

文章编号: 1000-5013(2007) 03-0304-04

预应力 CFRP 加固 RC 梁承载力的神经网络预测

杨勇新

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 基于人工神经网络的原理, 建立多因数智能分析模型, 对已有的数据进行反向传播 (BP) 神经网络的训练. 利用训练成熟的神经网络, 对承载力进行预测, 分析混凝土强度、截面高度、配筋率、配布率, 以及预应力度等参数对承载力的影响. 结果表明, 用训练好的网络模型可以较好地预测预应力碳纤维布 (CFRP) 加固后钢筋混凝土 (RC) 梁的受弯承载力, 预测精度较高, 可以处理模糊的、非线性的问题. 此外, 混凝土强度、梁截面高度、受拉钢筋配筋率和碳纤维布的配布率的增加, 受弯承载力也相应提高, 但施加的预应力提高对极限承载力并没有多大帮助, 只提高构件的开裂荷载和屈服荷载.

关键词: 预应力; 碳纤维布; 承载力预测; 神经网络; 加固

中图分类号: TU 378.202; TP 183

文献标识码: A

预应力碳纤维布 (CFRP) 加固技术的应用在近几年发展比较快, 这方面的试验研究也比较多. 由于碳纤维布粘贴在混凝土构件的外表面, 与混凝土协同工作, 共同承担外荷载, 同时对混凝土梁截面的刚度、裂缝的产生和扩展有一定的约束作用. 加固效果受很多因素的影响, 加固作用具有很高的非线性性质. 建立具体的模型需要大量的试验, 花费高, 有时还难以考虑试验条件的影响, 更难以建立具体的数学模型. 目前已有的试验资料还不能满足加固后结构可靠度分析的要求. 神经网络技术^[1-4]越来越广泛的应用于土木工程领域中^[5], 它允许大规模的并行运算处理, 使得计算速度极大地提高, 具有很强的容错性、很强的自学习和抽取归纳事物内在本质的能力, 对复杂的非线性建模问题非常容易. 本文利用训练成熟的神经网络技术, 对预应力碳纤维布加固的混凝土梁承载力进行预测.

1 BP 网络结构模型

神经网络模型有各种各样, 它们是从不同的角度对生物系统不同层次的描述和模拟, 代表性的网络模型有感知器、多层映射反向传播 (BP) 神经网络、径向基函数 (RBF) 神经网络、Hopfield 模型等. 虽然, 神经网络模型很多, 但目前应用最为广泛的是反向传播 (BP) 神经网络, 主要是由于这种网络的结构简单、工作状态稳定、易于硬件实现. 典型的 BP 网络是多层前向网络, 包括输入层、一个或多个隐含层和输出层, 各层之间实行全连接, 其模型如图 1 所示.

分析试验研究表明, 影响预应力碳纤维布加固混凝土梁承载力的因素, 除了与普通钢筋混凝土梁相同的一些因素外, 还有碳纤维布的抗拉强度和性能参数、碳纤维布加固量、施加预应力水平等. 在已有试验资料分析的基础上, 选择混凝土强度 f_c 、截面宽度 b 、截面高度 h 、钢筋抗拉强度 f_y 、碳纤维布抗拉强度 f_d 、预应力度 s 、混凝土弹性模量 E_c 、钢筋弹性模量 E_s 、碳

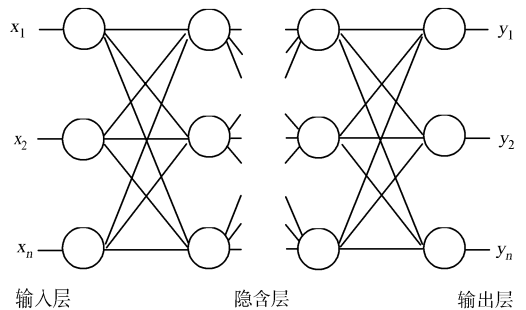


图 1 BP 神经网络结构

Fig. 1 The structure of BP neural network

收稿日期: 2006-11-15

作者简介: 杨勇新 (1963-), 男, 教授, 主要从事结构基本理论及高性能复合材料的研究. E-mail: yangyongxin@tsinghua.org.cn.

