖方量的增大而增大, 最大位移发生在 1 号调压井与连通上室连接处, 最大值 1.68 mm; 反演得到的各岩层弹性模量分别为: 微新层 24.11 GPa, 弱风化上层 10.13 GPa, 弱风化下层 3.16 GPa, 强风化层 0.20 GPa, 断层 0.62 GPa, 最小位移残差为 16.82 mm²; 监测和计算的位移、位移增量变化趋势基本一致, 说明反演参数可靠。因实际开挖瞬间卸荷, 计算位移比监测位移一般要大, 最大计算位移为 3.22 mm; 洞室开挖后围岩变形主要朝临空面方向, 围岩变形较小, 围岩较稳定。

关键词: 三维弹塑性; 反演; 反馈; 位移增量; BP 神经网络; 围岩; 调压井; 糯扎渡水电站

中图分类号: TV653; TU457

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2011)01-0054-07

由于岩土材料物理特性的复杂性, 通过试验或解析的方法获取数值分析中的输入参数和本构模型受到诸多条件限制, 开展岩土力学反演和反馈设计研究显得尤为重要。岩石工程反馈设计研究的基础是反分析^[1]。岩土力学中反分析最先由 Kavanagh 等^[2]提出并发展, 我国杨林德等^[3]较早开始研究岩土反分析问题。近年来, 国内外学者为反分析问题研究做了大量工作, Sonmez 等^[4]对密集裂隙岩体开挖边坡进行了圆弧滑动面强度参数反分析; Deng 等^[5]提出了基于 BP 神经网络和遗传优化算法的边坡位移反分析数值方法; De Mello France 等^[6]依据开挖监测资料反演了地应力; 傅少君等^[7]提出了基于弹黏塑性有限元、人工神经网络及遗传算法联合的间接位移反分析方法; 苏怀智等^[8]利用区间反分析法, 对混凝土坝力学参数进行了反演; 周家文等^[9]采用开挖位移增量形式反演出糯扎渡水电站 2 号导流洞围岩的岩体力学参数和初始地应力场; 杨有海等^[10]引入位移释放系数考虑测点的时空效应, 对有限元黏弹性问题进行了优化反演分析。BP 神经网络方法在参数反演中也得到广泛应用, 如周建春等^[11]采用 BP 神经网络对公路隧道新奥法施工过程中围岩力学参数的反演分析进行了研究; 张晓飞等^[12]采用改进的 BP 神经网络, 建立了碾压混凝土坝热学参数反馈分析模型。本文针对糯扎渡水电站调压井工程区复杂的地质构造特性, 采用 BP 神经网络模型和最小残差原理, 反演出该区围岩弹性模量, 利用反演得到的参数进行三维弹塑性反馈计算, 并将计算结果与现场监测结果进行对比分析, 以评价洞室开挖后围岩稳定性, 验证反演参数的合理性。

1 工程概况及三维模型的建立

糯扎渡水电站尾水调压井地下洞群规模宏大, 1 号调压井开挖直径为 29.3 ~ 34.3 m, 2 号和 3 号调压井开挖直径为 31.3 ~ 34.3 m。尾水调压井之间在高程 625.5 m 设连通上室, 断面为城门洞型, 开挖断面尺寸为 14.3 m × 17.5 m(宽 × 高)。2 号和 3 号调压井间连通上室长为 70.7 m, 1 号、2 号调压井间连通上室长为 71.7 m。通过尾水调压井地带的Ⅲ级断层有 F_{20} 、 F_{21} 、 F_{22} 。调压井工程区地质剖面示意图如图 1 所示。

三维模型研究范围: x 方向范围 - 349 ~ - 103 m(尾水支洞纵向, 指向下游为正); y 方向范围 0 ~ 450 m(调压井纵向, 1 号调压井指向 3 号调压井方向为正); z 方向范围 501 ~ 865 m(竖直向上为正), 向上延伸至高

收稿日期: 2009-12-01

基金项目: “十一·五”国家科技支撑计划(2008BAB29B01); 国家自然科学基金(50911130366)

