

BP 神经网络在基坑变形预测中的应用研究

李帅, 李浩, 夏玉伟

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 结合某桩锚支护深基坑工程, 针对不同工况, 利用监测数据作为输入建立 BP 神经网络模型, 预测桩体水平位移。结果表明, 不同工况下的预测精度不同, 桩体位移较大时预测精度较高, 位移较小时预测精度较差; 对于工况变化时位移曲线的变化趋势, 预测结果的适应性良好; BP 神经网络预测桩体水平位移具有较高的可行性和可靠性。

关键词: 公路; 基坑变形; 围护桩; 水平位移; BP 神经网络

中图分类号: U418.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)05-0097-05

围护桩是深基坑最常用的支护形式, 其水平位移的产生及发展对基坑的稳定极为重要, 通过预测桩体水平位移确定基坑的稳定性是常用的方法。目前基坑稳定性预测预报方法主要有数学力学定量法和位移时序分析法两类。基坑工程是一个开放的复杂系统, 其稳定性受地质构成、形成条件及诱发因素等影响巨大, 且由于因素变化的随机性和波动性, 基坑的稳定性难以确定。该文采用具有非线性映射功能的神经网络预测桩体的水平位移, 分析基坑的稳定性。

1 BP 神经网络的基本理论及设计

1.1 基本理论

BP 神经网络是一种按误差逆传播算法训练的多层前馈网络, 是目前应用最广泛的神经网络模型之一。其基本算法是学习过程由信号的正向传播与误差的反向传播两个过程组成。正向传播时, 输入样本从输入层传入, 经各隐层逐层处理后传向输出层; 若输出层的实际输出与期望输出不符, 则转入误差反向传播阶段。误差反向传播是将输出误差以某种形式通过隐层向输入层逐层传播, 并将误差分摊给各层的所有单元, 从而获得各层单元的误差信号, 该误差信号即为修正各单元权值的依据。这种信号正向传播与误差反向传播的各层权值调整过程是周而复始的, 权值不断调整的过程即为网络的学习训练过程, 该过程一直进行到网络输出误差减少到可接受的程度或进行到预先设定的学习次数为止。

BP 神经网络由输入层、隐层、输出层组成。按照 BP 人工神经网络的方式进行学习, 给出输入值 x , 经过神经网络结构计算得到结果, 即输出值 O 。

1.1.1 信号层之间的数学关系

对于输出层, 第 k 个神经元的输出 O_k 为:

$$O_k = f(\text{net}_k) \quad (1)$$

式中: net_k 为第 k 个神经元的输出, 按式(2)计算。

$$\text{net}_k = \sum_{j=0}^m \omega_{jk} y_j \quad (2)$$

式中: ω_{jk} 为输出层第 k 个神经元对应的权向量; y_j 为隐层第 j 个神经元的输出, 按式(3)计算。

$$y_j = f(\text{net}_j) \quad (3)$$

式中: net_j 为第 j 个神经元的输出, 按式(4)计算。

$$\text{net}_j = \sum_{i=0}^n v_{ij} x_i \quad (4)$$

式中: v_{ij} 为隐层第 j 个神经元对应的权向量; x_i 为输入层第 i 个神经元的输入。

在式(1)、式(3)中, $f(x)$ 为变换函数, 均为单极性 Sigmoid 函数, 其表达式为:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (5)$$

$f(x)$ 具有连续性、可导性, 且满足下式:

$$f(x) = f(x) [1 - f(x)] \quad (6)$$

BP 神经网络按照设计好的网络结构进行学习训练, 每学习训练一次都会得到一个输出 O ; 将输出 O 与期望输出比较, 得出输出误差 E ; 将误差进行反向传播, 对各层的权值进行调整学习, 使输出值的误差随着网络训练逐渐减小, 直至满足要求。

1.1.2 误差及权值调整

输出误差 E 的定义如下:

$$E = \frac{1}{2} (d - O)^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l (d_k - O_k)^2 \quad (7)$$

