

基于人工神经网络的初始地应力场三维反分析

蒋中明,徐卫亚,邵建富

(河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

摘要 通过对初始地应力场的计算方法的回顾,结合有限变形理论和人工神经网络理论,提出基于人工神经网络的初始地应力场三维反分析方法.该方法综合了目前初始地应力场计算方法的优点,并考虑了多种因素对地应力场分布的影响.实例表明,按本文提出方法模拟的初始地应力场较为合理,且其精度也较高.此外,由于考虑了断层对初始地应力场的影响,可较好地解释实测地应力值分散的原因.

关键词 人工神经网络;初始地应力场;有限变形理论;三维反分析

中图分类号 :TU452;TP183 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2002)03-0052-05

地应力(场)是岩石力学研究的基本内容之一.工程建筑地区的区域稳定性和许多建筑物的稳定性研究是否合理,往往取决于是否提供了一个正确的地应力场.地应力(天然应力)与初始应力(原始应力,一次应力)的概念是不同的,后者是相对于施工开挖后造成的应力重分布(二次应力)而言,是指开挖前某一特定时间的地应力场.从地质年代来看,地应力是随空间、时间而变化的非稳定场.对于工程建设,初始应力场可视为忽略时间因素的相对稳定应力场^[1,2].

地应力是地壳运动的结果,它决定于历次构造运动所产生的应力,地壳升降运动引起的加荷、卸荷,岩浆活动的温差应力,岩体物理力学性质的变化等.但是,目前还不可能做到定量地以地球发展的历史为根据去求解可供工程应用的初始地应力场.可供工程应用的初始地应力值,主要靠实测资料,但少数测点又难以满足工程建设的需要.这就提出了如何利用少数测点去反演建筑物地区的初始地应力场问题.目前,初始地应力的计算方法大致有以下几种^[3~9]:(a)岩体自重应力场是岩体初始应力场;(b)海姆法则(Heim's hypothesis);(c)侧压力系数法;(d)边界荷载调整法;(e)有限元数学模型回归分析法;(f)地应力场的趋势分析;(g)三维有限元反演法等等.前3种方法比较简单,在某些情况下也可用于工程初步设计,特别是在中小型工程有较为广泛的应用.而后4种方法比较复杂,都必须结合有限元进行分析以模拟岩体中的初始地应力场.

以上各种方法都有各自的适用条件、适用范围.对多数岩体工程来说,以现场部分实测数据为基础,考虑地形、地质等方面的特点进行相应的理论或数值分析进行反演、回算和模拟,以推断地应力量值和给出初始地应力场模式是一种重要而又较为有效的途径之一.该途径的最重要环节之一是回算分析.反演回算主要有两种方式:根据现场实测的位移资料参照当地岩石力学特性来推算地应力的方向和大小;根据工程区域某些控制点的实测应力值,考虑地形、地质、岩性等,通过反演模拟计算给出地应力场模式.

本文把有限变形理论和人工神经网络理论的优点结合起来,利用有限变形理论进行正分析,然后利用人工神经网络的高度非线性特征计算模型的荷载边界条件和各种名义参数,再将得到的荷载边界条件应用于正分析程序之中,从而模拟岩体的初始地应力场.

1 有限变形基本理论

有限变形问题主要针对塑性变化历程及延性破坏机制等问题而提出的.最初的想法是在60年代初由Turner, Dill, Martin, Melosh等提出,70年代前期在理论上得到较为成熟的发展,奠定了有限变形理论的基础.

收稿日期 2001-11-13

基金项目 国家自然科学基金资助项目(50128908)和法国国家科研中心(CNRS)资助

作者简介 蒋中明(1969—)男,重庆璧山人,讲师,博士,主要从事岩土工程研究.

