

BP神经网络在隧道围岩力学参数反演中的应用

文辉辉¹,尹健民²,秦志光¹,谢仁红¹

(1. 中交四航工程研究院有限公司 交通基础工程环保与安全重点实验室, 广州 510230;

2. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010)

摘要:以谷城至竹溪高速公路珠藏洞隧道施工监测为工程依托,根据现场变形监测数据的指数函数回归方程,对最终变形量进行了预测,并基于其预测值,借助BP神经网络的超强非线性映射能力,对隧道围岩力学参数(变形模量 E 、黏聚力 C 、内摩擦角 φ)进行反演,以及及时掌握开挖围岩类型和材料特性参数,为隧道工程施工和设计提供参数依据,从而达到安全施工和优化设计的目的,以实现隧道的信息化施工与设计。

关键词:最终变形量;BP神经网络;隧道围岩;力学参数;反演

中图分类号:TU45 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-5485(2013)02-0047-05

1 研究背景

地下工程反馈和控制研究是岩土工程研究中的重要课题之一,大量学者对其开展了科学研究工作。信息化施工的主要特点是信息的处理和利用,然而由于岩土工程问题的特殊性和复杂性,使得地下工程信息化施工非常复杂,但随着有限元等数值计算技术的发展及对监测工作的逐渐重视,以现场变形为基本信息的智能信息处理技术,凭借其自身独特的优势,已成为地下工程信息化施工研究的一种有效方法^[1-3]。

以施工监测和信息反馈为显著特征的信息化设计,是将监测技术、力学计算及经验评估等结合为一体的地下工程设计方法^[4]。信息化设计通过建立施工过程中的监测系统,迅速、准确地获取围岩和支护结构的变形动态变化情况,并以现场变形为基本信息开展围岩参数反演工作,从而对围岩及支护参数等进行修正,为隧道工程设计、施工提供参数依据。

由于隧道围岩的力学参数与其变形之间复杂的非线性关系,本文借助神经网络的超强非线性映射能力,采用BP神经网络模型对谷城至竹溪高速珠藏洞隧道开挖所揭露的围岩变形模量 E 、黏聚力 C 、内摩擦角 φ 进行位移反分析,以及及时掌握开挖围岩类型和材料特性参数,从而达到安全施工和优化设计的目的,以实现隧道的信息化施工与设计。

2 工程概况

珠藏洞隧道是谷城至竹溪高速公路中的一条分离式隧道,位于湖北省保康县寺坪镇境内,地处青峰断裂带区域。隧道按双向四车道进行设计,左洞全长2356 m,右洞全长2290 m,设计净宽10.25 m,净高5.5 m^[5]。

隧址区在大地构造上位于扬子准地台(扬子克拉通)北缘的青峰台褶皱束,地形起伏较大,植被较发育,走向近东西向,略向北突出。隧道进出口斜坡较陡,地处偏压段和断层破碎带,基岩出露,地表出露基岩主要为奥陶系($O_{1n}-O_3S_1$)生物碎屑夹少量炭质页岩、粉砂质页岩,下寒武统(ϵ_{1t+sl})泥质条带灰岩、炭质灰岩局部含页岩夹层,以及上震旦统-下寒武统灯影组($Z_2\epsilon_{1dn}$)白云岩夹灰岩,较松散,下层主要为强风化灰岩,遇水稳定性极差。隧道穿越区域围岩条件比较复杂,涵盖II-V类围岩。以白云岩、灰岩等为主,有3条规模不等的断层,以大角度穿越,分别为F7-2, F8-2, F9-2,该系列断层破碎带一般宽度为30~200 m,延伸长度一般大于2 km,均穿越隧道洞身,使围岩局部较破碎,且以EW方向为主,对隧道影响较大。

