

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.01.011



# 带锚 FRP 受剪加固梁非剥离破坏模式 BP 网络预测

任达<sup>1,2</sup>, 周朝阳<sup>2</sup>, 刘坚<sup>1</sup>, 刘君<sup>2</sup>, 贺学军<sup>2</sup>

(1. 广州大学 土木工程学院, 广州 510006; 2. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075)

**摘要:**对带可靠锚固 FRP 受剪加固混凝土梁的非剥离剪切破坏模式做了细化分类,即包括 FRP 断裂控制的破坏、受压区混凝土(达到极限应力状态)压碎控制的破坏、FRP 断裂与混凝土压碎同步发生的界限破坏等 3 种模式;利用 BP 神经网络建立了带锚纤维受剪加固梁破坏模式的智能预测模型,与 31 根非剥离破坏加固梁试验的对比结果显示:模型总体精度达到 90%,说明建立的破坏模式网络预测模型适用于带锚纤维受剪加固梁非剥离剪切破坏模式的判别。

**关键词:**混凝土梁;神经网络;破坏模式;纤维增强聚合物;加固

**中图分类号:** TU375.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)01-0077-09

## Prediction of failure modes for RC beams shear-strengthened with well-anchored FRP composites using neural networks

Ren Da<sup>1,2</sup>, Zhou Chaoyang<sup>2</sup>, Liu Jian<sup>1</sup>, Liu Jun<sup>2</sup>, He Xuejun<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, P. R. China)

**Abstract:** For RC beams strengthened in shear with well-anchored FRP strips, potential key factors causing shear failure are described which would give rise to three kinds of shear failure modes. A model of artificial neural network (ANN) has been developed to predict the shear modes of failure for them. And the prediction by the ANN model agrees well with the observation from the test reports. The result showed that the proposed model is fit for predicting the shear failure modes of beams shear-strengthened with well-anchored FRP composites.

**Keywords:** concrete beams; artificial neural network; failure mode; fiber reinforced polymers; strengthening

纤维增强聚合物(Fiber Reinforced Plastic/Polymer,简称 FRP)具有轻质高强、耐腐蚀、易操作、免维护等优点,工程中常作为加固材料,以片材

形式粘贴于混凝土结构表面<sup>[1-2]</sup>。当对梁进行受剪加固时,一般有封闭、U 形和侧面等 3 种粘贴方式。封闭粘贴加固效果较好,但需大量穿墙凿孔施工,

收稿日期:2016-06-09

基金项目:广州市属高校科技计划(1201420968);住房与城乡建设部项目(2013-K2-24)

作者简介:任达(1974-),男,副教授,博士生,主要从事混凝土结构设计及加固理论研究,(E-mail)renda20099@126.com。

Received:2016-06-09

**Foundation item:** Science and Technology Program of Guangzhou, China (No. 1201420968); Science and Technology Program of Ministry of Housing and Urban-Rural Development of China(No. 2013-K2-24)

**Author brief:** Ren Da (1974-), associate professor, PhD candidate, main research interest: structural concrete design and strengthening, (E-mail) renda20099@126.com.

应用不便。后 2 种为非封闭粘贴方式,主要依靠界面粘结传递剪力,其端部易与混凝土界面发生剥离<sup>[2]</sup>,纤维高抗拉强度可能得不到充分发挥,影响加固效果。试验表明,对 U 形纤维布带(简称 U 箍)端部施加锚固是一种行之有效的做法<sup>[3-5]</sup>。U 箍端锚后与封闭粘贴效果相当,即便沿梁高发生剥离,锚固良好的 FRP 箍仍能继续承担剪力,荷载仍能进一步增加,直至纤维被拉断或因混凝土压碎而破坏。可见,封闭粘贴与带端锚 U 形粘贴,均能有效防止因纤维剥离所致的剥离破坏,故以下“带锚”提法,通指梁侧纤维布端带可靠锚固,能有效防止剥离破坏的各种情形,不仅包括带(机械)可靠锚固措施的 U 箍,即便无附加锚固措施,单靠粘接实现梁侧纤维可靠锚固的其它情形(如封闭粘贴,或当梁高足够大,U 箍的两肢在梁侧粘结长度足够),亦在其中。

以往带锚纤维受剪加固梁破坏模式的研究大多限于对试验观测做定性描述,极少涉及模式判别。事实上,破坏模式的准确判别不仅有助于把握机理,而且对于承载力计算也有重要作用。区分不同模式计算承载力符合一般设计理论的要求,对于提高模型的精度亦有积极意义。加固梁承载力一般通过混凝土、钢箍与纤维 3 部分抗剪贡献叠加得到,FRP 贡献由其有效应变算得,因此,纤维应变的计算,作为承载力计算的一部分也宜在模式判别的基础上进行。对此,各规范做法不尽相同<sup>[6]</sup>:英国、加拿大及澳洲规范仅区分了由 FRP 拉断与剥离控制的两类剪切破坏形态,而带锚 FRP 受剪加固梁可能的破坏模式,除 FRP 拉断外,还包括其它非剥离模式,需进一步细分;美国、欧洲及意大利简单考虑了封闭与非封闭粘贴情形的不同,由于非封闭(U 箍)粘贴不能完全排除纤维拉断等非剥离破坏的可能,因而至多相当于对破坏模式的一种粗略考虑;中国和日本规范未做任何区分。