将式(7)展开至隐层, 用隐层参数表示误差, 有:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l [d_k - f(\text{net}_k)]^2 \quad (8)$$

将式(8)进一步展开至输入层,用输入层参数表示误差,有:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l \{d_k - f[\sum_{j=1}^m \omega_{jk} f(\text{net}_j)]\}^2 \quad (9)$$

由式(9)可知:BP神经网络的输出误差由隐层各神经元的权值 v_{ij} 和输出层各神经元的权值 ω_{jk} 决定,改变误差 E 可通过调节两个权值函数来实现。通常运用梯度下降算法将误差分摊给各层的各神经元,得到各神经元的误差信号,然后以该误差信号为依据修正各神经元的权值,这样各神经元的权值都会被调整。不断重复上述过程,使信号正向传播与误差反向传播的各层权值调整过程重复进行,直到神经网络的输出误差减少到允许范围或进行到预先设定的学习次数为止。

1.2 BP神经网络设计

1.2.1 结构设计

BP神经网络的结构设计包括输入层、隐层和输出层设计,其中主要是隐层的层数设计。在BP神经网络中,隐层可以是一层,也可以是多层。理论分析证明,单隐层神经网络结构便可映射所有的连续函数,只有在涉及非连续函数问题时才考虑多层隐层结构。这里采用单隐层结构的3层BP神经网络作为预测模型。

1.2.2 输入层、输出层设计

神经网络结构中的输入层、输出层的神经元是指输入、输出变量。一般情况下,输出量就是所需要的目标量,可以是一个,也可以是多个,比较容易确定。对于输入量,要求其是对输出量有较大影响且能检测或便于提取的变量,还要求输入量之间的相关度较低或不相关。

基坑的开挖变形受到地质水文情况、开挖深度、开挖时间、支护结构形式及周围建筑物等因素的影响,维护桩桩体本身的变形还会受到桩体刚度、桩身直径和桩长、桩体上部荷载、桩身工艺、坑角效应等因素的影响,桩体的水平位移是多种因素共同作用的结果。在这些影响因素中,一部分是事先确定的变量,可直接作为神经网络的输入;另一部分则需进行量化处理后才能作为输入。影响因素量化准则对网络预测结果有很大影响,同时有些影响因素在工程现场很难获取,而且如果采用上述所有影响因素作为神经网络的输入,则输入层的结构会很庞大,将

使计算周期和工作量增大,导致输出结果与期望输出结果偏差较大。因此,选取实测桩体水平位移作为神经网络的输入来预测桩体水平位移,分析基坑的稳定性。

综合考虑,确定输入层神经元数量为5个。由于施工现场每3d监测一次数据,设每监测一次数据的时间为一个时间点,以桩体实际监测的前5个时间点的水平位移作为输入。由于要通过预测未来几天桩体的水平位移来确定基坑的稳定性,取前5个时间点的下一个时间点的桩体水平位移为输出,即取未来时间点的桩体水平位移为输出,输出层神经元数量为1个。

1.2.3 隐层设计

隐层神经元的作用是从样本中提取并储存其内在规律,每个神经元有若干个权值,每个权值都是增强网络映射能力的参数。隐层神经元个数太多,会记忆样本中非规律性的内容,影响预测结果的准确性,还会增加训练学习时间;而神经元个数较少,则神经网络学习能力降低,不能获取样本规律。因此,应综合考虑各种因素确定隐层神经元个数。

常采用试凑法确定隐层神经元个数,先确定较少的神经元个数,然后逐渐增加神经元个数,以误差最小时所对应的神经元个数作为隐层神经元个数。采用式(10)计算隐层神经元个数,经过网络模型试凑,最终确定隐层神经元个数 $m=11$ 个。

$$m = \sqrt{n+l} + \alpha \quad (10)$$

式中: m 为隐层神经元个数; n 为输入层神经元个数; l 为输出层神经元个数; α 为1~10常数。

2 深基坑变形预测

以某深基坑工程为例,应用BP神经网络对不同深度处桩体水平位移进行预测。

2.1 工程概况

该工程基坑平面近似为正方形,四周采用围护桩加锚索联合支护。采用中心岛式开挖方法,先在基坑周边设置围护桩,然后将坑壁周边的土体挖去进行锚索施工,待锚索张拉完毕后挖去基坑中部土体,最后逐步开挖至坑底(见图1)。