有限变形是指岩体内部质点的位移和旋转,如果忽略不计会对平衡方程产生严重影响.在处理有限变形问题时,对材料的非线性给予考虑,使由变形造成的对内外力平衡的影响在计算中得以体现,所以需要一种兼顾材料非线性和几何学上的非线性的一般性非线性解析法,其中包含了在微小变形理论中未给予考虑的一些因素.有限变形理论通过求解运动方程和结构方程,进而计算出模型的应力、应变和位移.

1.1 运动方程式

Cauchy 运动方程式:

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i = \rho \frac{dv_i}{dt} \tag{1}$$

式中: ρ ——材料比重; b ——单元物质的物体力; $\frac{dv_i}{dt}$ ——速度的材料导函数.式(1)为在受外力作用时质点的运动状态,在静力平衡状态下,加速度为 0,故式(1)可表示为

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i = 0 \tag{2}$$

1.2 结构方程式

由结构方程式,可以推导出 6 个关系式:

$$\sigma_{ij}^N = H_{ij}(\sigma_{ij}, \xi_{ij}, k) \tag{3}$$

式中: σ_{ij}^N ——相互旋转应力速度张量; H ——设定函数; k ——考虑了加载过程的参数.相互旋转应力速度张量:

$$\sigma_{ij}^N = \frac{d\sigma_{ij}}{dt} - \omega_{ik}\sigma_{kj} + \omega_{kj}\sigma_{ik} \tag{4}$$

式中: $\frac{d\sigma_{ij}}{dt}$ —— σ 的材料时间导数; ω ——旋转速度.

根据(2)(3)(4)方程、边界条件及初始条件,再加上应变速度 $\xi_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i})$ 的 6 个关系式构成 15 个方程.由这 15 个方程式可以求得应力速度和应变速度张量各 6 个,速度矢量 3 个,共 15 个未知数.

2 BP 网络的模型

神经网络的模型选择采用 BP(Back Propagation)网络模型. BP 网络模型是把一组样本的输入、输出变成非线性优化问题.如果输入层有 n 个神经元,输出层有 m 个神经元,则网络是从 n 维欧氏空间到 m 维欧氏空间的映射.通过调整 BP 网络中的连接权值、网络的规模(包括 n 、 m 和隐层节点数),就可以实现任意精度逼近任何非线性函数. BP 网络通过对简单的非线性函数的复合来完成映射,用这种方法经过少数的几次复合就可以得到极为复杂的函数关系,进而可以表达复杂的物理世界现象,使得许多实际问题都可以转为利用神经网络来解决.

BP 网络由输入层、输出层及隐含层组成,隐含层可有一个或多个,每层由多个神经元组成.当信号输入时,首先传到隐节点,经过作用函数后,再把隐节点的输出信号传播到输出层节点,经过处理后输出结果.

2.1 输入输出样本向量获取

通过改变边界荷载的方法,利用基于有限变形理论的计算程序进行正分析计算.其目的是为了获得边界荷载(用于模拟构造应力的荷载)作用下应力与边界荷载、物理力学参数之间的映射对应关系.并以此应力值作为输入样本向量,将对应的边界荷载及物理力学参数作为输出向量.

经过人工神经网络模型的学习识别,获取各种影响因素对映射关系影响的权重,即可获得反演计算所需的映射模式.当把实测应力作为新输入样本赋予模型后,即可得到唯一的与之对应的计算边界荷载和相应岩石力学参数.

2.2 正向传递

对于给定的 N 个样本,网络的期望输出为

$$T_d = [T_{d_1}, T_{d_2}, \dots, T_{d_N}]$$

当输入第 n 个样本时,对于网络中的第 $l(l = 1, 2, \dots, L)$ 层第 j 个神经元的输入、输出分别为

输入

$$\text{net}_{jn}^{(l)} = \sum_{i=1}^{n_{l-1}} W_{ji}^{(l)} O_{in}^{(l-1)}$$

输出

$$O_{jn}^{(l)} = f(\text{net}_{jn}^{(l)})$$

神经网络学习的目的是实现对每一样本

$$E_n = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (T_{jdn} - \hat{T}_{jn})^2 \quad (n = 1, 2, \dots, N)$$

达到最小,从而保证网络总误差

$$E = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N E_n$$

极小化. 其中 T_{jdn} , $\hat{T}_{jn}$ 分别为输出层第 j 个节点的期望输出和实际输出.