由于带锚 FRP 加固梁剪切机理非常复杂,理论上建立破坏模式判别条件有一定难度。人工神经网络(artificial neural network)是模仿人脑信息处理机制提出的一种数学工具,具有较强的非线性映射能力,对模糊、不确定信息有良好容错性,常用于理论建模有困难的场合。人工神经网络在土木领域的应用涉及材性分析、承载力预测、损伤识别等诸多方面,在 FRP 加固混凝土结构方面,也有

了一些尝试<sup>[7-11]</sup>。如,杨勇新<sup>[9]</sup>曾将其用于预应力 CFRP 加固混凝土梁弯曲承载力计算,Perera 等<sup>[10]</sup>、Tanarslan 等<sup>[11]</sup>对 FRP 受剪加固混凝土梁剪切承载力所做的研究等。笔者借助神经网络建立预测模型,用于带锚 FRP 受剪加固梁破坏模式的判别。

## 1 带锚 FRP 受剪加固梁的剪切破坏模式

普通混凝土梁斜截面受剪破坏模式一般分为斜拉(或剪拉)、剪压、斜压(或深梁剪切)等 3 类。梁的抗剪承载力与破坏形态、剪弯区段中各竖直截面的弯矩和剪力的组合情况(即剪跨比)密切相关,剪跨比对斜裂缝的发展以及破坏模式影响很大,尤其对于无腹筋梁,当以集中荷载作用为主时,基本决定了普通梁的斜截面破坏形态。

当外贴纤维对梁进行加固后,纤维参与受剪过程中会抑制裂缝的开展,纤维丝受拉松弛乃至断裂都将改变梁内混凝土与钢箍的应力分布,应力重分布使得梁内 3 部分(即混凝土、钢箍、纤维箍)承担的剪力此消彼长,当各部分贡献盈亏相抵后,总剪力即将由升转降时,荷载即达峰值。导致峰值(破坏)荷载出现的诱因主要包括:混凝土失效、钢箍屈服、FRP 剥离、FRP 局部断裂、锚固区局部破坏等。在缺乏可靠锚固的情况下,外贴 FRP 布带抗剪加固梁,较易发生 FRP 布带-混凝土界面剥离,剥离后 FRP 布带立即退出工作,所卸载的剪力往往使得其它部分无力承担,因而成为梁剪切失效的直接原因;在具备可靠锚固的条件下,布带剥离后,剪力传递机制发生了改变,即由依靠界面粘结传力转为依靠锚固直接受拉(仍由纤维自身)承担,剥离不再是主要诱因,若不考虑锚固区域的局部破坏情形,依据诱因的不同,可将带锚 U 形纤维箍加固梁的非剥离破坏模式划分为 3 类:FRP 束局部/整体断裂破坏;剪压(或斜压)区混凝土达到复合应力极限状态而失效,即混凝土压碎破坏;FRP 断裂与混凝土压碎同步(即接近同时)发生的界限剪切破坏。已有的试验表明,第 1、3 类破坏脆性显著,第 2 类模式在混凝土失效后,仍能凭借高抗拉强度的 FRP 兜住受压区已裂损的混凝土块继续持载一段时间,表现出一定的后期剪切延性。

## 2 破坏模式预测模型的构建

### 2.1 建模工具的选择——神经网络

对带锚纤维受剪加固梁非剥离破坏模式的准确判断有赖于对其破坏机构的合理把握。结构构件在破坏时的机构一般分为两类:串联机构和并联机构。前者各部分形如链条串联,某个截面失效即意味着整体破坏或断链;后者各部件以并联方式构成,只有全体部件都失效才导致机构发生破坏。导致带可靠锚固 FRP 受剪加固梁破坏的诱因较多,破坏机构具有并联机构的特征,即由内部钢箍、混凝土与端锚 FRP 布箍并联而成。研究表明,3 部分抗剪贡献之间存在相互作用,即各并联元件之间并不完全独立,这进一步增加了破坏机构的复杂程度。

神经网络的突出特点是能解决高度非线性问题,能对不确定或模糊信息进行处理,因而非常适合处理机构复杂的模式判别问题。其中,多层前馈神经网络是目前应用最广泛的网络模型之一。图 1 是一个典型的多层前馈网络,它由输入层、输出层和 1 个以上的隐含单元层(隐层)组成,各层均由若干单神经元构成,每层各神经元只接收前一层神经元的输出信号。