作者简介: 聂卫平(1982—)男, 江西临川人, 博士研究生, 主要从事岩石力学与工程研究。E-mail: nwp_jzit@tom.com

程 865 m,最大高度为 364 m. 计算模型共划分单元 184 336 个,节点 38 954 个,计算模型采用位移边界条件,采用实体单元模拟,初期衬砌用壳单元模拟,锚杆与锚索用索单元模拟. 考虑Ⅲ级断层 F_{20} 、 F_{21} 、 F_{22} 地下洞室及断层位置如图 2 所示,工程区三维模型及地层划分如图 3 所示. 根据中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院提供的资料,除各岩层弹性模量外,其他力学参数均由试验获得,根据张继勋等^[13-14]对参数敏感性的研究,洞室开挖后,弹性模量对围岩变形和稳定性影响比其他参数更明显,因此,本文只对各岩层弹性模量进行反演. 各岩层弹塑性数值计算围岩力学参数见表 1,采用侧压力系数法施加地下洞室区地应力.

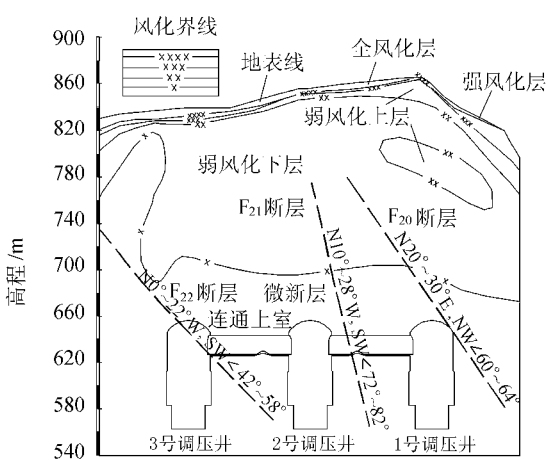


图 1 调压井工程区地质剖面示意图

Fig. 1 Geological section of project area of relief well

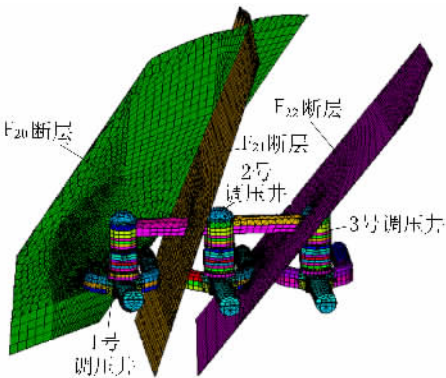


图 2 地下洞室与断层三维模型

Fig. 2 3D model of underground cavern and faults

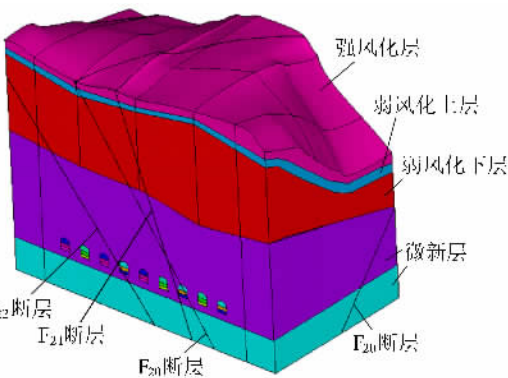


图 3 工程区三维模型及地层划分

Fig. 3 3D model of project area and division of strata

表 1 弹塑性数值计算围岩力学参数

Table 1 Mechanical parameters of surrounding rock for elastic-plastic numerical calculation

类别	摩擦因数	黏聚力/MPa	弹性模量 E /GPa	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	抗拉强度/MPa
微新层	1.40	1.70	待反演	2610	0.22	8.00
弱风化下层	1.20	1.00	待反演	2570	0.24	6.50
弱风化上层	0.90	0.30	待反演	2450	0.26	3.40
强风化层	0.70	0.20	待反演	2350	0.28	1.50
断层	0.21	0.03	待反演	2000	0.33	0.28

2 开挖顺序及监测点布置

目前调压井高程 625.5 m 以上位移监测数据已经采集,所以本文主要针对高程 625.5 m 以上洞室进行三维弹塑性开挖计算,并与监测值进行对比分析.在 1 号调压井监测纵断面垂直拱座、上仰 53.37°布置 31 m 多点位移计 a,垂直拱座、上仰 21.37°布置 31 m 多点位移计 b,在 2 号和 3 号调压井监测纵断面垂直拱座、上仰 24.84°分别布置 31 m 多点位移计 c、d 和 e,调压井高程 625.5 m 以上开挖顺序与多点位移计布置见图 4,洞室开挖顺序为 $I \rightarrow II \rightarrow III \rightarrow IV \rightarrow V \rightarrow VI \rightarrow VII$,弹塑性数值计算采用有

