

文章编号: 1006-7321(2002)01-0029-05

锚固系统的质量管理与检测技术研究^{*}

许明, 张永兴

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:岩石声波测试技术应用于锚固工程的无损检测中,其基本原理是采用动力瞬态激振使锚杆引起弹性振动,通过测定锚杆的振动响应来估计和推断锚杆中的缺陷。波动方程的有限元数值解表明,在锚杆灌浆体内部缺陷的探测中可用声速、幅值、波形等声参数作为判断的依据。人工神经网络这类非线性动力学系统运用于该灰色系统的质量预测可取得良好的效果。

关键词:锚杆;波动方程;承载力

中图分类号:TU459⁺.3 TU712⁺.3

文献标识码:A

锚杆是一高度受力的构件,锚固系统稳定性预测一旦失误,往往给工程带来不可估量的损失,因而,需要检查它是否按设计预定的方式起作用。在锚杆的质量检测试验中我们引入了反射波反演法,即对锚头顶部施以轴向瞬时冲击力或施以一冲量来激发锚杆,让超声波在所检测的介质中传播,然后由接收换能器接收锚固体底端产生的反射信号。被接收到的超声波转化为电信号后再经超声仪放大显示在示波屏上,用超声仪测量直接收到的超声信号的声学参数。当超声波经介质中传播后,它将携带有关介质材料性能、内部结构及其组成的信息。准确测定这些声学参数的大小及变化,可以推断介质的性能、内部结构及其组成情况。

超声检测方法在力学上表现为给定扰动源信息及边界条件、初始条件,建立描述介质运动的支配方程,并由此求解其动力响应,实质上是处理可变场的问题,通常归结为双曲型或双曲-扩散型方程的初值或初值-边值问题。与静力学方法相比,超声波测试技术具有简便、快捷、可靠、经济及无破损等特点。在桩基测试中该法获得了广泛的应用^[1,2]。

1 波动方程

在动力测试时,有一定的假设条件或应用前提,这里需要对锚杆做如下基本假设:

- 1) 锚杆的受激振动在弹性限度内。
- 2) 锚杆材料均匀或分段均匀且各向同性。
- 3) 锚杆受激振动时,其截面保持为平面。

按照假设条件,杆中纵波控制方程为

$$\frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{R}{\rho A} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中,不计体力, u 是质点纵向位移; t 是从冲击时刻算起的时间; x 是锚杆截面的位置; E 是锚杆材料的弹性模量; ρ 是质量密度; R 为岩土介质与锚固体界面间单位长度上的粘结摩阻力; A 是杆的横截面积。

摩阻力 R 与段元侧岩土介质的性质、密实程度、段元侧面的粗糙度及锚杆施工方法等因素有

^{*} 收稿日期: 2001-10-17

基金项目: 国家计委高新技术((1999)2062)

作者简介: 许明(1975-),男,湖北省洪湖市人,博士生,主要从事建设工程质量管理与检测的研究。

关^[3],精确确定这些因素比较困难,一般可采用理想弹塑性模型描述。

1) 式不是一个常微分方程,即不是一个单纯的振动方程,而是一个偏微分方程,是一个不但包含振动,还包含振动的传播——应力波传播的方程,常称为阻尼波动方程。

要根据阻尼波动方程唯一地确定位移函数 $u(x,t)$,还必须给出锚杆的振动初始条件和应力波传播的边界条件。

初始条件是指锚杆初始时刻 $t=0$ 时的扰动状态,常指锚杆的初始位移和初始速度。一般恒有

$$u(x,t)|_{t=0} = u(x,0) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = u_t(x,0) = 0 \quad (3)$$