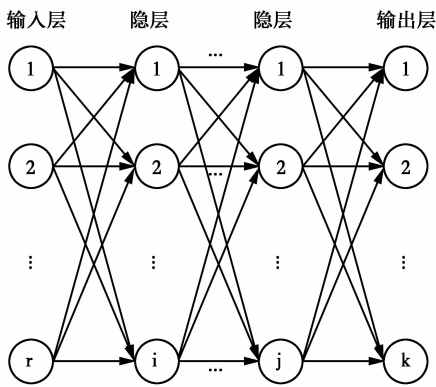


图 1 神经网络拓扑结构

Fig. 1 Topological diagram for neural network

图 2 是单神经元的结构示意图,其中  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为该神经元的若干输入信号;  $w$  为各输入信号与该神经元之间的连接强度或系数,称为连接权值;  $\theta$  为神经神经元的阈值,若将  $\theta$  看成是神经元的固定输入  $x_0$  ( $x_0 = -1$ ) 的权重  $w_0$ , 神经元输出与输入的关系可用向量形式表示为  $y = f(N)$ , 其中  $N = X^T W$ ,  $X = [x_0 \ x_1 \ \dots \ x_n]^T$ ,  $W = [w_0 \ w_1 \ \dots \ w_n]^T$ ,  $f(x)$  是传递或激活函数。网络中任一神经元

输入和输出均为非线性映射,整个网络输入、输出向量之间为高度非线性函数关系。它通过具体算法学习训练,将样本数据中的关键信息提取出来,建立输入输出间的非线性映射关系,并据此由新的输入来推算输出结果。

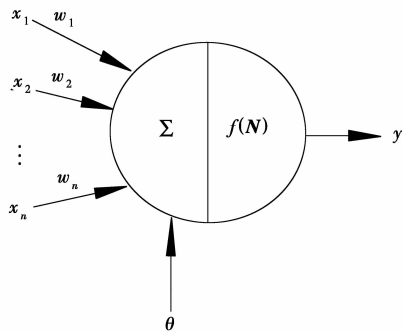


图 2 单神经元结构

Fig. 2 Single neuron

网络模型采用较多的是误差反向传播算法 (Back Propagation 简称 BP 算法),即根据实际输出和目标输出之间的误差,采用梯度下降法逐层调整连接权及阈值,直到两者误差的平方和小于某规定值,此时各层神经元连接权和阈值唯一确定了一个非线性映射关系——BP 网络,更详细的讨论参见相关文献[12]。

### 2.2 输入与输出参量的选取

影响带锚纤维箍抗剪加固梁受剪性能的因素非常多,既包括原梁本身参数(如混凝土强度、梁高、配箍率等),也包括与纤维加固有关的加固参数(纤维箍种类、强度、分布等),且某些因素相互之间并不完全独立,在选择输入参量时,必须合理考虑。具体来说,首先应尽量做到覆盖全面,信息量(参数变化范围)应尽可能大,尤其不能漏选对期望输出参量有重要影响的参数(例如,就剪切破坏模式而言,剪跨比就是一个权重较大的影响因素)。另一方面,也应分主次,注重模型简明高效。为此,基于相关试验研究结果,按照“宁重不漏、涵盖重点、信息完整、运行高效”的原则,选取了 13 个输入参量,主要包括:混凝土圆柱体抗压强度  $f'_c$ 、腹板宽度  $b_w$ 、有效梁高  $h_0$ 、剪跨比  $\lambda$ 、钢箍强度  $f_{yv}$ 、钢箍配箍率  $\rho_{sv}$ 、纵筋配筋率  $\rho_{sl}$ 、钢筋弹性模量  $E_s$ 、纤维弹性模量  $E_f$ 、纤维抗拉强度  $f_{tu}$ 、纤维箍宽度与间距比值  $w_f/s_f$ 、配纤率  $\rho_f$ 、端锚系数  $\beta$ (带可靠锚固取 1,无锚固措施取 0),并将剪切破坏模式  $m_s$  作为唯一输出参量。

### 2.3 网络模型拓扑结构

神经网络理论认为,3层 BP 网络具有逼近任何复杂非线性函数的能力,因而采用含一个隐层的 BP 网络构建带锚纤维箍抗剪加固梁破坏模式预测模型。隐层神经单元数目的取法,目前主要是采取经验试探法,先根据经验估计一个大致范围,再通过试探选取最优值,文献[13]分析并提出了一个“黄金分割”经验公式,具有一定的合理性,见式(1)。

$$n_h = \begin{cases} n + 0.618 \cdot (n - m) & n \geq m \\ m - 0.618 \cdot (m - n) & n < m \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $n$  为输入节点数;  $m$  为输出节点数。参照式(1),带锚 FRP 受剪加固梁 BP 网络模型,隐层节点数量初步估计值为 20 个,在估计值( $n_h = 20$ )附近一定范围内(如  $n_h \pm 10$ )进行试探,再通过训练试算最终确定单隐层包含 19 个单元。图 3 所示即为带锚固 FRP 受剪加固梁 BP 破坏模式网络预测模型拓扑结构。由图 3 可知,网络模型结构由 1 个输出层(含 13 个节点)、1 个隐含层(含 19 个节点)和 1 个输出层(含 1 个节点,即破坏模式)组成,简记为 13-19-1。

