

基于 BP 神经网络的预应力组合梁承载力预测^{*}何余良¹, 张曙光¹, 邢渊², 杨赢¹, 晁春峰³

(1.绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000; 2.华汇设计集团有限公司, 浙江 绍兴 312000;

3.桥梁无损检测与工程计算四川省高校重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 为提高预应力钢—砼组合梁的设计效率及合理性, 精确预测其抗弯极限承载力, 文中采用 BP 神经网络算法建立具有多个输入、单个输出的 BP 神经网络预应力钢—砼组合梁抗弯极限承载力预测模型, 利用既有实测结果对该模型进行训练及验证, 结果表明 BP 神经网络预测效果较好, 其 40 次预测值与实测值比值的均值为 1.002, 具有较高的精度; 选取浙江省绍兴市壶觥大桥边跨主梁进行抗弯极限承载力预测分析, 结果表明该模型应用于实际工程可行, 可用于预应力钢—砼组合梁抗弯极限承载力确定。

关键词: 桥梁; 预应力钢—砼组合梁; BP 神经网络; 极限承载力

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)05-0095-05

目前, 针对预应力钢—砼组合梁抗弯极限承载力的研究方法主要有数值模拟、试验研究、理论方法。宗周红、陶慕轩等建立了考虑材料非线性及几何非线性的预应力钢—砼组合梁有限元模型; 聂建国等考虑预应力筋内力增量变化建立了预应力钢—砼筒支组合梁抗弯承载力计算方法; 胡少伟研究了不同初始预应力、加固位置、加载方式对预应力组合梁抗弯性能的影响, 推导了考虑预应力增量的极限抗弯承载能力计算公式; JGJ 369-2016《预应力混凝土结构设计规范》也对预应力钢—砼组合梁的抗弯承载力作了说明。由于预应力钢—砼组合梁兼有组合梁及预应力的特点, 结构形式复杂, 设计需考虑的参数多, 理论公式在实际应用中过于繁琐且与实际值存在较大误差, 不利于指导工程设计; 试验研究和数值模拟对多种参数变化的构件很难进行全面、系统的控制, 且会消耗大量人力、物力。因此, 需寻找一种在既有理论上能快速精确地确定预应力钢—砼组合梁承载力的方法。

人工神经网络是由大量人工神经元广泛互连组成的数学算法模型, 可模拟动物神经网络行为特征进行分布式并行信息处理, 通过调整大量内部节点之间的相互连接关系建立输入变量与目标输出的非线性映射关系, 准确预测结构设计所需关键参数。因此, 该文以 BP 神经网络为基础, 研究方便、快速确定预应力钢—砼组合梁承载力的方法。

1 BP 神经网络预测模型

1.1 BP 预测系统网络结构

BP 神经网络预测模型的拓扑结构包括输入层、隐含层、输出层, 属于多层前馈型神经网络结构, 每层节点的输出只影响相邻一层的节点(见图 1)。

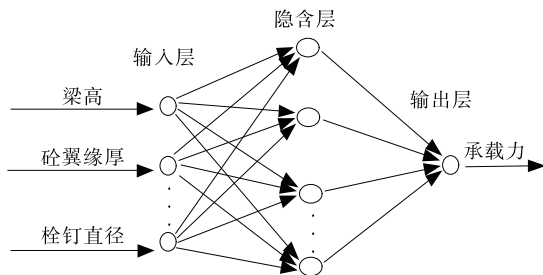


图 1 BP 神经网络结构模型

BP 神经网络具有非线性映射、自适应学习及较强容错性的特点, 理论上含有单个隐含层的 BP 网络模型可映射任意非线性关系。为提高网络预测精度, 采用单隐含层神经网络, 依次增加隐层节点数, 若网络预测精度达不到要求, 则继续增加隐含层, 直到达到要求为止。