地表水系较发育,地下水主要为松散岩类孔隙水及基岩裂隙水,水量呈季节性变化^[5]。

3 围岩参数反演的神经网络原理

围岩位移智能反分析法的基本思路是:以现场监测围岩变形为基本信息,通过 ANSYS 软件建立其相应学习样本和测试样本,利用神经网络建立待反演参数与围岩变形之间的潜在映射关系,通过网络输出误差对网络连接权进行修正,从而实现网络的映射功能。假设隧道围岩力学参数(变形模量 E ,黏聚力 C ,内摩擦角 φ)与围岩变形 δ 之间的非线性映射关系为 $\delta = f(E, C, \varphi)$,借助人工神经网络可近似对其进行实现(如图 1 所示)。如果这个映射已经建立,则令输入为 δ 时,其网络输出就是所求的变形模量 E 、黏聚力 C 、内摩擦角 φ 。

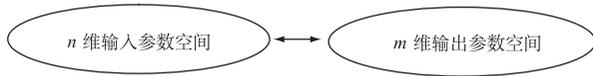


图 1 神经网络映射示意图

Fig. 1 Schematic of neural network mapping

神经网络围岩参数反演具体步骤如下:

(1) 运用正交试验理论对变形模量 E 、黏聚力 C 、内摩擦角 φ 进行离散化处理,构造有限元计算所需的参数取值样本,借助 ANSYS 软件对围岩拱顶沉降和边墙水平收敛的最终变形量进行模拟,建立岩体力学参数与围岩变形之间的映射集,然后将隧道围岩变形稳定值看作输入值,岩体力学参数看作输出值,即可得到隧道围岩变形量与力学参数间的神经网络训练样本。

(2) 利用不同的网络结构对神经网络样本进行训练,选择最优的隐含层数和隐含节点数。对于 BP 神经网络而言,网络结构中的输入层和输出层单元数由具体问题而定,对于隐含层, Kosmogorov 定理说明了在合理和恰当的权值条件下,3 层前馈神经网络可以逼近任意连续的函数,但定理中没有给出如何确定这种合理结构。常用于选择最佳隐含层单元节点数的参考公式为

$$L = \sqrt{m + n} + a \quad (1)$$

式中: m 为输出神经元数; n 为输入神经元数; a 为 $[1, 10]$ 之间的常数。

(3) 由于 S 型激活函数具有中间高增益、两端低增益的特性,数据在远离零的区域学习收敛速度较慢,需将输入输出节点值进行归一化处理。设 x_{\max} 和 x_{\min} 分别代表每组节点的最大值和最小值,则相应归一化的变量为

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

(4) 将第(1)条所获得的学习样本在 MATLAB 平台上进行 BP 网络设计与训练,利用其收敛条件下对应的权值矩阵、阈值向量及围岩拱顶沉降和边墙水平收敛最终变形量值进行网络仿真,反演得到相应围岩力学参数。

(5) 以第(4)条中反演获得的围岩力学参数作为计算参数,再次代入有限元软件进行正分析,即可对隧道开挖过程进行模拟。

4 隧道围岩参数反演

4.1 监测数据的回归分析

现场监测所取得的原始数据往往具有一定的离散性,包含偶然误差等因素的影响,根据测试数据绘制的时间变化散点图上下波动较大,难以据此进行分析,因此,必须应用数学方法对监测数据进行回归分析并运用数学公式进行描述^[6]。回归分析通过对监测数据及时的分析与处理,可以较好地得到隧道围岩时态曲线,预测围岩最终变形量,已成为处理原始数据的主要采用手段。

为掌握隧道开挖后围岩的稳定情况和开展岩体力学参数反分析研究,本文基于监测断面 ZK62 + 160 的变形监测数据,利用指数函数回归分析模型,对其实测变形值进行回归分析,分别得到拱顶沉降值(u_1)和边墙收敛值(u_2)随时间(t)的变化关系。具体回归方程为:

$$u_1 = 1.1747e^{-1.3061/t} \quad ; \quad (3)$$

$$u_2 = 3.6044e^{-1.3364/t} \quad 。 \quad (4)$$

根据隧道喷锚构筑法技术规范(TB10108—2002)^[7]规定,当围岩的变形速率持续下降,且小于 0.2 mm/d 时,表明围岩趋于稳定状态,可以进行二次衬砌支护。根据指数函数方程可知,拱顶沉降变形和边墙收敛变形分别在 3 d 和 5 d 后小于 0.2 mm/d,累计沉降值分别为 0.760 1, 2.758 7 mm,与实际情况基本一致,因此,指数函数完全适用于断面沉降变化,回归数据可靠,可以作为围岩稳定性判定的依据。