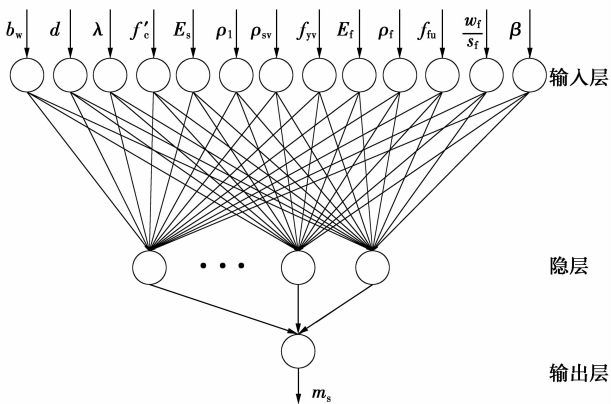


图 3 带可靠锚固 FRP 受剪加固梁非剥离破坏模式网络预测模型拓扑结构

Fig. 3 Predictive model of shear failure mode for beams shear-strengthened with well-anchored FRP

### 2.4 试验数据的预处理

BP 网络模型训练前,往往需要对样本数据做预处理,这里主要包括输入、输出数据的归一化和破坏模式这一输出参量的量化。网络中,非线性传递函数(logsig 函数和 transig 函数)值一般处于  $[0, 1]$  或  $[-1, 1]$  区间内,为避免输入向量中的数据 and 期望输出数据可能存在数量级上的过大差别,导致数据计算精度无法保持一致,需要对所有输入数据、输出数

据(即剪切破坏模式)作归一化处理(即将数据转换至  $[0, 1]$  区间),由于传递函数在靠近各自区间端点时,曲线较为平缓,函数值变化速度比较慢,为减少网络训练时间,实际按式(2)处理。

$$x_1 = 0.1 + 0.8 \cdot \frac{x_0 - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, x_1 \in [0.1, 0.9] \quad (2)$$

式中:  $x_0$  为原始数据;  $x_1$  为归一化转换后的数据;  $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$  分别为原始数据中的最大与最小值,使转换后的所有数据组位于  $0.1 \sim 0.9$  之间,以改善网络收敛速度。

此外,由于破坏模式是定性的描述型变量,作为输出变量还存在如何量化的问题。引入剪切破坏模式量化指标  $m_s$ , 取值约定为:FRP 断裂破坏  $m_s = -1$ , 混凝土压碎破坏  $m_s = 1$ , 界限剪切破坏  $m_s = 0$ ; 用式(2)进行归一化处理后的指标  $m'_s$  详见表 1。

考虑到模式输出值恰好等于 3 类模式  $m'_s$  值的情况极少,更多情况为  $[0.1, 0.9]$  范围内的任意值,因而,需要对输出数据中,介于归一化标准模式值中间的数值进行辨识,注意到 3 种模式  $m'_s$  值之间相差均为 0.4,以相邻两者的中间值 0.3 与 0.7 为界,按“最接近原则”,即模式输出值距离 3 类模式  $m'_s$  值的远近,将其归为最接近的那一类破坏模式,因此,确定了一个指标有效范围,无论输出值落在哪个区间内,都有特定的剪切破坏形态与之对应(见表 1)。

表 1 破坏模式的量化与归类

Table 1 Quantification and identification of mode of failure

破坏模式	量化指标 $m_s$	归一化 指标 $m'_s$	指标有效范围
FRP 断裂破坏	-1	0.1	$[0.1 \sim 0.3)$
界限破坏	0	0.5	$[0.3 \sim 0.7)$
混凝土压碎破坏	1	0.9	$[0.7 \sim 0.9]$

### 2.5 网络学习与训练

关于训练样本数的选择,单纯增加绝对数量并不一定带来更好的训练效果,在某种程度上,样本所包含的信息量更为关键。表 2 为所搜集文献中 81 根试验梁数据,它们的纤维抗剪加固方案不尽相同,但破坏形态均为非剥离破坏,参数变化基本覆盖了工程中加固梁的常规范围。表中列出了这些试件的主要相关参数,并根据上述原则,从中选取了信息容量较大的 50 根梁用于网络训练。

表 2 各有关文献非剥离剪切破坏试验梁主要数据一览表

Table 2 Available sample database on beams strengthened in shear with well-anchored FRP laminates