基金项目: 国家高新技术研究发展计划 (863) 项目 (2001AA336010); 国际合作攻关项目 (2005DBFA0002)

纤维布弹性模量 E_d 、配布率 σ 和配筋率 η 作为输入变量, 把预应力碳纤维布加固后梁的受弯承载力作为输出变量. 训练之前对样本进行归一化处理, 使输入值处于 0~ 1 之间, 这样有利于网络的训练, 缩短训练时间. 本模型选择的训练样本, 如表 1 所示. 表中的数据摘自文[6 9]. 经过多次训练比较, 我们选择

表 1 BP 模型训练样本

Tab. 1 The training samples of BP model

试件	f_c / MPa	b / mm	h / mm	f_y / MPa	f_d / MPa	s	E_c / MPa	E_s / MPa	E_d / MPa	σ / (%)	η / (%)
1a 3	25.59	150	300	391.96	3 700	0.160	28.0	210	246	0.055 7	0.147 5
1b 3	24.41	150	300	369.60	3 700	0.160	28.0	210	246	0.055 7	0.502 7
B6	25.00	100	150	309.90	4 200	0.250	28.0	210	230	0.113 3	0.670 2
B7	25.00	100	150	309.90	4 200	0.250	28.0	210	230	0.113 3	0.670 2
B8	25.00	100	150	309.90	4 200	0.140	28.0	210	230	0.113 3	0.670 2
B9	25.00	100	150	309.90	4 200	0.340	28.0	210	230	0.113 3	0.670 2
4 _{p,1.0m}	54.00	100	100	350.00	1 414	0.250	35.0	215	111	0.536 0	0.849 0
5 _{p,1.0m}	54.00	100	100	350.00	1 414	0.250	35.0	215	111	0.536 0	0.849 0
6 _{p,1.0m}	54.00	100	100	350.00	1 414	0.500	35.0	215	111	0.536 0	0.849 0
2 _{p,4.5m}	47.00	145	230	556.00	1 284	0.250	35.0	220	115	0.350 8	0.678 3
3 _{p,4.5m}	47.00	145	230	556.00	1 284	0.250	35.0	220	115	0.350 8	1.017 0
4 _{p,4.5m}	47.00	145	230	556.00	1 284	0.400	35.0	220	115	0.350 8	1.017 0
5 _{p,4.5m}	47.00	145	230	556.00	1 284	0.500	35.0	220	115	0.350 8	1.017 0
E3	53.00	100	100	350.00	1 226	0.175	34.0	215	135	1.040 0	0.849 0
E4	53.00	100	100	350.00	1 226	0.264	34.0	215	135	1.040 0	0.849 0
P3	45.00	130	230	556.00	1 226	0.345	35.0	220	135	0.391 3	1.050 0
P4	45.00	130	230	556.00	1 226	0.417	35.0	220	135	0.391 3	1.050 0
3	46.30	150	200	400.00	4 000	0.333	26.7	210	240	0.059 7	1.340 0
4	46.30	150	200	400.00	4 000	0.250	26.7	210	240	0.059 7	1.340 0
5	46.30	150	200	400.00	4 000	0.200	26.7	210	240	0.059 7	1.340 0
6	46.30	150	200	400.00	4 000	0.111	26.7	210	240	0.059 7	1.340 0
9	65.90	150	200	400.00	4 000	0.250	30.3	210	240	0.059 7	1.340 0
11	65.90	150	200	400.00	4 000	0.250	30.3	210	240	0.119 5	1.340 0
12	46.30	150	200	400.00	3 700	0.250	26.7	210	230	0.051 8	1.340 0

最佳隐含层数 n 为 10. 本文最终建立的反向传播(BP) 神经网络算法模型由含 11 个输入神经元的输入层, 含 10 个神经元的隐含层和含 1 个输出神经元的输出层构成. 网络学习、训练、收敛的过程, 如图 2 所示. 图 2 中, n 为训练次数, M 为训练精度.

2 承载力预测

用训练好的网络模型, 预测出本次预应力碳纤维布加固混凝土试验梁的受弯承载力, 预测值(F_1) 与试验结果(F_2) 如表 2 所示. 由预测结果可知, 本文建立的 BP 网络模型可以较好地预测预应力碳纤维布加固后混凝土梁的受弯承载力, 预测精度较高. 用神经网络技术来预测结果, 计算简单、准确, 根据已有的数据经验来学习, 可以处理模糊的、非线性的问题.