1.2 BP 预测模型的实现

为全面考虑可控参数对预应力钢—砼组合梁极限承载力的影响, 将钢梁高、砼翼缘厚、砼强度、初始张拉预应力、栓钉直径等 11 个参数作为 BP 网络结

^{*} 基金项目: 浙江省基金“混杂纤维混凝土组合桥面板疲劳破坏机理及疲劳性能研究”(Y18E080056); 桥梁无损检测与工程计算四川省高校重点实验室开放基金项目(2014QZJ05)资助; 2019 年度浙江省交通质监行业科技计划项目(ZJ201908)

构的输入,以预应力钢-砼组合梁极限承载力为 BP 神经网络的输出。从国内外学者已实施的试验中选取具有代表性的 31 组数据作为基础数据(见表 1)。

利用 MATLAB2016 软件编写基于 BP 神经网络的预应力钢-砼组合梁抗弯极限承载力预测模型对其承载力进行评估。

表 1 预应力钢-砼组合梁极限承载力试验数据

文献 编号	组合 梁编 号	组合 梁高 h / mm	钢梁高 h_s / mm	钢梁 截面积 A_s / mm ²	型钢抗 拉强度 设计值 f_y /MPa	砼翼 缘宽 b_c / mm	砼轴心 抗压强 度设计值 f_c /MPa	预应力 筋截面 积 A_t / mm ²	预应力 筋到梁 底面距 离 h_t /mm	初始有 效预应 力 T_i / kN	跨长 L / mm	栓钉 直径 D / mm	极限抗 弯承载 力 M / (kN·m)
15	SB-2	340	250	4 850	310	900	23.1	275	30	278.20	4 150	6	359.1
16	A	436	360	7 990	350	915	33.8	402	57	49.00	4 575	13	690.0
17	BS-2	360	270	3 990	350	1 100	27.8	275	30	225.12	5 000	13	364.0
18	PSCB-1	300	180	6 300	310	1 000	27.5	275	50	275.60	5 000	22	653.0
	PSCB-2	300	180	6 300	310	1 000	27.5	550	50	351.10	5 000	22	717.0
19	A	442	352	5 724	350	1 070	27.5	360	30	266.80	4 572	19	697.0
20	PCB-4	300	170	6 400	310	800	27.5	365	40	215.10	3 750	16	473.9
21	1	330	250	2 868	310	800	35.0	275	55	163.90	4 000	16	209.0
	2	330	250	2 868	310	800	35.0	275	55	193.60	4 000	16	216.0
22	PC-3	300	200	4 650	215	600	14.3	314	30	348.10	4 360	16	136.5
	PC-4	300	200	4 650	215	600	14.3	353	30	331.10	4 360	16	153.7
23	N2	442	352	5 524	360	1 070	23.1	284	30	317.20	4 880	19	602.0
24	A	442	352	5 724	350	1 070	27.5	360	30	266.80	4 572	19	697.0
25	FPSCT-2	330	250	2 868	215	800	19.1	275	42	156.00	4 000	16	250.0
	PSCB-1	330	250	2 868	215	800	19.1	275	42	168.00	4 000	16	269.0
26	PCPB-1	360	270	4 840	310	900	19.1	275	40	223.40	4 500	16	404.8
	PCPB-2	360	270	4 840	310	900	23.1	275	40	219.30	4 500	16	407.0
	PCPB-3	360	270	4 840	310	900	19.1	275	40	227.10	4 500	16	378.3
	PCPB-4	360	270	4 840	310	900	23.1	275	40	238.60	4 500	16	412.4
	PCPB-5	360	270	4 840	310	900	19.1	275	40	219.10	4 500	16	405.2
	PCPB-6	360	270	4 840	310	900	23.1	275	40	220.30	4 500	16	409.4
	PCB-15	300	170	6 400	215	800	27.5	275	30	204.60	3 750	16	393.0
27	PCB-17	300	170	6 400	215	800	27.5	275	30	230.70	3 750	16	396.3
	PCB-19	300	170	6 400	215	800	27.5	275	30	191.70	3 750	16	454.4
	PCB-20	300	170	6 400	215	800	27.5	550	30	183.40	3 750	16	482.0
	SCB-21	300	170	6 400	215	800	27.5	275	30	199.90	3 750	16	472.8
28	SCB-22	300	170	6 400	215	800	27.5	275	30	242.50	3 750	16	494.6
	PCB-23	300	170	6 400	215	800	27.5	275	30	198.00	3 750	16	488.8
	PC-3	300	200	3 950	215	600	14.3	314	30	436.00	4 360	16	272.9
	PC-4	300	200	3 950	215	600	14.3	402	30	490.10	4 360	16	307.5
29	CB-2	230	180	3 510	215	700	27.5	236	30	158.30	2 800	13	270.3