来源 文献	试件 编号	腹板宽 度/mm	梁高/mm	$f'_c$ /MPa	剪跨比	配箍 率/%	纤维抗拉 强度/MPa	$E_f$ / GPa	配纤 率/%	$\omega_f$ / $s_f$	端锚 系数	极限剪 力/kN	破坏 模式
[15]	3	100	200	24.1	2.50	0	2646	230	0.194	1	1	116.6	压碎
[14]	E1	63.5	190.5	41.8	2.67	0	171.6	14.3	1.440	1	0	36.7	拉断
[14]	E2	63.5	190.5	48.3	2.67	0	171.6	14.3	1.440	1	0	34.0	拉断
[14]	G1	63.5	190.5	43.9	2.67	0	185.7	21.0	1.840	1	0	35.5	拉断
[14]	G2 *	63.5	190.5	47.1	2.67	0	185.7	21.0	1.840	1	0	36.4	界限
[14]	45G1 *	63.5	190.5	47.1	2.67	0	185.7	21.0	1.840	1	0	37.5	界限
[14]	45G2 *	63.5	190.5	41.8	2.67	0	185.7	21.0	1.840	1	0	47.26	界限
[17]	No. 2	250	500	32.6	2.50	0	3 990	244	0.035	0.4	1	285.2	拉断
[17]	No. 3 *	250	500	32.6	2.50	0	2 920	90.0	0.058	0.4	1	236	拉断
[17]	No. 7	400	700	34.6	2.50	0	3 990	244	0.022	0.4	1	568.8	拉断
[17]	No. 8 *	400	700	34.6	2.50	0	2 920	90.0	0.033	0.4	1	529.6	拉断
[16]	CF-045	200	400	24.8	1.50	0.19	3 480	230	0.026	0.23	1	236	拉断
[16]	CF-064	200	400	24.9	1.50	0.19	3 480	230	0.045	0.41	1	262	拉断
[16]	CF-097	200	400	25.2	1.50	0.19	3 480	230	0.077	0.7	1	307	拉断
[16]	CF-131	200	400	25.4	1.50	0.19	3 480	230	0.111	1	1	358	拉断
[16]	CF-243	200	400	25.6	1.50	0.19	3 480	230	0.222	1	1	407	拉断
[16]	AF-060	200	400	25.8	1.50	0.19	2 450	87.0	0.059	0.41	1	237	拉断
[16]	AF-090	200	400	25.9	1.50	0.19	2 450	87.0	0.100	0.7	1	259	拉断
[16]	AF-120	200	400	26.1	1.50	0.19	2 450	87.0	0.144	1	1	312	拉断
[18]	BS7	200	450	34.7	3.00	0.07	3 494	279.5	0.028	0.13	1	235.5	压碎
[19]	G5.5-1L	92	444.5	37.9	2.00	1.10	3 650	231	0.237	1	0	320.3	压碎
[19]	G5.5-2L	92	444.5	37.9	2.00	1.10	3 650	231	0.475	1	0	342.5	压碎
[19]	G8-1L	92	444.5	37.9	2.00	0.76	3 650	231	0.237	1	0	298.0	压碎
[19]	G8-2L	92	444.5	37.9	2.00	0.76	3 650	231	0.475	1	0	329.2	压碎
[19]	G8-3L *	92	444.5	37.9	2.00	0.76	3 650	231	0.712	1	0	351.4	界限
[19]	G16-1L *	92	444.5	37.9	2.00	0.38	3 650	231	0.237	1	0	275.8	界限
[19]	G16-2L *	92	444.5	37.9	2.00	0.38	3 650	231	0.475	1	0	320.3	界限
[19]	G24-1L *	92	444.5	37.9	2.00	0.25	3 650	231	0.237	1	0	258.0	界限
[19]	G24-2L *	92	444.5	37.9	2.00	0.25	3 650	231	0.475	1	0	253.5	界限
[19]	G24-3L *	92	444.5	37.9	2.00	0.25	3 650	231	0.712	1	0	258.0	界限
[20]	ST1b	150	350	32.4	2.83	0.24	3 600	75.9	0.160	1	1	242	压碎
[20]	ST2b	150	350	32.4	2.83	0.24	3 600	75.9	0.320	1	1	270	压碎
[20]	ST3a	150	350	32.4	2.83	0.24	3 600	75.9	0.480	1	1	318	压碎
[20]	ST3b	150	350	32.4	2.83	0.24	3 600	75.9	0.480	1	1	279	压碎
[22]	Shr1-Q1	300	720	19.8	2.70	0.14	4 200	235	0.098	0.33	1	871.5	拉断
[22]	Shr1-Q2	300	720	19.8	2.70	0.14	4 200	235	0.098	0.33	1	881.2	拉断
[22]	Shr2-Q1 *	150	360	19.8	2.70	0.28	4 200	235	0.098	0.33	1	236.4	界限
[22]	Shr2-Q2 *	150	360	19.8	2.70	0.28	4 200	235	0.098	0.33	1	250.3	界限
[22]	Shr3-Q1	75	180	19.8	2.90	0.28	4 200	235	0.098	0.33	1	66.1	拉断
[22]	Shr3-Q2 *	75	180	19.8	2.90	0.28	4 200	235	0.098	0.33	1	66.6	界限