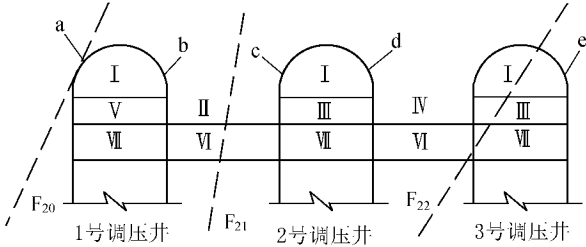


图 4 调压井高程 625.5 m 以上开挖顺序与监测仪器布置

Fig. 4 Excavation sequence of relief well above elevation of 625.5 m and arrangement of monitoring instruments

限差分法,强度准则采用 Mohr-Coulomb 准则。

3 反演原理和步骤

3.1 BP 神经网络原理

BP 神经网络是一种采用误差反向传播学习法的多层前馈神经网络,采用典型的 3 层 BP 神经网络进行反演,包括输入层、中间层和输出层,相邻层各神经元之间实行权连接。

设输入模式向量为^[15]

$$A_k = (a_{k1}, a_{k2}, \dots, a_{kn}) \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

对应希望输出向量为

$$Y_k = (y_{k1}, y_{k2}, \dots, y_{kq}) \quad (2)$$

中间层各单元的输入为

$$S_j = \sum_{i=1}^n W_{ij} a_{kj} - \theta_j \quad (j = 1, 2, \dots, p) \quad (3)$$

以 S_j 作为 Sigmoid 函数自变量,计算中间层各神经元的输出, Sigmoid 函数为

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x/x_0}} \quad (4)$$

中间层神经元激活值为 $b_j = f(x)$ ($j = 1, 2, \dots, p$),信息从输入层流向输出层,给定输入信息,便得到相应的输出结果,即

$$\begin{cases} L_t = \sum_{j=1}^n U_{jt} b_j - \gamma_t \\ C_t = f(L_t) \end{cases} \quad (t = 1, 2, \dots, q) \quad (5)$$

式中: C_t ——网络实际输出; m ——学习样本数目; n ——输入层神经元个数; q ——输出层神经元个数; W_{ij} ——输入层至中间层的连接权; U_{jt} ——中间层至输出层连接权; θ_j ——中间层神经元的阈值; γ_t ——输出层神经元阈值; p ——中间层神经元个数。

网络训练过程如下:

- 给定一个(0,1)区间内随机值初始化权值和阈值。
- 给定输入模式对矢量和希望输出模式对矢量。
- 计算实际输出矢量。
- 从输出层开始,将误差信号反向传播,修正各权值,使误差最小。
- 用希望输出模式对 $Y_k = (y_{k1}, y_{k2}, \dots, y_{kq})$ 以及网络实际输出 C_t ,计算输出层各神经元一般化误差:

$$e_{kt} = (y_{kt} - C_t)C_t(1 - C_t) \quad (t = 1, 2, \dots, q) \quad (6)$$

- 计算中间层各神经元的一般化误差:

$$e_{kj} = \left(\sum_{t=1}^q e_{kt} U_{jt} \right) b_j (1 - b_j) \quad (j = 1, 2, \dots, p) \quad (7)$$

- 修正连接权和阈值:

$$\begin{cases} U_{jt, N+1} = U_{jt, N} + \xi e_{kt} b_j \\ \gamma_{t, N+1} = \gamma_{t, N} + \xi e_{kt} \end{cases} \quad (0 < \xi < 1) \quad (8)$$

式中 ξ 为学习率, $\xi \in (0, 1)$ 。

- 用中间层各神经元的一般化误差以及各神经元的输入模式向量修正 W_{ij} 和 θ_j ,直至网络全局误差函数 ζ 小于设定的极小值,选取下一学习模式对提供给网络,返回步骤 c,直至 m 个模式对训练完毕。

$$\zeta = \sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^q \frac{(y_{kt} - C_t)^2}{2} \quad (9)$$

3.2 参数反演步骤

需要反演的参数为各岩层弹性模量,根据中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院提供的弹性模量建议值范围和 BP 神经网络原理,参数反演的步骤如下:

- a. 正交化反演参数组合 选 $L_{18}(3^5)$ 正交表 共 5 个因素 3 个水平.
- b. 根据以上参数组合进行正演问题的求解 得到反映该工程区的系统输入和输出样本 其中 输出样本为各组合计算的位移残差 见表 2.

