

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20200804.001

基于广义回归神经网络的纤维增强聚合物 复合材料约束损伤混凝土强度预测



分享本文

曹玉贵¹, 赵国旭¹, 尹亚运^{*2}

(1. 武汉理工大学 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070)

摘 要: 纤维增强聚合物复合材料 (FRP) 约束损伤混凝土抗压强度模型对于混凝土柱类构件的修复和加固具有重要意义。现有 FRP 修复混凝土的强度模型适用条件有限, 同一模型不能同时应用于不同强弱约束、不同强度混凝土、不同倒角混凝土的强度预测。本文根据广义回归神经网络 (GRNN) 的特点, 基于 46 个 FRP 强约束损伤混凝土方柱、210 个 FRP 强约束损伤混凝土圆柱和 35 个 FRP 弱约束损伤混凝土圆柱的试验数据, 建立了 GRNN 抗压强度模型, 对 FRP 约束损伤混凝土的强度进行预测, 并与现有模型的预测结果进行对比分析, 结果表明, 新建立的 GRNN 模型能够准确地预测 FRP 约束损伤混凝土的强度。

关键词: 广义回归神经网络 (GRNN); FRP 约束损伤混凝土; 抗压强度; 强弱约束; 不同截面形状

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2021)05-1623-06

Strength prediction of fiber reinforced polymer composite confined damaged concrete using general regression neural network

CAO Yugui¹, ZHAO Guoxu¹, YIN Yayun^{*2}

(1. Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge and Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The compressive strength of damaged concrete reinforced with fiber reinforced polymer composite (FRP) has an important guiding significance in repairing of concrete columns. However, the existing model cannot capture the compressive strength of FRP hardening and softening confined damaged concrete with circular and square cross section. In order to fill this gap, an experimental database of 46 FRP hardening confined square damaged concrete, 210 FRP hardening confined circular damaged concrete and 35 FRP softening confined circular damaged concrete was established. Based on the characteristics of generalized regression neural network (GRNN) and database, the GRNN compressive strength model of FRP confined damaged concrete was developed. The GRNN model was compared with the existing model. The results show that the GRNN model can accurately predict the strength of FRP confined damaged concrete columns.

Keywords: generalized regression neural network (GRNN); FRP confined damaged concrete; compressive strength; hardening and softening confinement; different cross sections

纤维增强聚合物复合材料 (FRP), 具有轻质、高强、耐腐蚀、易施工等特点, 被广泛应用于修复和加固混凝土构件^[1-7]。由于 FRP 约束混凝土强度是进行 FRP 加固混凝土结构的基础, 国内外学者对其进行了大量研究^[8-10]。现有关于 FRP 约束混凝土抗压强度的预测方

收稿日期: 2020-05-21; 录用日期: 2020-07-19; 网络首发时间: 2020-08-04 15:42:14

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200804.001>

基金项目: 国家自然科学基金 (51808419); 湖北省自然科学基金 (2019CFB217); 湖北省重大专项研发计划 (2018AAA001); 武汉理工大学自主创新基金 (2019IVA089)

通信作者: 尹亚运, 硕士, 实验师, 研究方向为 FRP 约束混凝土结构 E-mail: yin16103@163.com

引用格式: 曹玉贵, 赵国旭, 尹亚运. 基于广义回归神经网络的纤维增强聚合物复合材料约束损伤混凝土强度预测 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(5): 1623-1628.

CAO Yugui, ZHAO Guoxu, YIN Yayun. Strength prediction of fiber reinforced polymer composite confined damaged concrete using general regression neural network[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(5): 1623-1628(in Chinese).