基于 BP 神经网络的预应力钢-砼组合梁抗弯极限承载力预测模型分为学习阶段和测试阶段。先将样本随机分为训练样本及测试样本,利用训练样本经过反复训练,建立输入参数与目标输出之间的

非线性关系,达到迭代次数时训练结束;然后将测试样本导入训练好的网络模型中,测试神经网络的预测性能,若预测精度不满足要求,则重新调整神经网络模型进行训练,直至预测精度满足要求(见图 2)。

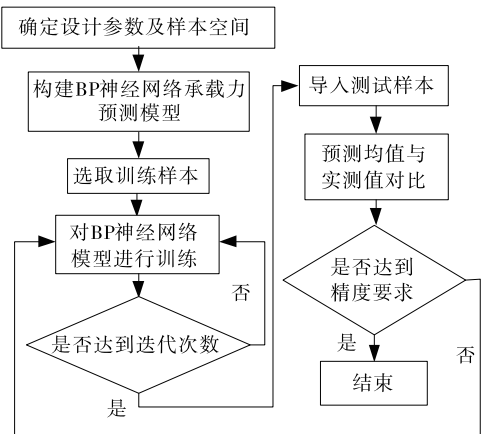


图 2 BP 神经网络预测流程

2 测试样本结果对比分析

2.1 BP 神经网络预测

从表 1 的 31 组样本中随机选取 10 组作为测试样本,其他为训练样本。分别建立单个隐含层及含有 2 个隐含层的 BP 神经网络预测模型,其中隐层节点数采用试算法确定,单个隐层节点数采用 $d = \sqrt{i+j} + c$ (i, j 分别为输入、输出层节点数, c 分别取 0~10 之间的正整数)确定,双隐含层通过改变一个隐含层节点数而另一个隐含层节点数不变来确定每层合理的隐含节点数。输入层与隐含层、隐含层与隐含层之间的传递函数均采用 sigmoid 型函数,隐含层与输出层之间的传递函数采用 purelin 型函数,训练函数采用 Levenberg-Marquardt 算法。隐层节点数为 5 的单隐层神经网络与前一隐层节点数为 6、后一隐层节点数为 4 的双隐层神经网络的预测结果见表 2。

由表 2 可知:两种神经网络的预测均值与实测值比值的协方差相近,但双隐层神经网络的预测值与实测值比值的均值更趋近于 1,其预测效果更好。采用基于双隐层神经网络的预应力钢-砼组合梁抗弯极限承载力预测模型分别对 10 组测试样本进行 20、40、60、80、100 次预测,结果见表 3。

由表 3 可知:10 组测试样本的预测均值与实测值比值的均值 AVG 在预测 40 次时为 1.002,最接近于 1,且 C_v 值最小,预测 40 次时的结果与实测值吻合最好,故选取预测 40 次时的结果作为 BP 神经网络预测值。

2.2 承载力评估

为检验 BP 神经网络对预应力钢-砼组合梁极

表 2 不同神经网络预测结果对比

组合梁 编号	实测 值/ (kN· m)	不同预测次数下 单隐层神经网络 预测均值与实测 值的比值		不同预测次数下 双隐层神经网络 预测均值与实测 值的比值	
		40 次	100 次	40 次	100 次
SB-2	359.1	0.96	0.94	0.98	0.98
PSCB-1	653.0	0.85	0.85	0.93	0.91
PSCB-2	717.0	0.91	0.91	0.92	0.92
PCB-4	473.9	0.94	0.95	1.03	1.01
FPSC-2	250.0	1.03	1.04	1.06	1.07
PSCB-1	269.0	0.98	0.99	0.99	0.99
PCPB-1	404.8	0.94	0.99	0.99	1.02
PCPB-2	407.0	0.98	1.02	1.03	1.04
PCB-15	393.0	1.08	1.08	1.14	1.16
SCB-21	472.8	9.00	0.89	0.95	0.96
均值 AVG	—	0.956	0.967	1.002	1.005
协方差 C_v	—	0.004 5	0.005 0	0.004 5	0.005 3