4.2 数值模拟

基于施工过程中遇到的实际问题,结合现场监测数据和地质勘察资料,选择隧道断面 ZK62 + 010 至 ZK62 + 160 段进行 ANSYS 数值模拟,数值模拟区域围岩等级为 III 级,以中风化白云岩夹灰岩为主,节理裂隙不发育,岩体完整性较好,围岩较为稳定,具体工程地质情况如图 2 所示。

由弹性力学^[8]理论基础可知:当距离为 3 倍洞

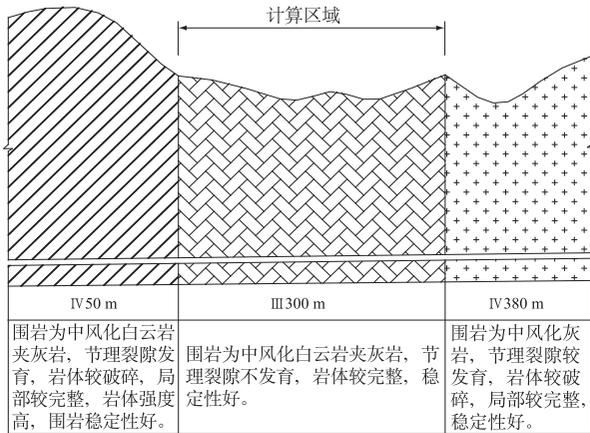


图 2 工程地质平面图

Fig.2 Geological plan of the project

径时, 径向及切向应力与原岩应力之差小于 4%。根据隧道的开挖跨度和设计要求, 结合空间效应的影响, 采用三维弹塑性模型进行数值模拟计算, 选取了 300 m × 95 m × 150 m 的计算区域, 为方便计算, 将锚杆和钢筋网的增强作用等效到混凝土强度中, 围岩初期支护厚度为 10 cm, 初期支护和围岩分别使用 Shell181 和 Solid45 单元进行模拟。

根据工程地质勘察报告和工程经验, 选取围岩参数的取值范围见表 1。

表 1 围岩及支护结构力学参数

Table 1 Mechanical parameters of surrounding rock and supporting structure

材料	变形模量/ GPa	泊松比	密度/ (kg · m ⁻³)	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)
Ⅲ类围岩	10 ~ 20	0.26	2 400	1.0 ~ 1.2	62 ~ 68
衬砌混凝土 (C30)	26	0.18	2 400	2	48

计算区域共划分为 22 100 个四边形单元, 24 248 个节点, 支护结构单元网格和有限元网格模型分别如图 3、图 4 所示。

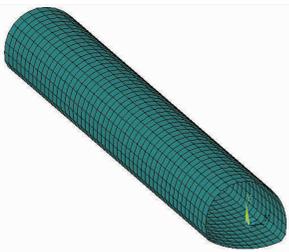


图 3 支护结构网格模型
Fig.3 Grid model of the supporting structure

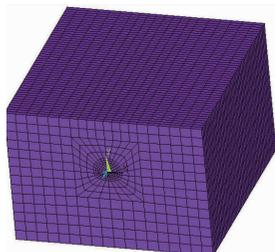


图 4 有限元网格图
Fig.4 The finite element grids

根据隧道力学理论, 对边界条件的处理主要考虑了在自重作用和构造作用下隧道开挖后的变形变化情况。计算模型的约束情况为: 侧面为水平向约束, 垂直向自由; 底部边界为垂直向约束, 水平向自由。