表 2 预测值与试验值比较

Tab. 2 Comparison between predictive values and experimental values

试件	F_1 / kN	F_2 / kN	F_1 / F_2	试件	F_1 / kN	F_2 / kN	F_1 / F_2
CB1	67.065	66.36	1.011	CB5	101.259	102.25	0.990

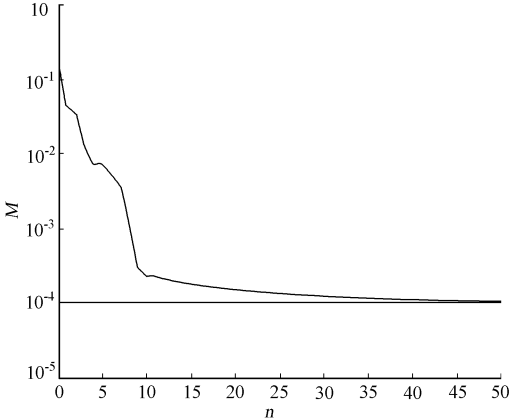


图 2 网络误差平方和与训练步数关系

Fig. 2 The relationship between the square sum of network errors and training steps

续表

Continued table

试件	F_1 / kN	F_2 / kN	F_1 / F_2	试件	F_1 / kN	F_2 / kN	F_1 / F_2
CB2	64.488	61.00	1.057	CB6	114.389	112.55	1.016
CB3	65.963	65.70	1.004	CB7	118.825	119.60	0.994
CB4	53.857	58.07	0.927				

3 参数分析

对于训练成熟的网络模型来说, 输入一定的变量即可得到预测的输出, 所以对预应力碳纤维布加固混凝土梁受弯承载力的影响因素可以用神经网络模型进行分析. 梁截面高度(h)、受拉钢筋配筋率(η)、施加预应力水平(预应力度) s 、预应力碳纤维布配布率 σ 对梁极限承载力 P 的影响, 如图 3 所示. 由图 3 可