表 3 双隐层神经网络预测结果

组合梁 编号	不同预测次数下预测均值与实测值的比值				
	20 次	40 次	60 次	80 次	100 次
SB-2	1.02	0.98	0.98	0.96	0.98
PSCB-1	0.91	0.93	0.91	0.91	0.91
PSCB-2	0.89	0.92	0.91	0.92	0.92
PCB-4	1.07	1.03	1.02	1.01	1.01
FPSC-2	1.09	1.06	1.08	1.08	1.07
PSCB-1	1.02	0.99	1.01	1.00	0.99
PCPB-1	1.03	0.99	1.02	1.01	1.02
PCPB-2	1.06	1.03	1.05	1.04	1.04
PCB-15	1.15	1.14	1.13	1.15	1.16
SCB-21	0.95	0.95	0.96	0.96	0.96
均值 AVG	1.017	1.002	1.008	1.004	1.005
协方差 C_v	0.006 5	0.004 5	0.005 7	0.005 3	0.005 3

限承载力的预测精度,对表 2 中 10 组测试样本分别采用文献[7]、[9]、[10]中的理论公式计算预应力钢-砼组合梁的极限承载力。计算时忽略钢与砼间的滑移效应,只考虑预应力筋内力增量对极限抗弯承载力的影响。预测值和理论公式计算极限承载力与实测值的对比见表 4。

由表 4 可知:文献[7]、[9]、[10]的理论计算结果及神经网络预测结果与实测值的比值的均值分别为 0.819、0.83、0.783、1.002,计算值均低于实测值,文献[7]、[9]中公式计算值相近但高于规范值,说明理论公式偏于保守;预测值与实测值最接近,且其协

方差最小,说明 BP 神经网络预测值与实测值吻合最好。BP 神经网络可用于精确确定预应力钢—砼组合梁的抗弯极限承载力。若要进一步确定预应力

钢—砼组合梁各关键参数,可通过不断调整各参数,运用 BP 神经网络对每组参数进行反复预测,确定达到设计承载力所需最优参数组合。

表 4 各计算方法计算结果、预测值及实测值的对比

组合梁 编号	文献[7]计算结果		文献[9]计算结果		文献[10]计算结果		神经网络预测结果	
	计算值/ (kN·m)	计算值/ 实测值	计算值/ (kN·m)	计算值/ 实测值	计算值/ (kN·m)	计算值/ 实测值	预测值/ (kN·m)	预测值/ 实测值
SB-2	374.4	1.04	326.8	0.91	331.8	0.92	353.3	0.98
PSCB-1	441.4	0.68	430.9	0.66	481.6	0.74	605.1	0.93
PSCB-2	417.9	0.58	402.3	0.56	568.3	0.79	657.8	0.92
PCB-4	396.1	0.84	303.5	0.64	284.7	0.60	489.9	1.03
FPSCT-2	236.2	0.94	272.3	1.09	193.1	0.77	265.6	1.06
PSCB-1	239.1	0.89	275.5	1.02	193.1	0.72	266.0	0.99
PCPB-1	355.7	0.88	374.2	0.92	332.6	0.82	399.8	0.99
PCPB-2	380.1	0.93	391.4	0.96	347.9	0.85	418.2	1.03
PCB-15	303.3	0.77	317.4	0.81	370.6	0.94	446.5	1.14
SCB-21	300.6	0.64	346.1	0.73	319.6	0.68	446.6	0.95
协方差 C_v	—	2.2×10^{-2}	—	3.2×10^{-2}	—	1.2×10^{-2}	—	4.5×10^{-3}