2.3 反向传递

采用梯度算法对网络权值、罚值进行修正. 第 l 层的权系数迭代方程为

$$\begin{aligned} W(k+1) &= W(k) - \eta \Delta E_n \quad W = W_{ij} \\ \Delta E_n &= \frac{\partial E_n}{\partial w_{ij}^{(l)}} = \frac{\partial E_n}{\partial \text{net}_{jn}^{(l)}} \frac{\partial \text{net}_{jn}^{(l)}}{\partial w_{ij}^{(l)}} = \frac{\partial E}{\partial \text{net}_{jn}^{(l)}} O_{in}^{(l-1)} \end{aligned}$$

式中: η ——学习步长; k ——迭代次数. 令

$$\delta_{nj}^{(l)} = \frac{\partial E_n}{\partial \text{net}_{jn}^{(l)}}$$

作为节点误差.

2.4 学习过程

(a)网络初始化,用一组随机数对网络赋初始权值,设置学习步长 η 、允许误差 ϵ 、网络结构(即网络层数 L 和每层节点数 n_l);(b)为网络提供一组学习样本;(c)对每个学习样本 n 循环,逐层正向计算网络各节点的输入和输出,计算第 n 个样本的输出误差 E_n 和网络的总误差 E ,当 E 小于允许误差 ϵ 或者达到指定的迭代次数时,学习过程结束,否则,进行误差反向传播,反向逐层计算网络各节点误差 $\delta_{jn}^{(l)}$:

输出层

$$\delta_{jn}^{(l)} = O_{jn}^{(l)} (1 - O_{jn}^{(l)}) (y_{jdn} - O_{jn}^{(l)})$$

隐含层

$$\delta_{jn}^{(l)} = O_{jn}^{(l)} (1 - O_{jn}^{(l)}) \sum \delta_{jn}^{(l+1)} w_{kj}^{(l+1)}$$

修正网络连接权值

$$W_{ij}(k+1) = W_{ij}(k) + \eta \delta_{jn}^{(l)} O_{in}^{(l-1)}$$

根据上述原理,编制了基于 Matlab 语言的人工神经网络计算分析程序.

3 计算反演实例

拟建中的某水电工程坝址区地质环境复杂,断层交错.大坝进水口处有 300 m 的人工高边坡,在高边坡下部布置有引水发电隧洞.为研究初始地应力场对边坡及隧洞工程的影响,进行了初始地应力的测量工作,取得了一定的初始地应力测量值.为较为精确的估计初始地应力的分布状况,采用了反演方法对初始地应力场进行模拟.

3.1 学习样本的确定

如前述,通过改变边界荷载和计算区域内岩石力学参数,利用正算程序进行正分析计算,可获得边界荷载(用于模拟构造应力的荷载)作用下的应力值.经过多次改变边界荷载和计算区域内岩石力学参数后进行正向计算,将获得的对应于测点的水平应力最大、最小值作为输入样本,将对应的边界荷载和材料力学参数作为输出向量.学习样本见表 1.

表 1 学习样本
Table 1 Training sample vector

输入样本												输出样本				
σ_a/MPa						σ_b/MPa						P/kN	K	μ_1	μ_2	μ_3
1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6					
-1.41	-1.36	-4.13	-1.47	-1.67	-1.96	-1.36	-0.944	-4.78	-1.34	-1.66	-1.61	-5.5	1.0×10^4	0.35	0.32	0.30
-2.76	-3.24	-7.16	-2.78	-3.08	-4.03	-1.69	-1.65	-6.25	-1.64	-2.19	-2.44	-11.0	2.0×10^4	0.38	0.35	0.33
-3.15	-4.23	-8.66	-3.22	-3.66	-5.22	-1.77	-1.95	-6.99	-1.70	-2.40	-2.85	-16.0	3.0×10^4	0.42	0.39	0.37
-3.81	-5.62	-1.15	-4.07	-4.47	-7.21	-1.95	-2.55	-8.39	-1.86	-2.70	-3.83	-22.0	4.0×10^4	0.45	0.42	0.41