法主要分为两类：(1) 经验类模型，此类模型基于试验数据，对含有待定系数的函数表达式进行拟合，从而获得待定系数值，进而建立 FRP 约束混凝土抗压强度计算模型^[11-14]，也有少数研究人员通过对各种强度准则的理论推导，提出一种包含未知参数的函数表达式，基于试验数据确定未知参数的值^[15-16]；(2) 数学算法类模型，如基于神经网络、遗传算法、模糊数学等数学算法对 FRP 约束混凝土的抗压强度进行预测^[17-19]。上述研究主要针对 FRP 约束未损伤混凝土的抗压强度，对 FRP 约束损伤混凝土关注较少。但当混凝土结构需要进行 FRP 加固时，混凝土结构已产生损伤，因此有必要对 FRP 约束损伤混凝土的抗压强度进行细致研究。

广义回归神经网络 (GRNN) 是径向基神经网络的一种，具有很强的非线性映射能力、柔性网络结构及高度的容错性和鲁棒性，适用于解决非线性问题。即使训练样本数量有限，GRNN 在逼近能力和快速学习速度方面也具有出色性能^[20]，在各个领域得到广泛应用^[21]。

本文通过收集已发表文献的试验数据和课题组尚未发表的试验数据，采用 GRNN 对 FRP 强约束损伤圆形、方形混凝土柱的抗压强度及 FRP 弱约束损伤混凝土圆柱的抗压强度进行统一预测。结果表明，GRNN 能够准确地用于预测 FRP 约束损伤混凝土的强度。

1 广义回归神经网络 (GRNN) 结构

GRNN 是在径向基神经网络的基础上进行改进，即径向基神经元和线性神经元建立广义回归神经网络。GRNN 由四层组成，分别为输入层 (Input layer)、模式层 (Pattern layer)、求和层 (Summation layer) 和输出层 (Output layer)^[21]，其网络结构如图 1 所示。

本文中的输入层参数包括混凝土强度 f_{co} 、FRP 的约束力 f_l 、截面倒角半径比 $2r/b$ 、混凝土的损伤程度 δ 。

模式层内神经元个数为输入层中变量的个数，模式层的传递函数为

$$P_i = \exp\left(-\frac{(X - X_i)^T (X - X_i)}{2\sigma^2}\right) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中： X 、 X_i 分别为测试样本向量和训练样本向量； n 为输入层变量的个数； P_i 为模式层的输出值； σ 为平滑因子，是影响 GRNN 的模型准确性

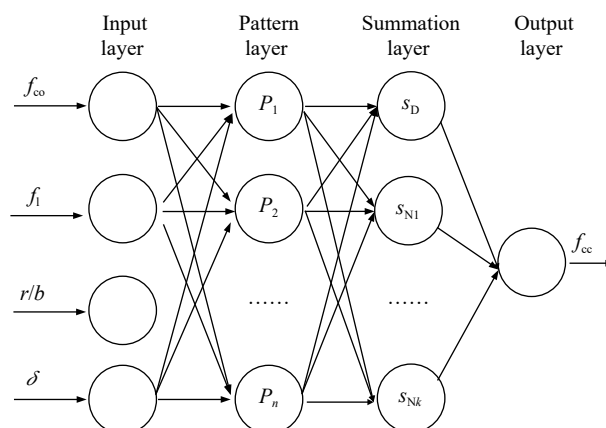


图 1 广义回归神经网络结构 (GRNN)

Fig. 1 General regression neural network structure (GRNN)

能的关键参数，平滑因子 σ 的优化值可由试算法确定^[22]。在本文中求和层内包含 2 类神经单元，第一类神经单元用于对所有模式层神经元的输出进行求和，可表示为

$$S_D = \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

第二类神经单元用于对所有模式层的神经元进行加权求和，公式表示为

$$S_{Nj} = \sum_{i=1}^n Y_{ij} P_i \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (3)$$

式中： Y_{ij} 为预期期望值； k 为学习样本中输出向量的维数。

输出层将每个神经元的加权和 S_{Nj} 除以每个求和神经元的输出 S_D ，从而输出预测值 Y_j ，即本文中每个 FRP 约束损伤混凝土试件的抗压强度值 f_{cc} 为

$$Y_j = \frac{S_{Nj}}{S_D} \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (4)$$