3 实例验证

壶觞大桥位于绍兴市 X107 尹家畈一大林埠段,因其病害多且已多次进行维修加固,拟对其进行改造,改造时主梁采用钢—砼组合结构。取边跨主梁进行分析,砼采用 C50、NH650×320 工字钢、Q345NH 钢材、ML15 剪力连接件、直径 $\phi 22$ 栓钉。在原设计基础上增加体外预应力作用,预应力筋采用 7 $\phi 5$ 钢绞线,极限强度标准值 $f_{ptk}=1\ 570$ MPa,初始有效张拉预应力取 $0.5f_{ptk}$ 。其结构见图 3。

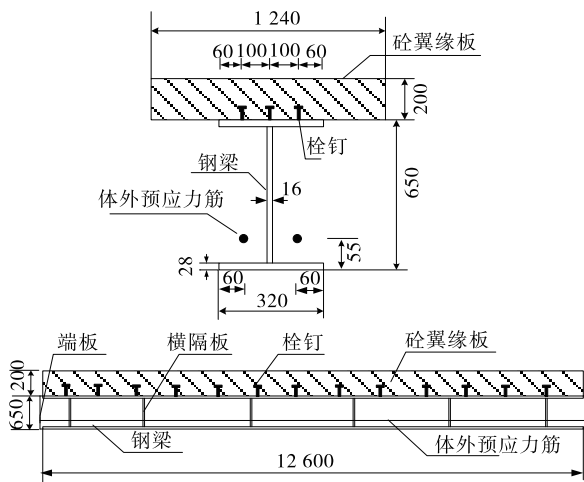


图 3 实例预应力钢—砼组合梁结构示意图(单位:mm)

将该组合梁的相关参数输入训练好的 BP 神经

网络中,对其抗弯极限承载力进行预测,取 40 次预测均值作为最终预测结果。文献[7]、[9]、[10]的抗弯极限承载力计算结果分别为 4 229.1、4 622.8 和 3 148.7 kN·m, BP 神经网络预测均值为 6 549.7 kN·m。抗弯极限承载力公式计算值、BP 神经网络预测均值与表 5 中 10 组测试样本具有相同趋势。由于规范计算值是在使用状态下按照材料设计值进行计算得到的,而预测模型采用的样本均是极限状态下破坏承载力,因此两者差距较大。

4 结语

为精确预测预应力钢—砼组合梁的抗弯极限承载力,建立 BP 神经网络预应力钢—砼组合梁抗弯极限承载力预测模型,该方法突破了传统理论推导及经验公式的求解方式,以既有试验数据为样本建立各影响因素与预应力钢—砼组合梁极限承载力之间的非线性映射关系。通过选取测试样本的试验值分别与理论公式和双隐层 BP 神经网络预测值进行对比,发现预测 40 次的均值与实测值比值的均值为 1.002,具有较高精度。BP 神经网络可用于预应力钢—砼组合梁抗弯极限承载力确定。

参考文献:

- [1] Tarek Ebeido. Punching strength of deck slabs in skew composite bridges[J]. Journal of Bridge Engineering,