续表2

来源 文献	试件 编号	腹板宽 度/mm	梁高/mm	$f'_c$ /MPa	剪跨比	配箍 率/%	纤维抗拉 强度/MPa	$E_f$ / GPa	配纤 率/%	$\omega_f$ / $s_f$	端锚 系数	极限剪 力/kN	破坏 模式
[23]	A2	150	250	24.1	2.70	0.19	3 635	249	0.067	0.3	1	185	拉断
[23]	A3	150	250	24.1	2.70	0.19	3 635	249	0.045	0.2	1	187	拉断
[23]	A5	150	250	24.1	1.80	0.19	3 635	249	0.067	0.3	1	227	拉断
[23]	A6	150	250	24.1	1.80	0.19	3 635	249	0.134	0.6	1	217	拉断
[23]	Bb	150	250	23.7	2.47	0	260	20.5	0.847	0.5	1	136	拉断
[23]	Bc *	150	250	23.7	2.47	0	260	20.5	0.423	0.25	1	121	拉断
[23]	Be *	150	250	23.7	1.35	0	260	20.5	0.847	0.5	1	178	拉断
[23]	Bf	150	250	23.7	1.35	0	260	20.5	0.423	0.25	1	161	拉断
[23]	L2	150	250	14.1	2.92	0	112	5.3	0.800	0.5	1	104	拉断
[23]	L3	150	250	14.1	2.92	0	112	5.3	0.400	0.25	1	99	拉断
[23]	L6 *	150	250	14.1	1.80	0	112	5.3	0.800	0.5	1	162	拉断
[23]	L7 *	150	250	14.1	1.80	0	112	5.3	0.400	0.25	1	150	拉断
[24]	ED1-S1-0.5L	152	406	25.0	3.00	0.38	3 650	231	0.079	1	0	282	压碎
[24]	ED1-S1-1L	152	406	25.0	3.00	0.38	3 650	231	0.141	1	0	255	压碎
[24]	ED1-S1-2L	152	406	25.0	3.00	0.38	3 650	231	0.282	1	0	267.2	压碎
[24]	ED2-S0-1L	95	220	25.0	3.00	0	3 650	231	0.139	1	0	59.3	压碎
[24]	ED2-S0-2L	95	220	25.0	3.00	0	3 650	231	0.278	1	0	68.5	压碎
[24]	ED2-S1-1L	95	220	25.0	3.00	0.38	3 650	231	0.139	1	0	95.7	压碎
[24]	ED2-S1-2L	95	220	25.0	3.00	0.38	3 650	231	0.278	1	0	105.1	压碎
[24]	DB-S0-0.5L	152	406	25.0	1.50	0	3 650	231	0.079	1	0	268.2	压碎
[24]	DB-S0-1L *	152	406	25.0	1.50	0	3 650	231	0.141	1	0	285.5	压碎
[24]	DB-S0-2L *	152	406	25.0	1.50	0	3 650	231	0.282	1	0	289	压碎
[24]	DB-S1-1L *	152	406	25.0	1.50	0.38	3 650	231	0.141	1	0	355.5	压碎
[24]	DB-S1-2L *	152	406	25.0	1.50	0.38	3 650	231	0.282	1	0	357.7	压碎
[24]	DB-S2-1L *	152	406	25.0	1.50	0.75	3 650	231	0.141	1	0	389.7	压碎
[24]	DB-S2-2L *	152	406	25.0	1.50	0.75	3 650	231	0.282	1	0	404.8	压碎
[25]	UBF-00	150	300	37.1	2.50	0	3 970	266	0.059	0.4	1	154.7	拉断
[25]	BDF-00	150	300	42.5	2.50	0	3 970	266	0.059	0.4	1	132.1	拉断
[25]	UBF-R6	150	300	37.4	2.50	0.30	3 970	266	0.059	0.4	1	205.5	拉断
[25]	BDF-R6 *	150	300	40.0	2.50	0.30	3 970	266	0.059	0.4	1	180.9	拉断
[25]	UBF-R8 *	150	300	36.3	2.50	0.54	3 970	266	0.059	0.4	1	198.3	压碎
[25]	BDF-R8 *	150	300	35.9	2.50	0.54	3 970	266	0.059	0.4	1	213.6	拉断
[26]	C1	350	450	35.0	3.00	0.20	4 510	250	0.063	1	1	603	压碎
[26]	G1	350	450	35.0	3.00	0.20	350	17	0.286	1	1	469	压碎
[26]	G2	350	450	35.0	3.00	0.20	350	17	0.571	1	1	551	压碎
[26]	G3	350	450	35.0	3.00	0.20	350	17	0.857	1	1	581	压碎
[26]	G4	350	450	35.0	3.00	0.20	350	17	1.143	1	1	689	压碎
[26]	GS1 *	350	450	35.0	3.00	0.20	350	17	0.095	0.33	1	319	压碎
[26]	GS1a *	350	450	35.0	3.00	0.20	350	17	0.143	0.5	1	356	压碎
[26]	GS3 *	350	450	35.0	3.00	0.20	350	17	0.429	0.5	1	427	压碎
[26]	GS5 *	350	450	35.0	3.00	0.20	350	17	0.714	0.5	1	513	压碎

注:1. 支承条件包括简支梁与连续梁,截面形式主要有矩形和T形,纤维种类以碳纤维为主,包括少数玻璃纤维与芳纶纤维。

2. 试件编号中带“\*”标记试件为用于网络预测的数据,其余部分用于网络训练。

网络训练中部分参量采用与混凝土对应指标的相对比值,如  $f_{yv}/f'_c, f_{tu}/f'_c, E_s/E_c, E_f/E_c$  ( $E_c$  为混凝土弹性模量)。具体程序采用 Matlab7.0 语言编制,传递函数调用了网络工具箱中的 tansig(输入层、隐层)、logsig 函数(输出层),训练函数采用了适用于批量数据处理的 traindxd,该函数收敛性较差,但预测误差小,考虑到其可能存在收敛困难,设定训练终止次数为 5 000,同时目标误差定为 0.01,动量系数取为 0.9,学习率取 0.05。学习与训练过程见图 4,经 500 次后,网络基本趋于稳定,并收敛于目标误差,训练结束。