2 GRNN 在 FRP 约束损伤混凝土中应用

2.1 数据库

为建立 FRP 强弱约束损伤混凝土圆柱和方柱的抗压强度 GRNN 模型，共收集了 291 个试验数据，包含已有文献的 256 个 FRP 强约束损伤混凝土数据^[15,23-27]及作者课题组尚未发表的 35 个 FRP 弱约束损伤混凝土圆柱数据。其中 FRP 有三种类型，包括碳纤维增强聚合物复合材料 (CFRP)、玻璃纤维增强聚合物复合材料 (GFRP) 和玄武岩纤维增强聚合物复合材料 (BFRP)；混凝土截面类型有两种，分别为圆形和正方形；素混凝土抗压强度

f_{co} 介于 22.7~70.2 MPa; 约束力 f_l 介于 0.4~33.4 MPa, 混凝土的损伤程度 δ 介于 0%~67.8%。FRP 约束损伤混凝土数据如表 1 所示。

2.2 GRNN 网络模型的建立

GRNN 网络模型的建立步骤如下:

(1) 参数归一化处理, 将表 1 中的数据, 即输入层参数 (混凝土强度 f_{co} 、FRP 的约束力 f_l 、不同截面倒角半径比 $2r/b$ 、混凝土的损伤程度 δ) 和输出层参数 (FRP 约束损伤混凝土抗压强度 f_{cc}) 写入 Excel 表格, 并通过调用 MATLAB 中归一化函数 Mapminmax 对输入层和输出层的变量进行归一化处理, 其中 FRP 约束力 f_l 和混凝土损伤程度 δ 的计算公式如下:

$$f_l = \frac{2tE_f\varepsilon_{fe}}{D} \quad (5)$$

$$\delta = 1 - \frac{f_{cd}}{f_{co}} \quad (6)$$

式中: E_f 为 FRP 材料的弹性模量; t 为包裹损伤

混凝土柱的 FRP 厚度; D 为混凝土圆柱的直径或正方形柱的边长; ε_{fe} 为 FRP 断裂时的极限应变值; f_{co} 为未损伤混凝土抗压强度; f_{cd} 为损伤混凝土卸载后的强度, 其数值采用 Wu 等^[15] 提出的计算公式进行计算, 其函数表达式如下:

$$\frac{f_{cd}}{f_{co}} = 1 - 0.029 \frac{f_{un}}{f_{co}}, \varepsilon_{un} \leq \varepsilon_{co} \quad (7)$$

$$\frac{f_{cd}}{f_{co}} = 0.64 \left(1 + \frac{f_{co} - f_{un}}{f_{co}} \right)^2 - 2.72 \times \left(1 + \frac{f_{co} - f_{un}}{f_{co}} \right) + 3.07, \varepsilon_{un} > \varepsilon_{co} \quad (8)$$

式中: f_{un} 和 ε_{un} 分别为混凝土达到预定损伤时的应力和应变; ε_{co} 为混凝土的峰值应变;

(2) 模式层中不同样本的确定, 参照文献 [13], 将步骤 (1) 中所建立 Excel 的每一类数据的前 85% 调入 GRNN 网络中, 即采用表 1 中的 245 个数据作为训练样本, 剩余的 15% 作为测试样本, 即用表 1 中剩余的 46 个数据作为测试样本;

表 1 纤维增强聚合物复合材料 (FRP) 约束损伤混凝土数据

Table 1 Database of fiber reinforced polymer composite (FRP) confined damaged concrete

Reference	Number of specimen	FRP type	Crosssection	Confinement state	$2r/b$	f_l /MPa	δ /%	f_{co} /MPa	f_{cc} /MPa
Wu ^[15]	102	CFRP	Circle	Hard	1	3.74~21.7	0~58	29.3~53.6	12.8~121.1
Li ^[23]	46	CFRP	Square	Hard	0.2~0.6	3.7~14.1	0~35	43.8	39.0~49.2
Guo ^[24]	60	CFRP	Circle	Hard	1	5.6~25.8	0~32.7	34.2~70.2	57.6~146.4
Cao ^[25]	12	CFRP	Circle	Hard	1	10.1~20.3	0.68~29.5	25.0~29.0	54.0~78.0
Ma ^[26]	12	BFRP	Circle	Hard	1	3.0~15.0	0~26.9	38.0	45.7~172.3
Cui ^[27]	6	GFRP	Circle	Hard	1	5.3~33.4	2.28	46.0~48.0	56.3~157
Own data	35	CFRP	Circle	Soft	1	0.4~2.9	0~67.8	22.7~56.8	10.8~56.9