表 2 BP 神经网络训练样本
Table 2 Training samples of BP neural network

弹性模量 E/GPa					位移 残差/ mm^2	弹性模量 E/GPa					位移 残差/ mm^2
微新层 (E_1)	弱风化上层 (E_2)	弱风化下层 (E_3)	强风化层 (E_4)	断层 (E_5)		微新层 (E_1)	弱风化上层 (E_2)	弱风化下层 (E_3)	强风化层 (E_4)	断层 (E_5)	
15.00	4.00	2.00	0.15	0.61	145.55	20.00	8.00	4.00	0.35	0.61	82.08
20.00	8.00	3.00	0.25	0.65	81.73	25.00	12.00	2.00	0.15	0.65	54.91
25.00	12.00	4.00	0.35	0.69	54.56	15.00	4.00	3.00	0.25	0.69	145.13
25.00	8.00	3.00	0.15	0.69	54.65	25.00	4.00	4.00	0.25	0.65	54.99
15.00	12.00	4.00	0.25	0.61	144.45	15.00	8.00	2.00	0.35	0.69	144.00
20.00	4.00	2.00	0.35	0.65	82.26	20.00	12.00	3.00	0.15	0.61	82.71
20.00	12.00	2.00	0.25	0.69	81.52	15.00	12.00	3.00	0.35	0.65	145.14
25.00	4.00	3.00	0.35	0.61	55.32	20.00	4.00	4.00	0.15	0.69	82.91
15.00	8.00	4.00	0.15	0.65	144.02	25.00	8.00	2.00	0.25	0.61	55.74

- c. 采用 BP 神经网络对上述样本进行学习训练 在一定收敛条件下得到相应的权值矩阵和阈值向量.
- d. 采用训练后的 BP 神经网络 对实测位移所计算的位移增量进行网络仿真 得到调压井围岩力学参数. 位移残差最小的那个参数组合 即为最终确定的围岩力学参数组合 位移残差计算公式为

$$\delta = \sum_{\lambda=1}^l (h_{\lambda}(r) - \varphi_g)^2$$

(10)

式中 : $h_{\lambda}(r)$ ——测点 λ 的计算位移增量 ,mm ,与围岩力学参数组合 r 有关 本文 $r = \{E_1, E_2, E_3, E_4, E_5\}$;
 φ_g ——测点 λ 实测位移增量 ,mm ; l ——测点数.

4 成果分析

4.1 监测成果

糯扎渡水电站自 2008 年 1 月起布置了多点位移计对调压井工程区洞室进行监测 得到洞室开挖方量对应多点位移计孔口实测位移变化曲线如图 5 所示 洞室开挖时间和开挖方量对应关系见表 3.

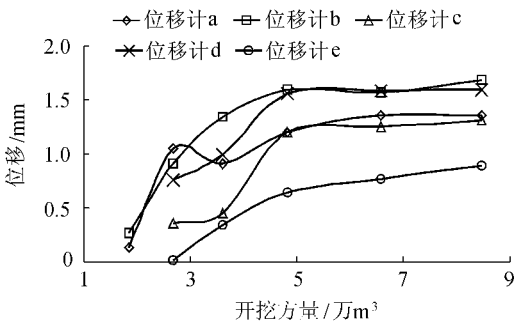


图 5 开挖方量对应孔口实测位移变化曲线

Fig. 5 Corresponding curves of orifice displacement and excavated quantity

由图 5、表 3 可知 洞室开挖后 拱顶位移随着开挖方量的增大而增大 局部减小是因为调压井区域其他洞室开挖或爆破的影响 最大位移发生在 1 号调压井与连通上室连接处 最大值 1.68 mm. 总之 围岩变形变化发展较缓慢 围岩变形符合岩体变形规律 变形较小 围岩稳定.