注 : P 为荷载集度最大值 ; μ_i 为名义泊松比 ; σ_a 为最小水平主应力值 ; σ_b 为最大水平主应力值 ;“-”表示压应力。

3.2 边界荷载和计算力学参数反演计算

学习样本通过程序学习后 ,利用所获得的非线性映射关系 ,将实测应力结果作为输入向量 ,经运算即可获得荷载反演结果 :三角形荷载最大值 P 为 -12.98MPa ,强风化带的名义泊松比 μ_1 为 0.44 ;弱风化带的名义泊松比 μ_2 为 0.393 ,微风化带的名义泊松比 μ_3 为 0.375。实测应力输入向量见表 2。

表 2 实测应力输入向量

Table 2 Input vector of observed stress MPa					
测点号	σ_a	σ_b	测点号	σ_a	σ_b
1	- 3.00	- 2.00	4	- 2.00	- 1.50
2	- 4.00	- 2.00	5	- 3.40	- 2.30
3	- 5.50	- 2.50	6	- 4.00	- 2.00

3.3 岩体初始地应力场分布模拟

将得到的模型边界荷载值及边界施加在计算模型上 ,进行正演计算 ,第一主应力场分布如图1。从应力分布情况可以看出 ,岩体中的初始地应力场随深度的增加而加大。在河谷地带出现应力集中。同时由于计算模型中考虑了断层的影响 ,在断层附近也出现一定程度的应力集中现象。

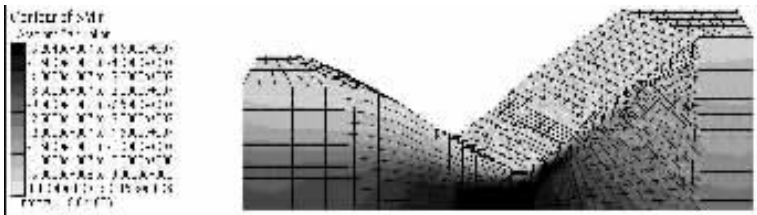


图 1 反演第一主应力分布

Fig.1 Distribution of first principal stress component

表 3 示出测点的计算应力和实测应力 ,其最大误差仅为 4.35% ,而据国内外的统计资料显示 ,初始地应力值的测量结果的误差可达到 25% ~ 30% ,由此来看 ,本计算成果的精确度较高 ,是可信的。由表 3 可知 ,侧压力系数在 1.06 ~ 1.63 之间变化 ,与按实测地应力计算的侧压力系数(1.3 ~ 1.6)非常接近。两向水平应力的比值在 1.35 ~ 2.71 之间。值得说明的是 ,为了验证按本文方法得到的计算结果的可靠性 ,在反演分析过程中 ,预留了 4 个点(7 ~ 10)作用检验点而不参与反演计算。

表 3 计算应力和实测应力对照

Table 3 Comparison of computed and observed stress										MPa
测点号	计算应力			实测应力		误差/%		σ_a/σ_H	σ_a/σ_b	
	σ_a	σ_b	σ_H	σ_a	σ_b	σ_a	σ_b			
1	-3.07	-2.04	-3.32	-3.00	-2.00	2.27	1.97	1.08	1.50	
2	-4.10	-2.05	-5.54	-4.00	-2.00	2.40	2.27	1.35	2.00	
3	-5.67	-2.61	-6.24	-5.50	-2.50	3.09	4.35	1.10	2.17	
4	-2.06	-1.53	-2.53	-2.00	-1.50	3.03	2.24	1.23	1.35	
5	-3.53	-2.35	-4.06	-3.45	-2.30	2.29	2.17	1.15	1.50	
6	-4.11	-2.06	-6.70	-4.00	-2.00	2.80	2.91	1.63	2.00	
7	-3.59	-2.05	-3.95	-3.50	-2.00	2.59	2.33	1.10	1.75	
8	-5.77	-2.81	-6.29	-5.60	-2.70	2.96	4.00	1.09	2.05	
9	-4.08	-2.04	-4.49	-4.00	-2.00	2.11	1.87	1.10	2.00	
10	-5.09	-3.05	-6.01	-5.00	-3.00	1.83	1.71	1.18	1.67	