边界条件指 $t>0$ 的任何时刻,应力波在锚杆边界截面(即锚头顶面和锚固体底面)上的状态。

对于岩石锚杆底端的位移,由于低应变法的输入能量低,而基岩一般较硬,可作为固定端处理,所以采用 Dirichlet 边界条件,位移函数应有

$$u = 0 \quad (4)$$

锚头顶面是自由的,可采用 Neumann 边界条件。根据刚体与杆的碰撞理论^[1],刚体质量的增量等于撞击体和杆之间肩面上的力的冲量,由此可解出端面的位移,并将锚头的应变表示为

$$\vec{n} \cdot (\text{grad}(u)) = g \cdot \exp(-t) \quad (5)$$

g 为常数。

2 数值解

偏微分方程的解析解一般难以解出,必须借助数值方法或近似方法求得数值解^[4]。将 x 方向定义为锚杆长度方向, y 方向定义为直径方向,由此形成求解域,在此区域内生成和精化网格。 z 方向(竖直方向)表示质点位移的大小。在求解域中央,分别剖分出一个圆形区域和一个方形区域,以代表锚杆中的缺陷。将具有完整求解域的模型和具有中心孔的求解域的模型分别进行数值求解,在输出解的某一给定时刻点上变形网格如图 1 所示。

图 2 为锚头的位移曲线,图中,“平”代表具有完整求解域的模型的解,“圆”代表具有圆孔的求解域的模型的解,“方”代表具有方孔的求解域的模型的解。可以看出,第一个解的曲线较光滑,位移幅值较大,第二、三个解的位移曲线有一定的畸变,相位也滞后,反映出应力波传播减小。

声速在岩体中传播的特点,除反映在传播速度随岩体性质而不同外,还明显表现在振幅的变化上。不同介质、传播条件和波形,有着不同的衰减规律。一般认为岩石对声波的吸收和频率有特殊关系。由此可知,应力波的到时(声速)和波形变化对缺陷识

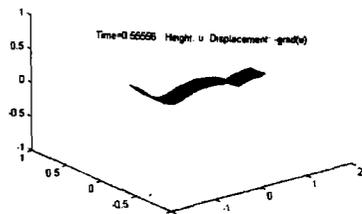


图 1 完整求解域的变形网格

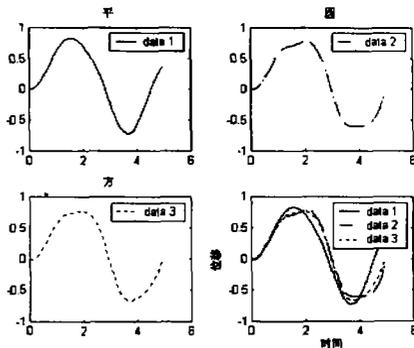


图 2 锚头的位移曲线

别至关重要。

图3为加速度的功率谱密度曲线,功率谱呈单峰。缺陷不仅引起功率谱密度曲线峰值降低,而且主频率也发生漂移,功率谱的总面积即各频率成分的总能量也减小。这是由于超声脉冲通过缺陷区时被微裂隙界面所散射,导致能量衰减,因而频谱曲线产生畸变。声谱特征值的变化比声时变化大得多,尤其振幅的变化特别灵敏。

岩体对声波振幅谱吸收的大小以及频率的变化,基本反映了岩体的结构组成及其它物理力学性质。因此,分析实测到的弹性波的频谱(振幅谱、相位谱、能量谱等)资料,可以得到比用单纯弹性波速反映岩体结构状态更有效的资料。这也是声波探测法的一个重要的理论基础。

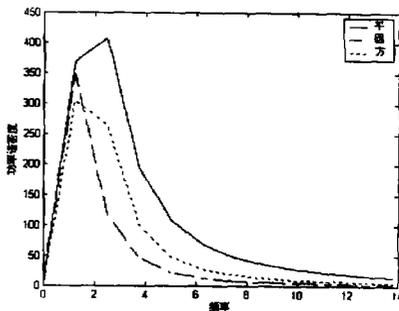


图3 加速度的功率谱密度

3 人工神经网络的特点和计算方法

锚固系统是一个开放的复杂系统,其承载力受地质因素和工程因素等的综合影响。这些因素有的是确定性的,但大部分具有随机性、模糊性、可变性等不确定性特点,它们对不同类型锚杆承载力的影响权重是变化的,这些因子之间具有复杂的非线性关系,因此在锚杆承载力分析过程中应根据具体情况动态地选择参评因素。这些都要要求锚杆承载力分析方法应当具有能够同时处理确定性和不确定性信息的动态非线性能力,在已有的工程实例基础上,客观地识别出锚杆的承载力。近年来发展的神经网络技术突破了人工智能知识获取的瓶颈问题,具有自学习、自组织、联想记忆能力和强容错性^[6],为承载力智能化研究奠定了可靠基础^[5]。