4.2 反演参数

采用训练完毕的 BP 网络 对任意输入的 10 000 个参数组合样本进行仿真计算 取误差指标为 10^{-3} ,学习率为 0.001 学习步长 0.1 训练 2 500 步即可收敛 图 6 为训练步数与收敛误差关系 通过仿真训练 可以得到最小位移残差 该位移残差所对应的参数组合样本即为达到最小值即全局最优值的最佳参数组合 反演得

表 3 开挖时间和开挖方量对应关系

Table 3 Corresponding relation between excavation time and excavated quantity

开挖步	开挖时间	开挖方量/ m^3
第 1 步	2008-01-14	18 463.00
第 2 步	2008-03-21	26 805.40
第 3 步	2008-04-23	36 038.80
第 4 步	2008-05-24	39 872.50
第 5 步	2008-06-24	48 307.80
第 6 步	2008-08-14	65 894.80
第 7 步	2008-09-15	84 706.80

到参数为 $E_1 = 24.11 \text{ GPa}$, $E_2 = 10.13 \text{ GPa}$, $E_3 = 3.16 \text{ GPa}$, $E_4 = 0.20 \text{ GPa}$, $E_5 = 0.62 \text{ GPa}$,对应最小位移残差为 16.82 mm^2 .

4.3 反演参数反馈成果分析

为分析反演参数的合理性 ,将反演得到的参数导入三维模型参与计算 ,并与监测得到的位移增量进行对比 ,各多点位移计监测位移增量和计算位移增量对比见图 7 ,监测位移和计算位移对比见图 8 ,高程 625.5 m 以上洞室开挖后位移矢量云图如图 9 所示 .

由增量对比可知 ,位移增量随洞室开挖时有增减 ,这主要受洞室开挖的进度、当前开挖区和监测点距离影响 ,且监测位移增量和计算位移增量变化趋势基本一致 ,各多点位移计孔口位移增量相对监测位移增量变化较小 ,其中 ,位移计 a 为 6.15% ,位移计 b 为 9.35% ,位移计 c 为 7.37% ,位移计 d 为 6.33% ,位移计 e 为 5.75% ,说明反演参数可靠 ;由位移对比可知 ,计算得到的位移和监测位移变化规律一致 ,计算值相对监测值要大 ,主要是因为洞室开挖后瞬间卸荷造成围岩瞬间变形 ,而该变形在多点位移计安装前产生 ,所以无法观测 ,最大监测位移 1.68 mm ,最大计算位移为 3.22 mm ,位移较小 ,围岩稳定 ;由位移矢量云图可知 ,洞室开挖后围岩变形主要朝临空面方向 ,这与监测成果也吻合 .

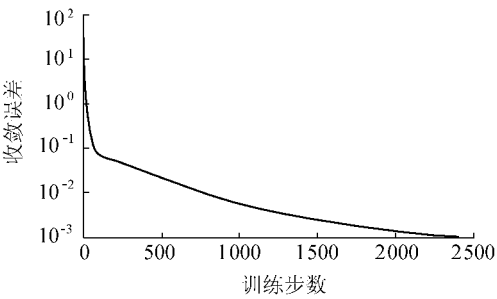


图 6 收敛误差和训练步数的关系
Fig. 6 Relationship between convergence error and training steps

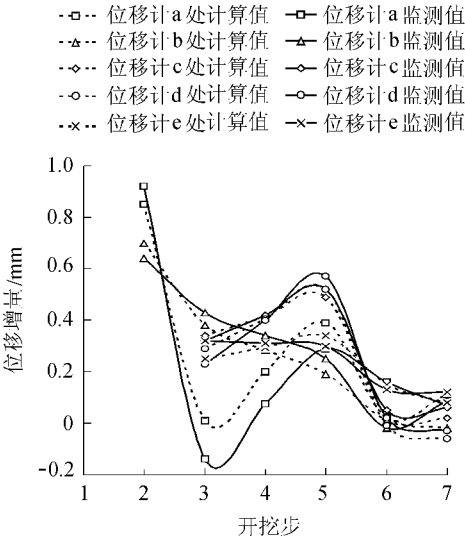


图 7 监测位移增量与计算位移增量对比
Fig. 7 Comparison between observed and calculated displacement increments