- 1996,1(2).
- [2] 梁纬球,杨涛,陆艺.体外预应力钢-混凝土组合梁连续倒塌性能分析[J].广西大学学报:自然科学版,2015,40(4).
- [3] 聂建国,陶慕轩.体外预应力钢-混凝土组合梁受力性能的研究现状与展望[J].工程力学,2011,28(增刊2).
- [4] 宗周红,车惠民,房贞政.预应力钢-混凝土组合梁有限元非线性分析[J].中国公路学报,2000,113(2).
- [5] 陶慕轩,聂建国.预应力钢-混凝土连续组合梁的非线性有限元分析[J].土木工程学报,2011,44(3).
- [6] Nie J G, Cai C S, Zhou T R, et al. Experimental and analytical study of prestressed steel-concrete composite beams considering slip effect[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(4).
- [7] 聂建国,陶慕轩.预应力钢-混凝土连续组合梁的承载力分析[J].土木工程学报,2009,42(4).
- [8] 聂建国,周天然,秦凯,等.预应力钢-混凝土组合梁的抗弯承载力研究[J].工业建筑,2003(12).
- [9] H U Shaowei. Experiment and analysis of flexural capacity and behaviors of pre-stressed composite beams[J]. Automation in Construction, 2014, 37.
- [10] JGJ 369-2016, 预应力混凝土结构设计规范[S].
- [11] Arafa M, Alqedra M, Annajjar H. Neural network models for predicting shear strength of reinforced normal and high-strength concrete deep beams[J]. Journal of Applied Sciences, 2011, 11(2).
- [12] 杨杰,李爱群,缪长青. BP神经网络在大跨斜拉桥的斜拉索损伤识别中的应用[J]. 土木工程学报, 2006, 39(5).
- [13] 魏海斌,张仰鹏,焦峪波,等.钢-混凝土组合梁挠度增大系数的神经网络计算方法[J]. 吉林大学学报:工学版, 2014, 44(4).
- [14] Yan B, Cui Y, Zhang L, et al. Beam structure damage identification based on BP neural network and support vector machine[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014(2).
- [15] 沈为民,宗周红,房贞政.预应力组合简支梁试验研究[J].福州大学学报:自然科学版,2001,29(5).
- [16] Saadatmanesh H, Albrecht P, Ayyub B M. Analytical study of prestressed composite beams[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 115(9).
- [17] Chen S, Gu P. Load carrying capacity of composite beams prestressed with external tendons under positive moment[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(4).
- [18] 冉崑.体外预应力钢-混凝土组合梁受弯性能理论分析与试验研究[D].南京:东南大学,2006.
- [19] Ayyub B M, Sohn Y G, Saadatmanesh H. Prestressed composite girders under positive moment[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(11).
- [20] 胡少伟,陈亮,胡汉林.预应力钢箱高强混凝土组合箱梁抗弯承载能力研究[J].土木工程学报,2011,44(6).
- [21] 荆世繁.体外预应力钢-轻骨料混凝土简支组合梁承载能力实验研究[D].长春:吉林大学,2008.
- [22] 王骅.体外预应力钢-混凝土组合梁试验与理论研究[D].上海:同济大学,2004.
- [23] Albrecht P, Li W, Saadatmanesh H. Fatigue strength of prestressed composite steel-concrete beams[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(12).
- [24] Ayyub B M, Sohn Y G, Saadatmanesh H. Prestressed composite girders under positive moment[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(11).
- [25] 张云龙.体外预应力钢-混凝土组合梁结构行为的试验研究[D].长春:吉林大学,2005.
- [26] 林传金.体外预应力钢-混凝土组合梁非弹性研究[D].福州:福州大学,2006.
- [27] 胡汉林.预应力组合箱梁结构抗弯性能试验研究与理论分析[D].南京:南京水利科学研究院,2010.
- [28] 王骅.体外预应力钢-混凝土组合梁试验与理论研究[D].上海:同济大学,2004.
- [29] 洪英维.体外预应力钢箱-混凝土组合梁试验研究[D].南京:南京工业大学,2005.
- [30] 过镇海.钢筋混凝土原理[M].北京:清华大学出版社,2013.

收稿日期:2018-09-25

(上接第55页)

版社,2017.

- [4] 张廷雷,方明,李建兵,等.基于规划求解的工程混合料最优配合比设计[J].施工技术,2012(12).
- [5] 王国清.旋转剪切压实法(GTM)混合料设计与施工技术指南[M].北京:人民交通出版社,2006.
- [6] 李正中,何兆益,宋晓燕,等.基于GTM方法的橡胶沥

青混合料性能试验[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2008,28(4).

- [7] JTG F40-2004,公路沥青路面施工技术规范[S].
- [8] CQJTG/T A01-2015,重庆高速公路沥青路面技术规范[S].

收稿日期:2018-12-04