Notes: $2r/b$ —Ratio of corner radius ratio; f_l —Confinement pressure; δ —Degree of damage; f_{co} —Compressive strength of plain concrete; f_{cc} —Compressive strength of FRP confined damaged concrete; CFRP—Carbon fiber reinforced polymer composite; GFRP—Glass fiber reinforced polymer composite; BFRP—Basalt fiber reinforced polymer composite.

(3) 模式层中最佳平滑因子的确定, 通过试算法寻找模式层中平滑因子 σ 的最优值, 以误差指标 R_{RMSE} 值作为评价标准, 计算如下:

$$R_{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2 / n} \quad (9)$$

$$e_i = f_{ei} - f_{pi} \quad (10)$$

式中: n 为试验样本的数量; f_{ei} 为 FRP 加固损伤混凝土强度试验值; f_{pi} 为 FRP 加固损伤混凝土抗压强度的 GRNN 模型预测值。不断调整平滑因子 σ 值, 寻找 GRNN 模型预测值 f_{pi} 与试验值 f_{ei} 的最小均方差对应的平滑因子 σ 。经过多次试算确定

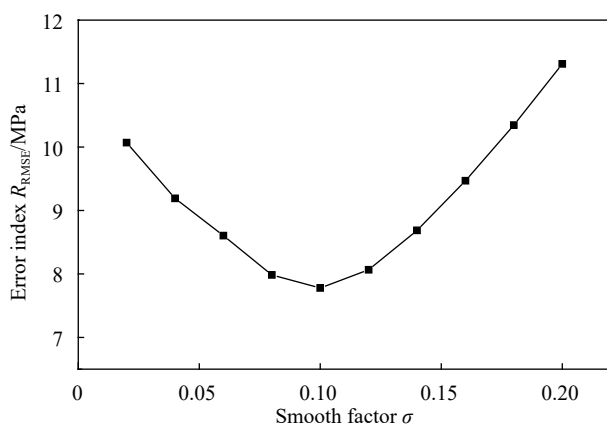
试算范围为 [0.02, 0.2], 在此区间上间隔 0.02 取值分别训练 GRNN 网络;

图 2 为平滑因子 σ 与模型预测误差指标 R_{RMSE} 的变化关系。可以看出, 当平滑因子 $\sigma=0.1$ 时, R_{RMSE} 有最小值, 为 7.78 MPa, 此时模型能取得较好的预测结果。

(4) GRNN 模型建立, 导入步骤 (2) 中的训练样本和步骤 (3) 中的平滑因子最优值 $\sigma=0.1$, 从而建立预测 FRP 约束损伤混凝土的 GRNN 模型。

2.3 GRNN 抗压强度模型应用

将 2.2 节步骤 (2) 测试样本中的输入层参数 (混凝土强度 f_{co} 、FRP 的约束力 f_l 、不同截面倒角

图2 平滑因子 σ 与 GRNN 模型预测误差指标 R_{RMSE} 的关系Fig. 2 Relationship between smooth factor σ value and GRNN model prediction error index R_{RMSE}

半径比 $2r/b$ 、混凝土的损伤程度 δ) 和平滑因子最优值 $\sigma=0.1$ 导入 2.2 节建立的 GRNN 网络模型, 即可计算出 FRP 约束损伤混凝土的抗压强度。

GRNN 模型的预测结果如图 3 所示。其中, A 和 E 为误差评估指标^[11,19], 计算如下:

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{f_{cc.Theo.i}}{f_{cc.Expe.i}} \quad (11)$$

$$E = \frac{1}{\sum_{i=1}^n f_{cc.Expe.i}} \sum_{i=1}^n |f_{cc.Theo.i} - f_{cc.Expe.i}| \quad (12)$$