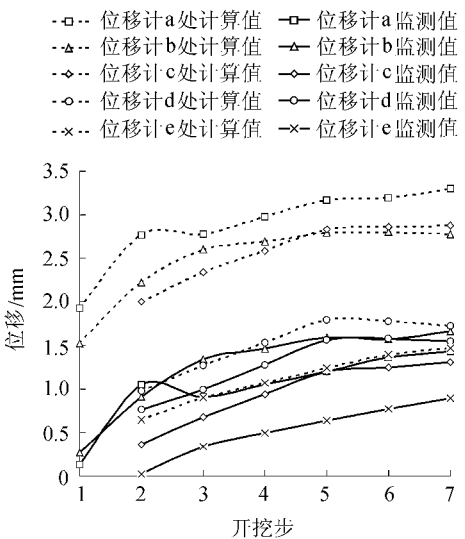


图 8 监测位移与计算位移对比
Fig. 8 Comparison between observed and calculated displacements

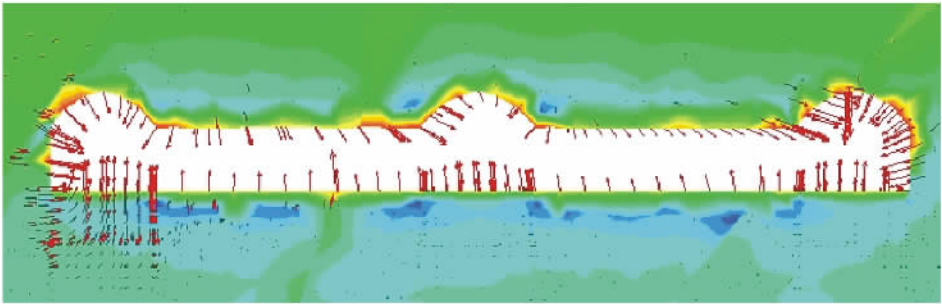


图 9 洞室开挖后位移矢量云图
Fig. 9 Nephogram of displacement vectors after excavation

5 结 论

- a. 监测资料分析表明,洞室开挖后,拱顶位移随着开挖方量的增大而增大,最大位移发生在 1 号调压井与连通上室连接处,最大值 1.68 mm.
- b. 各岩层弹性模量经过反演,微新层为 24.11 GPa,弱风化上层为 10.13 GPa,弱风化下层为 3.16 GPa,强风化层为 0.20 GPa,断层为 0.62 GPa,最小位移残差为 16.82 mm².
- c. 各反演参数经三维弹塑性反演计算表明,受洞室开挖进度、当前开挖区和监测点距离的影响,监测位移增量和计算位移增量变化趋势一致,计算位移增量相对监测位移增量变化较小,说明反演参数可靠,计算位移和监测位移变化规律一致,因实际开挖瞬间卸荷,计算位移比监测位移一般要大,计算位移最大值 3.22 mm,洞室开挖后围岩变形主要朝临空面方向,这与监测成果也吻合.
- d. 围岩变形变化发展较缓慢,围岩变形符合岩体变形规律,变形较小,围岩较稳定.

参考文献:

- [1] 石安池.岩石高边坡工程反馈设计实践与方法研究[D].南京:河海大学,2005.
- [2] KAVANAGH K T, CLOUGH R W. Finite element application in the characterization of elastic solid[J]. International Journal of Solids and Structures, 1971, 7(1): 11-23.
- [3] 杨林德, 黄伟, 王聿. 初始地应力位移反分析计算的有限单元法[J]. 同济大学学报:自然科学版, 1985(4): 69-76. (YANG Lin-de, HUANG Wei, WANG Yu. The finite element method for determining the initial earth stress by displacements in surrounding rock [J]. Journal of Tongji University: Natural Sciences, 1985(4): 69-76. (in Chinese))
- [4] SONMEZ H, ULUSAY R, GOKCEOGLU C. A practical procedure for the back analysis of slope failure in closely jointed rock mass[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1998, 35(2): 219-333.
- [5] DENG J H, LEE C F. Displacement back analysis for a steep slope at the Three Gorges Project site[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(2): 259-268.
- [6] DE MELLO FRANCE J A, ARMELIN J L, SANTIAGO J A F, et al. Determination of the natural stress state in a Brazilian rock mass by back analyzing excavation measurements: a case study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2002, 39(8): 1005-1032.
- [7] FU Shao-jun, CHEN Sheng-hong. Feedback analysis of the intake slope of Longtan Hydropower Project, China[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(3): 518.
- [8] 苏怀智, 雷鹏, 顾冲时, 等. 混凝土坝材料参数区间反演分析方法[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2008, 36(5): 654-658. (SU Huai-zhi, LEI Peng, GU Chong-shi, et al. Interval back analysis for mechanical parameters of a concrete dam[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(5): 654-658. (in Chinese))
- [9] 周家文, 徐卫亚, 童富果, 等. 糯扎渡水电站 2 号导流洞三维非线性有限元反分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1527-1535. (ZHOU Jia-wen, XU Wei-ya, TONG Fu-guo, et al. Back analysis for the diversion tunnel No.2 of Nuozhadu Hydropower Station by use of 3D nonlinear finite element method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(10): 1527-1535. (in Chinese))
- [10] 杨有海, 王长虹. 考虑时空效应的隧道工程黏弹性位移反分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(3): 468-472. (YANG You-hai, WANG Chang-hong. Elastic-visco displacement back analysis in tunnel engineering considering temporal-spatial effect[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(3): 468-472. (in Chinese))
- [11] 周建春, 魏琴, 刘光栋. 采用 BP 神经网络反演隧道围岩力学参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 941-945. (ZHOU Jian-chun, WEI Qin, LIU Guang-dong. Back analysis on rock mechanics parameters for highway tunnel by BP neural net work method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 941-945. (in Chinese))
- [12] 张晓飞, 李守义, 陈尧隆, 等. 改进的 BP 神经网络在碾压混凝土坝温度场反分析中的应用[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(1): 95-99. (ZHANG Xiao-fei, LI Shou-yi, CHEN Yao-long, et al. Application of improved BP neural network in back-analysis of temperature field in RCC dam[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 25(1): 95-99. (in Chinese))
- [13] 郭立, 马东霞, 吴爱祥, 等. 岩体力学参数灵敏度分析的正交有限元法[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2004, 35(1): 138-141. (GUO Li, MA Dong-xia, WU Ai-xiang, et al. Sensitivity analysis of rock mass mechanics parameters by orthogonal finite-element approach[J]. Journal of Central South University of Technology: Natural Science, 2004, 35(1): 138-141. (in Chinese))
- [14] 张继勋, 姜弘道, 任旭华. 岩体参数对隧洞围岩稳定性影响的敏感性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(2): 169-173. (ZHANG Ji-xun, JIANG Hong-dao, REN Xu-hua. Sensitivity analysis of mechanical parameters influencing stabilization of surrounding

rocks of tunne[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(2):169-173.(in Chinese))

[15] 焦李成. 神经网络的应用与实现[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1993: 35-40.

Inversion and feedback analysis of mechanical parameters of surrounding rock of relief well of Nuozhadu Hydropower Station

NIE Wei-ping^{1,2}, YANG Yun-hao^{1,2}, SHI Chong^{1,2}, LIU Xing-ning³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Kunming Hydroelectric Investigation, Design and Research Institute of China Hydropower Engineering Consulting Group Co., Kunming 650051, China)

Abstract: Based on the characteristics of project area of relief well of Nuozhadu Hydropower Station, a 3D mathematical model was established. The elastic moduli of various rock strata in the project area were inversed according to the analysis of measured displacements, the method of BP neural network and the principle of the minimum residual error. Furthermore, the inversed parameters were introduced into the model for 3D elastic-plastic feedback calculation. The inverse analysis of the measured displacements show that the crown displacement of the relief well increases with the increase of excavated quantity, the maximum displacement of 1.68 mm occurs at the connecting point of the 1st relief well and the upper chamber. The inversed elastic moduli of various rock strata are as follows: 24.11 GPa for fresh rock mass, 10.13 GPa for the superstratum of slightly weathered rock mass, 3.16 GPa for the substratum of slightly weathered rock mass, 0.20 GPa for strongly weathered rock mass and 0.62 GPa for fault. The minimum residual is 16.82 mm². The observed and calculated displacements and displacement increments basically have the same variation tendency, indicating that the inversed parameters are reliable. The calculated displacement is generally larger than observed one because of instantaneous unloading during actual excavation, and the largest calculated displacement is 3.22 mm. The deformation direction of surrounding rock is mainly towards the free face, the deformation is small, and the surrounding rock is relatively stable.

Key words: 3D elastic-plasticity; inversion; feedback; displacement increment; BP neural network; surrounding rock; relief well; Nuozhadu Hydropower Station