采用CX-6B型滑动测斜仪进行桩体水平位移监测,在测斜管安放稳定一段时间后进行连续监测。待测斜数据稳定后,按要求每3d测量一次数据。监测时,将仪器放置在测斜管底部,每隔500mm进行一次数据采集。选取3根不同工况的桩体运用神经

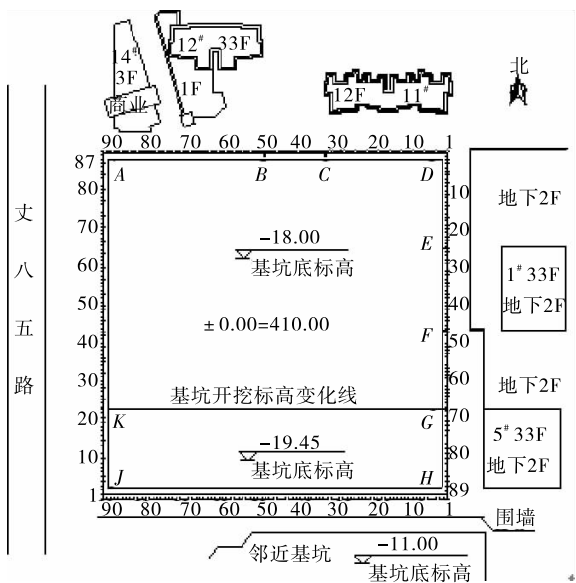


图 1 基坑开挖及周围环境示意图(单位:m)

网络进行桩体水平位移预测,其中基坑东侧 DH 段 18 号桩体为基坑已开挖但未进行第一排锚索锁定,北侧 AD 段 40 号桩体为第一道锚索锁定完成,南侧 HJ 段 53 号桩体为第三排锚索锁定完成。

2.2 预测结果及分析

DH 段 18 号桩桩体水平位移实测值与预测值的比较见表 1、图 2~4,AD 段 40 号桩桩体水平位移实测值与预测值的比较见表 2、图 5~7,HJ 段 53

表 1 DH 段 18 号桩桩体水平位移实测值与预测值的比较

深度/ m	日期	水平位移/mm		绝对误差/mm	相对误差/%
		实测值	预测值		
4	12-23	7.146	7.311	-0.165	-2.31
	12-26	8.756	8.046	0.710	8.11
	12-29	8.296	8.180	0.116	1.40
8	12-23	6.012	5.607	0.405	6.73
	12-26	7.202	7.065	0.137	1.90
	12-29	7.182	7.216	-0.034	-0.48
12	12-23	5.121	5.172	-0.051	-0.99
	12-26	5.471	5.502	-0.031	-0.56
	12-29	5.631	6.086	-0.455	-8.08
16	12-23	2.798	2.671	0.127	4.55
	12-26	2.678	2.635	0.043	1.62
	12-29	2.728	2.895	-0.167	-6.11
20	12-23	0.211	0.212	-0.001	-0.58
	12-26	0.211	0.211	0.000	0.00
	12-29	0.211	0.211	0.000	0.00