采用岩体实测密度计算自重应力作用下产生的监测点变形值。周边应力场测试结果^[9]表明: 在隧道工程区域, 最大水平主应力方位与隧道轴线方向基本平行, 最大水平主应力侧压力(σ_H/σ_z)系数约为 1.3, 最小主应力侧压力(σ_h/σ_z)系数约为 0.9。因此, 在进行工程区域应力场模拟时, 隧道轴线方向施加 1.3 γh 的构造应力, 垂直轴线方向为 0.9 γh 的构造应力。其中, 对隧道开挖过程的数值模拟, 通过有限元生死单元实现。

由于数值模拟区域地质条件较好, 施工单位采用钻爆法进行全断面开挖, 每循环进尺 3 m 左右, 其开挖过程示意图如图 5 所示。

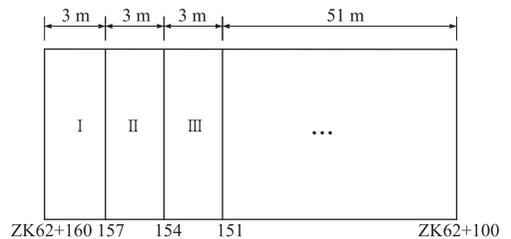


图 5 隧道开挖示意图

Fig.5 Schematic diagram of the tunnel excavation

ANSYS 模拟开挖过程的计算步骤如下:

第 1 步: 计算模型在应力作用下达到平衡, 将全部结点变形置为零。

第 2 步: 开挖断面 ZK62 + 160 至 ZK62 + 157 段, 即第 I 部分围岩; 同时, 在断面 ZK62 + 160 断面处设置 1, 2, 3 共 3 个监测点, 计算平衡模型下的拱顶及边墙变形变化情况。

第 3 步: 在断面 ZK62 + 160 至 ZK62 + 157 段支护结构施工初期, 计算平衡模型以及监测点 1, 2, 3 围岩变形。

第 4 步: 忽略时间效应影响, 考虑空间效应, 开挖第 II 部分围岩, 计算平衡模型以及监测点 1, 2, 3 的变形。

依次进行开挖, 直到开挖围岩变形速度较小或趋于稳定为止。

4.3 样本构造

为了构造神经网络的学习样本, 采用正交试验设计方法设计试验方案, 其中试验因素为 3 个参数, 即 E, C 和 φ , 且每个因素分为 3 个水平, 各参数水平划分见表 2。

研究试验含有 3 个试验参数、3 个水平。在进行正交试验设计时采用正交表 $L_9(3^4)$, 试验结果如表 3 所示。

根据正交表 $L_9(3^4)$ 将各试验因素水平进行组

表2 参数水平划分
Table 2 Parameter levels

水平	E/GPa	C/MPa	$\varphi/(\text{°})$
1	10	1.0	62
2	15	1.1	65
3	20	1.2	68

表3 正交实验表
Table 3 List of orthogonal test

试验编号	各试验因素水平			
	因素1	因素2	因素3	因素4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

合得到试验方案,用数值模拟软件 ANSYS 计算各试验方案下断面 ZK62 + 160 上监测点 1,2,3 的变形变化情况,由此得到神经网络的训练样本。训练样本如表 4 所示。

表4 神经网络训练样本
Table 4 Training samples of neural network

编号	输入值			输出值	
	E/GPa	C/MPa	$\varphi/(\text{°})$	拱顶沉降/mm	边墙收敛/mm
1	10	1.0	62	0.989 7	3.600 0
2	10	1.1	65	0.848 2	3.085 1
3	10	1.2	68	0.849 3	3.089 1
4	15	1.0	65	1.021 4	3.715 0
5	15	1.1	68	0.754 4	2.743 9
6	15	1.2	62	0.764 9	2.782 1
7	20	1.0	68	0.673 9	2.451 1
8	20	1.1	62	0.723 7	2.632 2
9	20	1.2	65	0.802 6	2.919 2