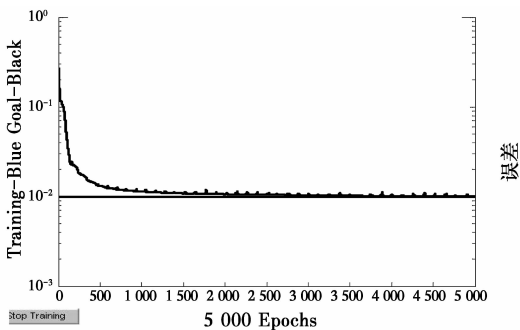


图 4 网络训练过程

Fig 4 Training process of the ANN model

### 3 破坏模式预测

破坏模式网络模型的训练完成后,利用训练好的网络,对表 2 中参训数据外的其余 31 根带锚纤维受剪加固试验梁(编号中带“\*”标识)进行预测,预测结果列于表 3,并将网络预测的破坏模式值与按试验观测的归一化模式值相减,来反映破坏模式网络模型预测的误差(图 5)。可见,仅个别点误差偏大,绝大部分试验点集中在零误差值的水平线附近,且基本落在  $\pm 0.2$  区间内。

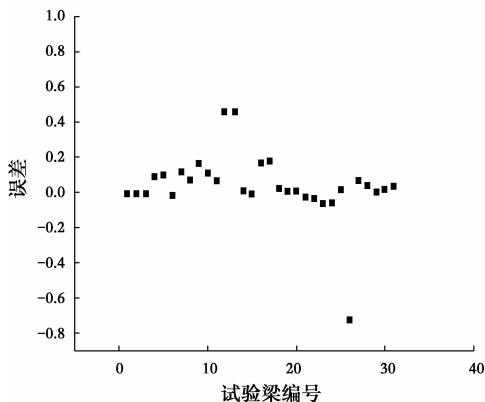


图 5 预测误差

Fig 5. Prediction error

表 3 将带锚 FRP 受剪加固梁网络模型判别结果与试验观测结果做了全面比较。总体上看,网络模型预测法的符合率较高,约为 90%,能对带锚纤维加固梁的剪切破坏模式进行较为准确的判别,说明建立的 BP 网络模型能较好地用于带锚纤维加固梁的剪切破坏模式的预测。

表 3 破坏模式网络模型预测结果

Table 3 Predicting results by neural network model on failure mode

判别方法	试件数量			总体符合率/%
	FRP 断裂破坏	界限破坏	混凝土压碎破坏	
试验观测法	6	12	13	100
网络模型法	7	10	14	90

注:表中以经试验观测认定的破坏模式作为客观破坏模式。

### 4 结语

带可靠锚固 FRP 抗剪加固梁剪切破坏模式的判别是一个受众多因素影响的复杂问题,借助于神经网络初步建立了带锚 FRP 受剪加固梁非剥离破坏模式的 BP 网络预测智能模型,并将网络模型预测结果与试验做了比较,主要结论如下:

1) 预测模型总体精度达到 90%,适用于常规带锚 FRP 受剪加固梁破坏模式的预测。

2) 因参训数据有限,信息量仍不够大,参数变化范围外的预测结果仍需试验验证,模型训练所用数据均为集中荷载作用的情形,对于分布荷载作用的情况是否适用还未可知。

3) 参训数据结构还不完全合理,部分对于理论预测较重要的参量(如开裂角度)无法准确测得,模型中未单独考虑,且碳纤维加固梁多,玻璃、芳纶纤维加固梁较少,简支梁多,连续梁相对偏少,需在今后补充。

4) 神经网络在隐层数、隐层单元数、训练所需样本容量等参数的选取方面,理论仍不完善,网络模型还有优化改进的空间。

#### 参考文献:

- [1] BAGGIO D, SOUDKI K, NOEL M. Strengthening of shear critical RC beams with various FRP systems [J]. Construction and Building Materials, 2014, 66: 634-644.
- [2] CHEN J F, TENG J G. Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding [J].