号桩桩体水平位移实测值与预测值的比较见表 3、图 8~10。

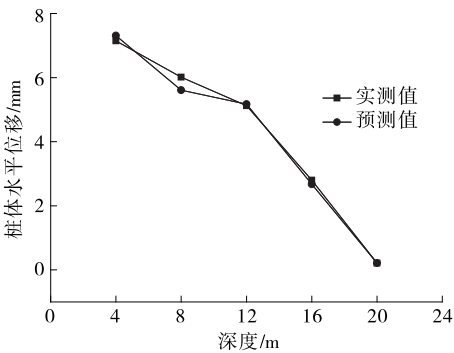


图 2 DH 段 18 号桩 12 月 23 日桩体水平位移量比较

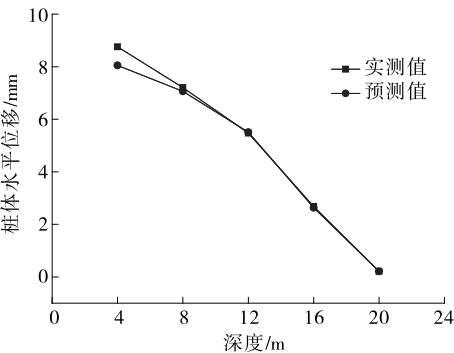


图 3 DH 段 18 号桩 12 月 26 日桩体水平位移量比较

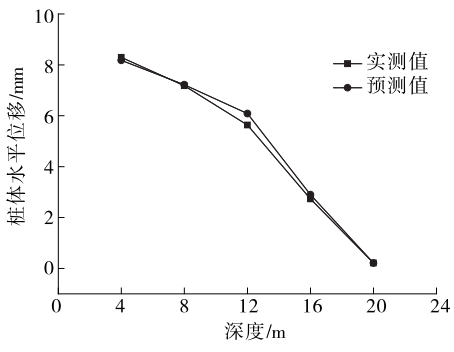


图 4 DH 段 18 号桩 12 月 29 日桩体水平位移量比较

DH 段 18 号桩桩体水平位移实测值是基坑已经开挖但未进行第一排锚索锁定时的监测数据。由表 1 可知:桩体水平位移预测误差最大值出现在 12 月 26 日桩身深度 4 m 处,为 0.710 mm;相对误差最大值也出现在这一位置,为 8.11%。在桩体深度 20 m 处,由于前几个时间点的监测值都为 0.211 mm,预测值也为 0.211 mm,达到了精准预测。由图 2~4 可知:基坑开挖还未进行第一排锚索锁定时,桩体最大位移发生在上部,位移量随着桩体深度的增加逐渐减小,总体上桩体位移曲线呈悬臂形。

表2 AD段40号桩桩体水平位移实测值与预测值的比较

深度/ m	日期	水平位移/mm		绝对误差/mm	相对误差/%
		实测值	预测值		
4	1-18	20.589	20.525	-0.064	-0.31
	1-21	20.207	20.560	0.353	1.74
	1-24	20.767	20.283	0.484	2.33
8	1-18	11.533	12.699	1.166	10.11
	1-21	12.385	11.907	-0.478	-3.86
	1-24	12.745	12.566	-0.179	-1.40
12	1-18	3.303	3.448	0.145	4.39
	1-21	2.514	2.562	0.048	1.91
	1-24	3.764	3.536	-0.228	-6.06
16	1-18	6.200	6.352	0.152	2.45
	1-21	6.136	6.573	0.437	7.12
	1-24	6.456	6.671	0.215	3.33
20	1-18	2.931	2.742	-0.189	-6.45
	1-21	2.424	2.208	-0.216	-8.91
	1-24	2.474	2.602	0.128	5.17