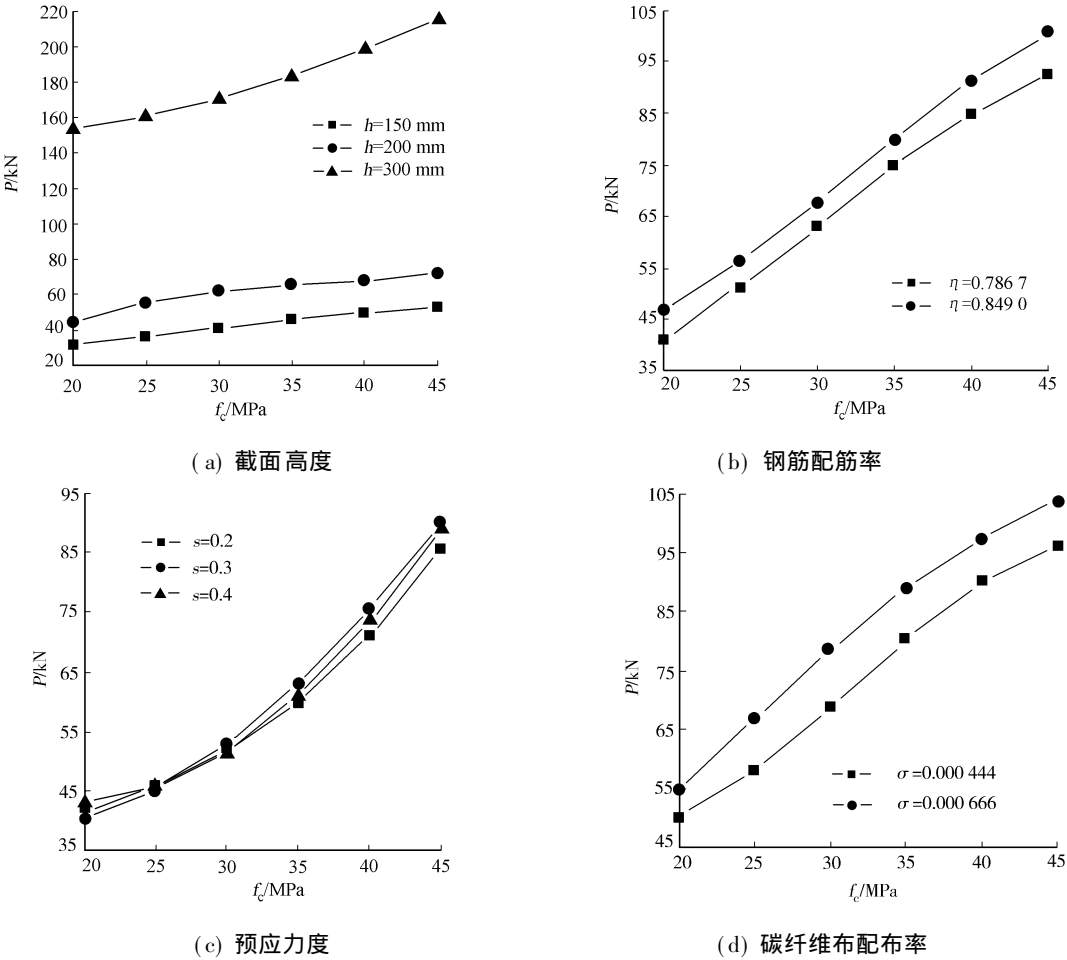


图 3 参数对承载力的影响

Fig. 3 The influence of the parameters on bearing capacity

知, 其他条件相同时, 随着混凝土强度提高, 受弯承载力提高; 随着梁截面高度的增加, 受弯承载力提高幅度增大; 随着受拉钢筋配筋率增加, 受弯承载力提高, 但提高的幅度并没有多大提高. 施加预应力水平的提高对极限承载力并没有多大帮助, 但从试验中知道, 施加预应力的提高, 可以提高构件的开裂荷载和屈服荷载. 随着碳纤维布的配布率增加, 极限承载力提高, 但幅度没有多大提高.

4 结束语

人工神经网络具有良好的非线性映射能力, 考虑的参数较多, 与其他方法相比具有较大的优越性. 本文利用神经网络技术对预应力碳纤维布加固混凝土梁的极限承载力进行预测, 结果表明模型具有较高的精度. 本文训练数据都是两点加载方式下的试验数据, 对其他荷载方式应另外选择样本进行建模.

虽然, 试验数据资料有限, 该神经网络的外推精度不具有理论上的可靠性, 但内插值还是具有一定的可靠性. 由于加固梁不只是考虑承载力的要求, 还可以预测试验过程中的挠度、裂缝的发展与分布等. 但是这些结果的试验数据比较少, 难以满足建模及训练的要求, 所以本文只考虑了承载力的预测, 全面的分析有待进一步研究.

参考文献:

[1] 楼顺天, 施 阳. 基于 MATLAB 的系统分析与设计: 神经网络[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.

[2] 闻 新, 周 露, 王丹力, 等. MATLAB 神经网络应用设计[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[3] 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, 1996.

[4] 曹焕光. 人工神经网络原理[M]. 北京: 北京气象出版社, 1992.

[5] 杨勇新, 王 敬, 岳清瑞, 等. 基于神经网络方法的碳纤维布加固混凝土梁承载力计算[J]. 工业建筑, 2002, 32(4): 1-5.

[6] 飞 渭, 彭飞飞, 江世永, 等. 预应力碳纤维布加固混凝土受弯构件试验研究[C] // 第二届全国土木工程用纤维增强复合材料(FRP)应用技术学术交流会论文集. 北京: 清华大学出版社, 2002: 280-287.

[7] GARDEN H N, HOLLAWAY L C. An experimental study of the failure modes of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carden composite plates[M]. Great Britain: Elsevier Svience Limited, 1998.

[8] QUANTRILL R J, HOLLAWAY L C. The flexural rehabilitation of reinforced concrete beams by the use of prestressed advanced composite plates[J]. Composites Science and Technology, 1998, 58(8): 1259-1275.

[9] 尚守平, 彭 晖, 童 桦, 等. 预应力碳纤维布材加固混凝土受弯构件的抗弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5): 24-30.

Neural Network Prediction of Bearing Capacity of RC Beams
Strengthened with Prestressed CFRP Sheets

YANG Yong-xin

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Based on the principle of back propagation (BP) neural network, a multi factors intelligence model to predict the bearing capacity of reinforced concrete (RC) beams strengthened with prestressed carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets is established. By the model, the bearing capacity of RC beams strengthened with prestressed CFRP sheets is predicted, and the action of key parameters is analyzed, such as the concrete strength, height of section, the area ratio of steel bar to concrete, the area ratio of CFRP sheet to concrete, and, the prestress degree and so on. The result indicates that the model can better predict the bending bearing capacity of RC beam strengthened with prestressed CPRP sheets. With increasing concrete strength, height of beam section, the area ratio of tensile steel bar to concrete and area ratio of CFRP sheet to concrete, the bending bearing capacity increases. The increase of prestress enhances the crack load and yield load, but slightly improves the ultimate bearing capacity.

Keywords: prestress; CFRP sheet; bearing capacity prediction; neural network; strengthening

(责任编辑: 黄仲一)