- Construction and Building Materials, 2003, 17: 27-41.
- [ 3 ] BELARBI A, BAE S W, BRANCACCIO A. Behavior of full-scale RC T-beams strengthened in shear with externally bonded FRP sheets [J]. Construction and Building Materials, 2012, 32(4):27-40.
- [ 4 ] 刘澍,李真,陈青松,等. 自锁锚固预应力碳纤维复合材料受剪加固 T 形截面梁试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(Sup2): 191-198.
- LIU S, LI Z, CHEN Q S, et al. Experimental research on shear-strengthening of T-beams with prestressed and self-anchored CFRP [ J ]. Journal of Building Structures, 2014, 35(Sup2): 191-198. (in Chinese)
- [ 5 ] 陈光明,张政,李云雷,等. 锚固装置对碳纤维布抗剪加固钢筋混凝土 T 型梁承载力的影响[J]. 工业建筑, 2015, 45(11): 181-186.
- CHEN G M, ZHANG Z, LI Y L, et al. Effect of anchoring devices on bearing capacity of RC T-section beam shear-strengthened with CFRP sheets [ J ]. Industrial Construction, 2015, 45 ( 11 ): 181-186. (in Chinese)
- [ 6 ] 陆新征,叶列平,庄江波. 外贴 FRP 抗剪加固剥离破坏设计公式综述[J]. 工业建筑, 2004(Sup):30-36.
- LU X Z, YE L P, ZHUANG J B. Review of the design models for debonding in RC Structures shearly strengthened with externally bonded FRP Plates [J]. Industrial Construction, 2004 ( Sup ): 30-36. (in Chinese)
- [ 7 ] 詹届东,李阳,张云峰,等. 基于遗传神经网络对 FRP 布加固混凝土柱承载力的预测研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2012, 9(8):147-149.
- ZHAN J D, LI Y, ZHANG Y F, et al. Prediction of capacity of RC columns strengthened with FRP using genetic neural network [ J ]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2012,9(8):147-149. (in Chinese)
- [ 8 ] 潘毅,杨成,林拥军,等. 基于 BP 神经网络的 FRP 加固混凝土柱承载力预测[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43 ( 6 ): 736-739.
- PAN Y, YANG C, LIN Y J, et al. BP neural network-based prediction of load-bearing capacity of concrete column reinforced by FRP [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43 ( 6 ): 736-739. (in Chinese)
- [ 9 ] 杨勇新. 预应力 CFRP 加固 RC 梁承载力的神经网络预测[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2007, 28(3): 304-307.
- YANG Y X. Neural network prediction of bearing capacity of RC beams strengthened with prestressed CFRP sheets [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science Edition), 2007, 28(3): 304-307. (in Chinese)
- [10] PERERA R, BARCHIN M, ARTEAGA A, et al. Prediction of the ultimate strength of reinforced concrete beams FRP-strengthened in shear using neural networks [J]. Composites: Part B, 2010, 41(4): 287-298.
- [11] TANARSLAN H M, SECER M, KUMANLIOGLU A. An approach for estimating the capacity of RC beams strengthened in shear with FRP reinforcements using artificial neural networks [J]. Construction and Building Materials, 2012, 30: 556-568.
- [12] RUMELHART D E, MCCLELAND J L. Parallel distributed processing: explorations in the microstructure of cognition [ M ]. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1988.
- [13] 戚德虎,康继昌. BP 神经网络的设计[J]. 计算机工程与设计, 1998, 19(2): 48-50.
- QI D H, KANG J C. On design of the BP neural network [J]. Computer Engineering and Design, 1998, 19(2): 48-50. (in Chinese)
- [14] CHAJES M J, JANUSZKA T F, MERTZ D R, et al. Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally applied composite fabrics [ J ]. ACI Structural Journal, 1995, 92(3): 295-303.
- [15] UJI K. Improving shear capacity of existing reinforced concrete members by applying carbon fiber sheets [J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1992,14: 253-266.
- [16] ARAKI N, MATSUZAKI Y, NAKANO K, et al. Shear capacity of retrofitted RC members with continuous fiber sheets [C]//Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Tokyo, Japan, 1997: 515-522.
- [17] KAMIHARAKO A, MARUYAMA K, TAKADA K, et al. Evaluation of shear contribution of FRP sheets attached to concrete beams [C]//Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Tokyo, Japan, 1997: 467-474.
- [18] TAERWE L, KHALIL H, MATTHYS S. Behaviour of RC beams strengthened in shear by external CFRP sheets [C]//Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Tokyo, Japan, 1997: 483-490.
- [19] CHAALLAL O, SHAHAWY M, HASSAN M.



- Performance of reinforced concrete T-girders strengthened in shear with carbon fiber-reinforced polymer fabric [J]. *ACI Structural Journal*, 2002, 99(3): 335-343.
- [20] LANNIRUBERTO U, IMBIMBO M. Role of fiber reinforced plastic sheets in shear response of reinforced concrete beams: experimental and analytical results [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2004, 8(5): 415-424.
- [21] ZHOU C Y, REN D, LIU J P, et al. RC T-beams shear-strengthened with CFRP U-straps around bars passing eye bolts penetrating flange [C] //Proceedings of the Fourth Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS 2013), Melbourne, December 2013.
- [22] 周毅雷,陈忠范. 外包环形碳纤维布加固钢筋混凝土梁的受剪承载能力试验研究[J]. *特种结构*, 2004, 21(4): 62-65.
- [23] CAO S Y, CHEN J F, TENG J G, et al. Debonding in RC beams shear strengthened with complete FRP wraps [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2005, 9(5): 417-428.
- [24] BOUSSELHAM A, CHAALLAL O. Behavior of reinforced concrete T-beams strengthened in shear with carbon fiber-reinforced polymer-An experimental study [J]. *ACI Structural Journal*, 2006, 103(3):339-347.
- [25] TENG J G, CHEN G M, CHEN J F, et al. Behavior of RC beams shear strengthened with bonded or unbonded FRP wraps [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2009, 13(5): 394-404.
- [26] LEE J Y, HWANG H B, DOH J H. Effective strain of RC beams strengthened in shear with FRP [J]. *Composites; Part B*, 2012, 43: 754-765.

(编辑 胡英奎)