注 : σ_H 为垂直应力。

4 结 论

由图1可知,第一主应力值由上到下逐渐增大,受水平构造力的影响,河谷地带的应力值更大一些.除此之外,断层带的分布对第一主应力值的分布影响较大.

(a)计算表明,计算区域的大小对应力场的数值与分布影响较大,故地应力反演时应以地形地质边界条件为依据.(b)重力应力场形成的初始地应力场比较稳定,构造运动的影响随地区不同差别很大.岩性、风化层、构造断裂等对地应力分布起重要的调整作用.(c)构造有限元数学模型时,几何因素(如地形与岩层分界面)对地应力的影响比岩体性质等因素更敏感.(d)初始应力场充分反映了地质构造的影响.岩体的弹模越高,岩体所储存的能量越大,地应力值也就越大.由此说明该方法构造的初始应力场,能够较充分反映岩体不均匀性对初始应力场的影响.(e)边坡工程范围内的初始应力场是一个以自重为主,由自重和构造应力综合作用的中等应力场(小于20 MPa).(f)计算与实测结果同时表明,实例工程研究中的初始地应力场中,水平应力大部分大于垂直应力,因此在进行工程设计时,应充分考虑到这一不利因素对工程所带来的影响.(g)计算模拟过程中,考虑断层对初始地应力的分布的影响是十分重要的,它对实测值的离散现象有较好的解释.

参考文献:

- [1] 郭怀志,马启超,薛玺成,等.岩体初始应力场的分析方法[J].岩土工程学报,1983,5(3):64~67.
- [2] 徐卫亚.长江三峡工程工程地质力学研究[M].北京:中国三峡出版社,1998.47~68.
- [3] 徐卫亚.边坡及滑坡环境岩石力学与工程研究[M].北京:中国环境科学出版社,2000.1~15.
- [4] 张有天,胡惠昌.地应力场的趋势分析[J].水利学报,1984,5(4):31~38.
- [5] 白世伟,李光煜.某水电站坝区岩体应力场研究[J].岩石力学与工程学报,1982,1(1):5~9.
- [6] 陶振宇,曾庆义.地应力场的函数反分析[J].武汉水利电力学院学报,1987,17(3):11~19.
- [7] 杨林德,黄伟.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,1985,20(4):69~76.
- [8] 冯紫良.地下洞室应力分析中的荷载计算与初始地应力场[J].岩土工程学报,1991,13(3):37~42.
- [9] 冯夏庭.智能岩石力学导论[M].北京:科学出版社,2000.89~104.

ANN-Based 3-D Back Analysis of Initial Stress in Rock Masses

JIANG Zhong-ming, XU Wei-ya, SHAO Jian-fu

(Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: The methods for calculation of the initial earth stress in rock masses are reviewed. In combination with the theory of Fast Lagrangian Analysis of Continua and Artificial Neural Network (ANN), a new approach is proposed for the calculation of the initial earth stress. Based on the 3-D FEM, the new approach integrates the merits of other methods and takes into account the factors affecting the initial stress. A case study is given to show the reasonability of the present method. In consideration of the influence of faults on the initial stress, the approach may help reveal the distribution of measured initial earth stress.

Key words: artificial neural network; initial earth stress; Fast Lagrangian Analysis of Continua; 3-D back analysis