式中: $f_{cc.Theo.i}$ 为第 i 个试件的抗压强度 GRNN 模型预测值; $f_{cc.Expe.i}$ 为第 i 个试件的抗压强度试验值; n 为试验数据个数。当 A 值越接近 1, E 越接近 0, 表明模型计算值越接近试验结果, 模型预测结果更加准确。

从图 3 可以看出, GRNN 模型预测结果与试

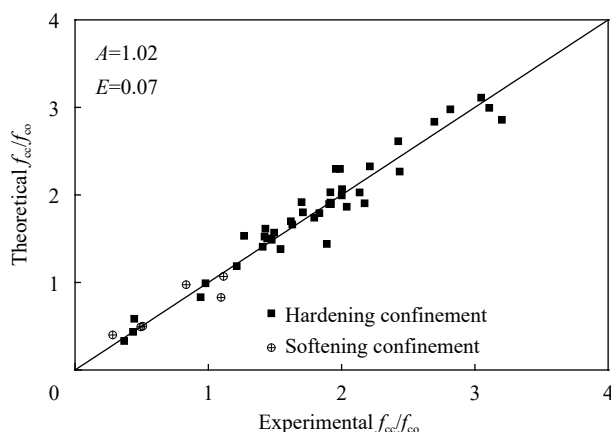


图3 GRNN 模型预测结果

Fig. 3 GRNN model prediction results

验值比较接近, 误差评估指标的 A 和 E 值分别为 1.02 和 0.07。因此, GRNN 模型可以用来预测 FRP 强弱约束损伤混凝土圆柱和方柱的抗压强度。

3 与现有抗压强度模型对比

现有抗压强度模型主要适用于 FRP 约束未损伤混凝土, 如早期经典的 Lam 和 Teng 模型^[28-29]及 Ozbakkaloglu 等^[30]基于 3 000 多个试验数据提出的抗压强度模型等。FRP 约束损伤混凝土的抗压强度模型较少, 且大多数只适用于一种混凝土截面^[13,19], 只有 Li 等^[23]的模型能够同时计算 FRP 约束损伤混凝土圆柱和方柱的抗压强度, 相关抗压强度模型的函数表达式如下:

(1) 典型的 FRP 约束未损伤混凝土模型, Lam

等和 Ozbakkaloglu 等^[29-30]建立了 FRP 约束混凝土圆形截面和矩形截面混凝土的抗压强度模型, 如下:

$$\text{圆形截面: } \frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 2.2 \frac{f_1}{f_{co}} \quad (13)$$

$$\text{矩形截面: } \frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 3.3k_s \frac{f_1}{f_{co}} \quad (14)$$

式中, k_s 为形状系数;

(2) 现有的 FRP 约束损伤混凝土模型, Li 等^[23]通过扩展 FRP 约束损伤混凝土圆柱的抗压强度模型^[15], 提出 FRP 约束损伤混凝土圆柱和方柱的抗压强度模型, 如下:

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 3.9 \left(\frac{f_1}{f_{co}} \right)^{1.13} \left(\frac{2r}{b} \right)^{0.67} - \delta \quad (15)$$

当 $2r/b=1$ 时, 式 (15) 可以用于计算 FRP 约束损伤混凝土圆柱; 当 $2r/b \neq 1$ 时, 式 (15) 可以用于计算 FRP 约束损伤混凝土方柱。

张扬等^[19]在基于 Griffith 破坏理论的基础上, 建立了 FRP 约束损伤混凝土圆柱的抗压强度模型, 如下:

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 4 \sqrt{\frac{2.02 f_{co}^{0.29} f_1}{f_{co}^2} + \left(\frac{2.02 f_{co}^{0.29}}{f_{co}} \right)^2} + \frac{8.08 f_{co}^{0.29}}{f_{co}} + \frac{f_1}{f_{co}} - 0.01 \delta^{0.80} \quad (16)$$