BP (Back Propagation) 网络是误差修正型的网络,而且是一种误差反传修正型训练方法,应用非常广泛。BP 网络通常有一个或多个隐层,隐层中的神经元采用 sigmoid 型传递函数,输出层的神经元采用线性传递函数。在确定了 BP 网络的结构后,利用输入输出样本集对其进行训练,也即对网络的权值和阈值进行学习和调整,调整的指导思想是使误差函数($e = t - a$, t 和 a 分别为期望输出和网络的计算输出)沿负梯度方向下降,以使网络实现给定的输入输出映射关系。经过训练的 BP 网络,对于不是样本集中的输入也能给出合适的输出。

在实际应用中, BP 算法很难胜任,因此出现了许多改进算法。BP 算法的改进主要有两种途径,一种是采用启发式学习方法,如动量法和学习率自适应调整的策略;另一种则是采用更有效的优化算法,如 Levenberg-Marquardt 优化方法。

4 极限承载力的预测

低应变动测的五个数据为:杆长 L 、杆的截面半径 r 、阻尼自振基频 f_n 、应力波波速 c_0 和地层的等效粘滞阻尼系数 β , 它们是网络输入层五个神经元的输入数据, 锚杆的极限承载力是网络输出层神经元的期望输出, 在能达到同样效果的情况下使网络尽量简单, 图4描述了一个具有一个隐层的 BP 网络。

p 为输入向量, R 为输入数, Q 为输入矢量(样本), $w1, b1$ 和 $w2, b2$ 分别为第1层、第2层神经元的权值和阈值, $S1, S2$ 分别为第1层、第2层神经元数, $a1$ 和 $a2$ 为输出向量。本例中, $R=5, Q=$

5, $S_1=3, S_2=1$ 。

接收波的阻尼自振基频可通过测量接收波周期的方法来计算,或通过对实测响应的离散傅氏变换获得。

应力波波速可由

$$c_0 = \frac{2L}{T} \quad \text{或} \quad c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (6)$$

计算,其中, T 为杆底反射信号的双程走时, E 是锚杆材料的弹性模量, ρ 是质量密度。

地层的等效粘滞阻尼系数用来概括与摩阻力有关的影响因素。由振动响应正演理论和实测振动响应可知,振幅衰减是决定于时间衰减因子 $e^{-\beta t}$, 衰减包络函数的形式为 $a(t) = Ae^{-\beta t}$ 。 A 为包络线在 $t=0$ 时的值,它是一个与激振时的冲量和锚杆的质量有关的常数。故只要从实测响应曲线相邻两振幅峰值求得它们的对数衰减率和相对应的时差,便可得到 β 的估计值:

$$\beta = \frac{\ln \frac{a_i}{a_{i+1}}}{t_{i+1} - t_i} \quad (7)$$

式中, a_i, a_{i+1} 为振动响应第 i 个振幅峰与第 $i+1$ 个振幅峰值。样本中的极限承载力是通过静载试验获得的。

现以经过低应变变动测和静载试验的工程锚杆构成训练样本集,5根锚杆的原始数据如表1。

表1 锚杆的原始数据

杆号	杆长 L (m)	半径 r (mm)	基频 f_1 (Hz)	波速 c_0 (ms^{-1})	阻尼系数 β (s^{-1})	极限承载力 Q_u (kN)
1	1.4	40	601	3 210	312	25
2	1.6	50	475	3 373	175	38
3	2	50	417	3 512	180	30
4	3	60	260	3 317	273	41
5	5	75	163	3 100	456	59