4.4 结果分析

MATLAB 将高性能的数值计算和可视化集成在一起,并提供了大量内置函数,从而被广泛地应用于科学计算、控制系统、信息处理等领域的分析、仿真和设计工作^[10]。本文利用含有 1 个隐含层的 3 层 BP 网络模型,通过 Matlab 语言编制围岩参数预测程序进行网络训练。输入层有 2 个神经元,输出层有 3 个神经元,通过试算取隐含层神经元个数为 9 个,输入层和隐含层之间采用双曲正切激活函数 tansig,隐含层和输出层之间的激活函数采用线性函数 purelin,训练函数取为 trainlm,期望误差为 $1e^{-10}$ 。网络的输入向量为实测样本下的变形,输出向量为待反演参数。

对训练样本进行训练,最佳网络结构的网络误差曲线如图 6 所示。

将断面 ZK62 + 160 的围岩拱顶沉降和边墙水平收敛最终变形量分别输入到训练好的网络中,得到围岩反演力学参数分别为:岩体变形模量 E 为 14.7 GPa,黏聚力 C 为 1.2 MPa,内摩擦角 φ 为 63.8° 。

基于隧道围岩参数反演结果,对隧道施工过程进行有限元正分析,获得断面 ZK62 + 160 的围岩拱顶沉降和边墙水平收敛最终变形量分别为 0.769 7, 2.760 4 mm,与实测情况基本一致,反演参数可靠。断面 ZK62 + 160 的拱顶沉降和边墙收敛变形的时态曲线如图 7、图 8 所示。

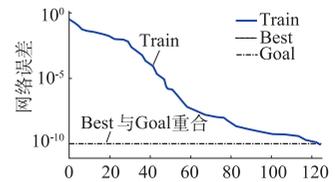


图6 网络误差变化曲线
Fig.6 Variation of errors of the network

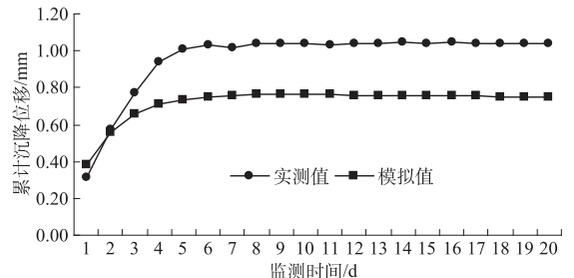


图7 拱顶沉降变形随时间变化曲线
Fig.7 Curves of settlement of the tunnel roof vs. time

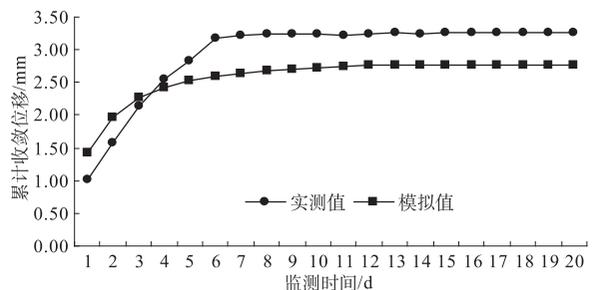


图8 周边收敛变形随时间变化曲线
Fig.8 Curves of peripheral convergence deformation vs. time

从图 7、图 8 中看出,实测值和模拟值下的围岩变形趋势基本一致,围岩变形均随着时间的增加而逐渐减小,最后趋于稳定,模拟值的变形曲线位于实测值的变形曲线之下。总体而言,隧道围岩变形发展呈 3 个阶段:

- (1) 急剧变形阶段。隧道开挖后围岩初始变形速率最大,以后逐渐降低,变形与时间关系呈下弯型;
- (2) 缓慢变形阶段。随着变形速率的逐渐减小,围岩变形越来越小,时态曲线趋于平缓;
- (3) 变形稳定阶段。围岩变形速率逐渐趋近于零,变形不再增加。

5 结 论

本章首先采用正交试验理论对围岩力学参数取值样本进行确定,借助 BP 神经网络强大的非线性映射能力,对围岩力学参数与收敛变形间的非线性关系进行了映射,以回归分析最终变形量值作为输入值,对围岩力学参数进行了反演。并依据反演结果,利用 ANSYS 有限元软件对隧道开挖过程进行模拟。主要结论如下:

(1) BP 神经网络适用于描述岩土体变形与力学参数间的非线性关系。将现场监测资料应用于隧道围岩力学参数反演研究,为安全施工和优化设计、实现隧道信息化施工创造了条件。

(2) 拱顶沉降和边墙收敛变形的变形曲线近似为“厂”字形分布,围岩边墙收敛变形稳定所需时间大于拱顶沉降所需时间,应以边墙收敛变形作为开挖围岩稳定性和二次衬砌施作时间判定的依据。

(3) 基于回归分析最终变形量开展围岩力学参数反演分析,可以对隧道围岩稳定情况做出合理的评价和符合实际的预测。

参考文献:

- [1] 孙新民,孙红月,严细水. FBG 传感器在量测围岩内部位移中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 3847-3851. (SUN Xin-min, SUN Hong-yue, YAN Xi-shui. Application of FBG Sensor to Internal Displacement Monitoring of Surrounding Rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 3847-3851. (in Chinese))
- [2] 杨平,覃卫民,杨育,等. 密集建筑群下大断面隧道施工反馈分析及安全性控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 795-803. (YANG Ping, QIN Wei-min, YANG Yu, et al. Study of Feedback Analysis and Safety Control of Large-Section Tunnel Excavation under Intensive Buildings [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 795-803. (in Chinese))
- [3] 崔东文,郭荣. 基于概率神经网络的文山州水资源

- 配置合理性评价分析[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(10): 57-62. (CUI Dong-wen, GUO Rong. Evaluation of Rational Water Allocation Based on Probabilistic Neural Network: Case Study of Wenshan Prefecture [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(10): 57-62. (in Chinese))
- [4] 曹国金,姜弘道,张建斌. 信息化设计技术及在隧道工程施工中的应用[J]. 施工技术, 2002, (1): 39-40. (CAO Guo-jin, JIANG Hong-dao, ZHANG Jian-bin. Application of Information Design Technique in Tunnel Engineering [J]. Construction Technology, 2002, (1): 39-40. (in Chinese))
- [5] 湖北省交通规划设计院. 谷竹高速公路珠藏洞隧道工程勘察报告[R]. 武汉:湖北省交通规划设计院, 2010. (Hubei Provincial Communication Planning and Design Institute. Investigation Report of Zhuzang Tunnel of Gucheng-Zhuxi Highway [R]. Wuhan: Hubei Provincial Communication Planning and Design Institute, 2010. (in Chinese))
- [6] 李晓红. 隧道新奥法及其量测技术[M]. 北京:科学出版社, 2002. (LI Xiao-hong. New Austrian Tunneling Method [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [7] TB10108—2002, 铁路隧道喷锚构筑法技术规范[S]. 北京:中国铁道出版社, 2003. (TB10108—2002, Code for Shot Crete-bolt Construction Method of Railway Tunnel [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2003. (in Chinese))
- [8] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2008. (XU Zhi-lun. Elastic Mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese))
- [9] 罗超文,李海波,黄理兴. 湖北省谷竹高速公路大坪山隧道地应力测试报告[R]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所, 2010. (LUO Chao-wen, LI Hai-bo, HUANG Li-xing. Report of In-Situ Stress Measurement for Dapingshan Tunnel of Gucheng-Zhuxi Highway in Hubei Province [R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics of Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese))
- [10] 周开利,康耀红. 神经网络模型及其 MATLAB 仿真程序设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2005. (ZHOU Kai-li, KANG Yao-hong. Neural Network Model and the Simulation Program Design in MATLAB [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese))

(编辑:姜小兰)

Application of BP Neural Network to the Back Analysis of Mechanical Parameters of Tunnel Surrounding Rock

WEN Hui-hui¹, YIN Jian-min², QIN Zhi-guang¹, XIE Ren-hong¹

(1. Key Laboratory of Environmental Protection & Safety of Transportation Foundation Engineering, CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the MWR, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The aim of this research is to ensure the construction safety and optimize the design of tunnels using

(下转第 56 页)