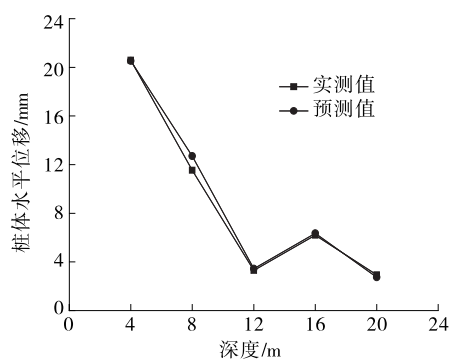


图5 AD段40号桩1月18日桩体水平位移量比较

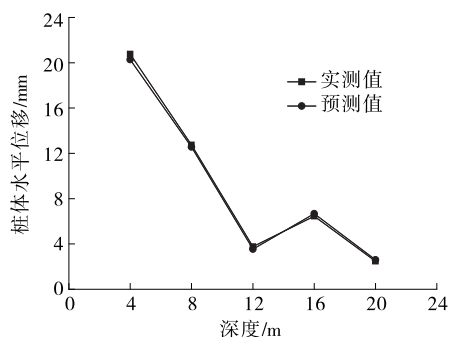


图6 AD段40号桩1月21日桩体水平位移量比较

AD段40号桩桩体水平位移实测值为第一道锚索锁定完成后的监测数据。由表2可知:桩体水平位移预测误差最大值出现在1月18日桩身深度8m处,为1.166mm;相对误差最大值也出现在相

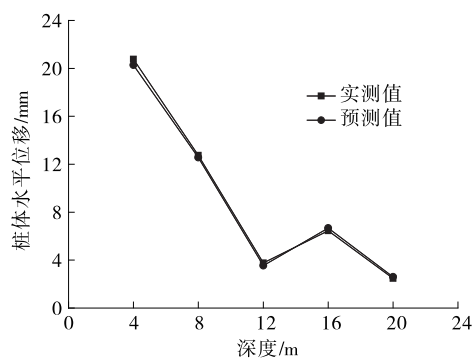


图7 AD段40号桩1月24日桩体水平位移量比较

表3 HJ段53号桩桩体水平位移实测值与预测值的比较

深度/ m	日期	水平位移/mm		绝对误差/mm	相对误差/%
		实测值	预测值		
4	4-21	4.797	4.487	0.310	6.47
	4-24	4.977	4.752	0.225	4.53
	4-27	4.387	4.131	0.256	5.84
8	4-21	3.480	3.464	0.016	0.47
	4-24	3.980	3.926	0.054	1.36
	4-27	3.970	3.797	0.173	4.36
12	4-21	0.474	0.581	-0.107	-22.60
	4-24	0.945	0.781	0.164	17.35
	4-27	-0.316	-0.387	0.071	-22.43
16	4-21	3.108	3.498	-0.390	-12.54
	4-24	3.833	3.782	0.051	1.34
	4-27	2.708	2.619	0.089	3.29
20	4-21	1.308	1.621	-0.313	-23.95
	4-24	2.312	1.754	0.558	24.12
	4-27	1.218	1.617	-0.399	-32.78

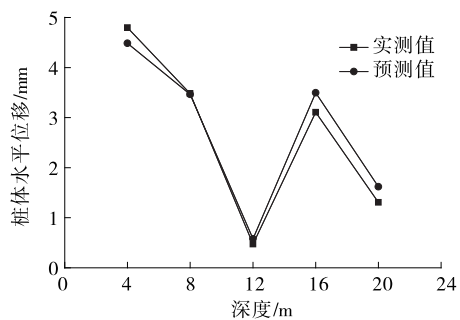


图8 HJ段53号桩4月21日桩体水平位移量比较

同位置,为10.11%。由图5~7可知:基坑完成第一排锚索锁定后,最大位移还是发生在桩体上部,同时在桩体下部出现局部位移最大值,在一定桩深范围内随着深度的增加位移值减少,曲线呈波浪形。