将样本集的数据代入BP网络中经过训练后,网络 L_A 层到 L_B 层各神经元之间的权值如表2。

表2 各神经元之间的权值

L_B/L_A	1	2	3	4	5
1	0.338 4	-0.007	-0.003 8	0.010 1	0.002
2	0.002 4	-0.016 7	0.001 7	0.015	0.007
3	1.609 1	0.214 9	0.011 9	-0.003 6	-0.019 1

L_B 层到 L_C 层神经元之间的权值为:14.255、13.902、17.128。 L_B 层神经元的阈值分别为: -0.235 5、7.841 5、-3.841 9。 L_C 层神经元的阈值为13.932。训练时,误差指标为0.02,实际训练步数为234。

经过训练后的BP网络就具有了联想功能,可以对工程锚杆极限承载力进行预测,具体步骤如下:输入需预测工程锚杆的小应变变动测参数;计算 L_B 层各神经元激活值;计算 L_C 层神经元的激活值。

例如有一根锚杆的输入向量为[1.8,50,300,3 400,200],网络的计算输出为25.16,与静载试验结果对比,相对误差为2.6%。

人工神经网络预测能力与训练样本集的选择有密切关系,样本集愈大,参数覆盖范围愈宽,则预测效果愈好。

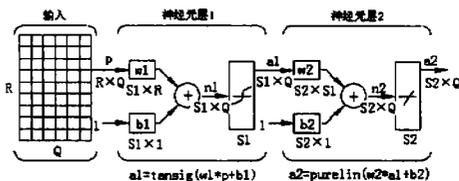


图4 BP的网络结构

5 结语

1) 在锚杆灌浆体内部孔洞、裂隙、“蜂窝”等缺陷的探测中可用声时、幅值、波形等声参数作为判断的依据,若再加上在缺陷处的频谱畸变参数,则可使判断更为可靠。

2) 频谱特性反映了锚杆的基本物理力学特性,频谱特征值的大小,取决于锚固系统的完整性、结构、矿物成分、胶结程度等等。各种因素的影响权重尚需进一步研究。

3) 低应变法虽然简单、快速、成本低,然而也存在不少局限性,如锚头和锚杆尾部附近出现的缺陷以及多缺陷识别困难等。

4) 利用人工神经网络预测极限承载力的精度较高,预测效果令人满意,容错性好,方胆可靠、适用。

采用反射波法检测锚杆质量体系,目前尚属探索阶段,探测深度有限,这种局限性可以通过改进方法,补充更多的其他信息,例如工程地质资料、施工原始记录、施工方法、现场条件以及锚杆的类型等因素,加以克服和改进。

参考文献:

- [1] 王靖涛. 桩基应力波检测理论与工程应用[M]. 北京:地震出版社,1999.
- [2] 雷林源. 桩基动力学[M]. 北京:冶金工业出版社,2000.
- [3] 程良奎,张作耀,杨志银. 岩土加固实用技术[M]. 北京:地震出版社,1994.
- [4] 李涛,贺勇军,刘志俭. Matlab 工具箱应用指南[M]. 北京:电子工业出版社,2000.
- [5] 陈昌彦,王思敬,沈小克. 边坡岩体稳定性的人工神经网络预测模型[J]. 岩土工程学报,2001,3(2):158-161.
- [6] 许明,张永兴,阴可. 砂浆锚杆的锚固及失效机理研究[J]. 重庆建筑大学学报,2001,23(6):10-15.

Study of Quality Management and Inspection Technology of Anchorage System

XU Ming, ZHANG Yong-xing

(Faculty of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Sonoprobe method has been applied in non-destructive inspection of anchorage project. Its fundament is to cause anchor bar's elastic vibration by dynamic transient excitation and the flaws of anchor bar can be estimated or deduced by determining the transient response. The numeric solution of hyperbolic equation by FEA indicates that the deductions should comply with the acoustic parameters such as sound velocity, vibration range, wave shape etc., when inspecting the interior flaws in grouting of anchor bar. As a non-linear dynamic system, "the artificial neural networks dealing with quality inspection of gray system have been proved efficient.

Keywords: anchor bar; hyperbolic equation; bearing capacity