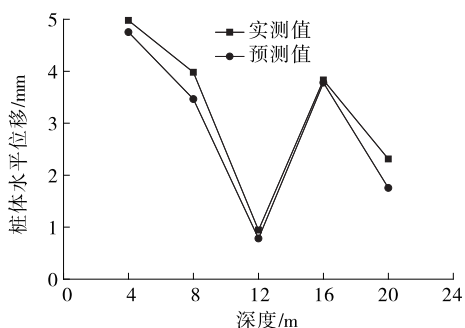


图9 HJ段53号桩4月24日桩体水平位移量比较

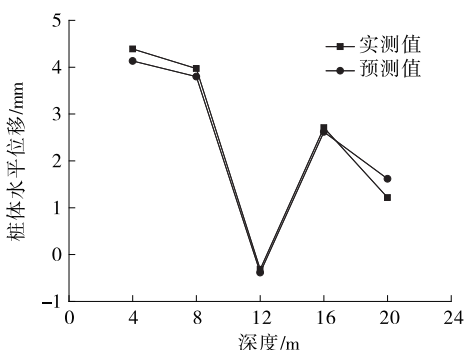


图10 HJ段53号桩4月27日桩体水平位移量比较

HJ段53号桩桩体水平位移实测值为第三排锚索锁定完成后的监测数据。由表3可知:桩体水平位移预测误差最大值出现在4月24日桩身深度20 m处,为0.558 mm;相对误差最大值出现在4月27日深度20 m处,为32.78%。由图8~10可知:基坑完成第三排锚索锁定后,桩体水平位移曲线呈波浪形,水平位移先随着深度逐渐减小,到达一定深度后逐渐增大,出现了局部位移最大值,且量值与桩体上部位移量相差较小。

2.3 讨论

比较3根桩桩体水平位移预测值与实测值,DH段18号桩、AD段40号桩位移预测结果的相对误差较小,预测值与实测值较接近;HJ段53号桩在一些位置出现了相对误差较大的情况,最大处达到32.78%。由于HJ段53号桩位于基坑南侧中部,整体位移量比其他2根桩小很多,而相对误差为误差除以实测值,实测值较小,因而计算出的相对误差较大。可见,对于水平位移量较大的桩体,可用BP神经网络预测未来几天桩体不同深度处的位移量,确定基坑的稳定性,但对于水平位移量较小的桩体,难以确保得到精确结果。

不同工况下,BP神经网络对不同深度处桩体水平位移的预测曲线与实测曲线具有相同的变化趋

势,且基本重合。对比3根桩体的水平位移变化曲线,发现工况发生变化时桩体位移曲线也会变化,第一排锚索未锁定时曲线为悬臂形,锁定完成后曲线呈波浪形,到第三排锚索锁定完成后曲线变为更明显的波浪形。随着锚索不断锁定,在桩身下部出现局部位移最大值,且其值不断增大,有超越桩体位移最大值的趋势,说明桩体最大位移位置随着锚索的不断锁定在下移,最后形成桩体的最大位移。BP神经网络可预测桩体的水平位移,预测结果符合工况改变时桩体位移的变化趋势。

3 结论

(1) 基坑开挖初期桩体位移在上部最大,随着深度的增加逐渐减小,呈悬臂形;后期锚索锁定后,位移曲线变为波浪形,桩体中下部出现局部位移最大值,桩体最大位移的位置向下移动,锚索有效限制了桩体的位移。

(2) 采用现场监测的桩身水平位移作为输入进行基坑变形预测能取得较精确的结果,且对工况变化时位移曲线的变化趋势有一定的适应性。利用BP神经网络预测桩体水平位移可靠。

(3) 桩身位移量较大时BP神经网络预测结果精度高,位移量较小时预测结果误差较大。对于位移大小的界限有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 韩立群.神经网络教程[M].北京:北京邮电大学出版社,2006.
- [2] 焦李成.神经网络系统理论[M].西安:西安电子科技大学出版社,1990.
- [3] 李彦杰,薛亚东,岳磊,等.基于遗传算法—BP神经网络的深基坑变形预测[J].地下空间与工程学报,2015,11(增刊2).
- [4] 向玮,张爱军,高伟.深基坑施工变形预测与控制方法研究[J].岩土工程学报,2012,34(增刊).
- [5] 吴瑞刚.深基坑桩锚支护体系坑角效应及其优化研究[D].西安:长安大学,2016.
- [6] 唐艳姣.成都地铁锦江站的基坑变形预测研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- [7] 刘雪剑.融合神经元网络与建模分析的基坑变形预测研究[D].北京:北京交通大学,2016.
- [8] 涂启柱.桩+喷锚支护在某新建站房土岩结合深基坑中的应用[J].铁道标准设计,2016(5).