Ma 等^[13]收集了文献^[15]中 102 个数据, 建立了反向传播 (BP) 神经网络模型用于预测 FRP 约束损伤混凝土圆柱的抗压强度。在基于已训练的神经网络中得出输入层与输出层之间的数学关系为

$$y = \sum_{i=1}^3 k_i x_i + c \quad (17)$$

式中: x_i 为输入向量, 分别表示 $x_i = [f_{cc} f_1 \delta]^T$; k 为通过 BP 神经网络得出的系数, $k = [0.5966 \ 2.6165 \ -0.3803]$; c 为常数, $c = 13.974$ 。

由于张扬等模型^[19]和 Ma 等模型^[13]仅适用于预测 FRP 约束损伤圆形混凝土的抗压强度, 而 GRNN 模型可以同时预测 FRP 约束损伤混凝土圆柱和方柱的抗压强度。为对比分析新提出的 GRNN 抗压强度模型的准确性, 因此只对能够同时预测 FRP 约束损伤混凝土圆柱和方柱抗压强度模型进行评估。

图 4 为采用表 1 中 46 个试验数据 (即 2.2 节中的测试样本) 对现有模型的评估结果。可知, Li 等模型的误差评估指标值 A 和 E 分别为 0.93 和 0.22; Lam 和 Teng 模型的误差评估指标值 A 和 E 分别为 0.97 和 0.36。表明 Li 等模型的准确性高于 Lam 和 Teng 模型, 其原因是 Lam 和 Teng 模型是基于 FRP 约束未损伤混凝土的试验数据提出的, 不适用于 FRP 约束损伤混凝土抗压强度的预测。

对比图 3 和图 4 可知, GRNN 模型的准确性高于 Li 等模型, 其原因可能是由于 Li 等模型尚未

考虑 FRP 弱约束损伤混凝土, 且没有考虑不同 FRP 的种类。进一步表明, GRNN 模型不仅能够同时考虑 FRP 的种类、FRP 约束状态、混凝土的截面形状和混凝土的损伤程度, 且可以准确预测 FRP 约束损伤混凝土的抗压强度。

4 结论

(1) 混凝土的损伤程度 δ 对纤维增强聚合物复合材料 (FRP) 强约束混凝土的抗压强度有显著影响, FRP 约束未损伤混凝土的抗压强度不能准确预测 FRP 约束损伤混凝土的抗压强度。

(2) 本文证明广义回归神经网络 (GRNN) 可以用于 FRP 约束损伤混凝土的抗压强度预测。新提出的 GRNN 抗压强度模型通过考虑 FRP 的种类、FRP 约束状态、混凝土的截面形状和混凝土的损伤程度等因素的影响可以准确预测 FRP 约束损伤混凝土的抗压强度。

参考文献:

- [1] WU Y, ZHOU Y. Unified strength model based on Hoek-Brown failure criterion for circular and square concrete columns confined by FRP[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2010, 14(2): 175-184.
- [2] PELED A. Confinement of damaged and nondamaged structural concrete with FRP and TRC sleeves[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2007, 11(5): 514-522.
- [3] THERMOU G E, PANTAZOPOULOU S J. Fiber-reinforced polymer retrofitting of predamaged substandard RC prismatic members[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2009, 13(6): 535-546.
- [4] 欧阳利军, 许峰, 陆洲导. 玄武岩纤维布增强树脂基复合材料约束高温损伤混凝土轴压力学性能[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(8): 2002-2013.
OUYANG L J, XU F, LU Z D. Axial compressive behavior of basalt fiber reinforced polymer confined damaged concrete after exposed to elevated temperatures[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2018, 35(8): 2002-2013(in Chinese).
- [5] 焦楚杰, 李松, 崔力仕, 等. CFRP 约束钢管-活性粉末混凝土短柱轴压性能[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(2): 439-448.
JIAO C J, LI S, CUI L S, et al. Axial compression behaviour of CFRP confined reactive power concrete filled steel tube stub columns[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2021, 38(2): 439-448(in Chinese).
- [6] 李趁趁, 于爱民, 高丹盈, 等. 侵蚀环境下 FRP 条带加固锈蚀钢筋混凝土圆柱轴心受压试验[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(8): 2015-2028.
LI C C, YU A M, GAO D Y, et al. Experimental study on axial compression of corroded reinforced concrete columns strengthened with FRP strips under erosion environ-

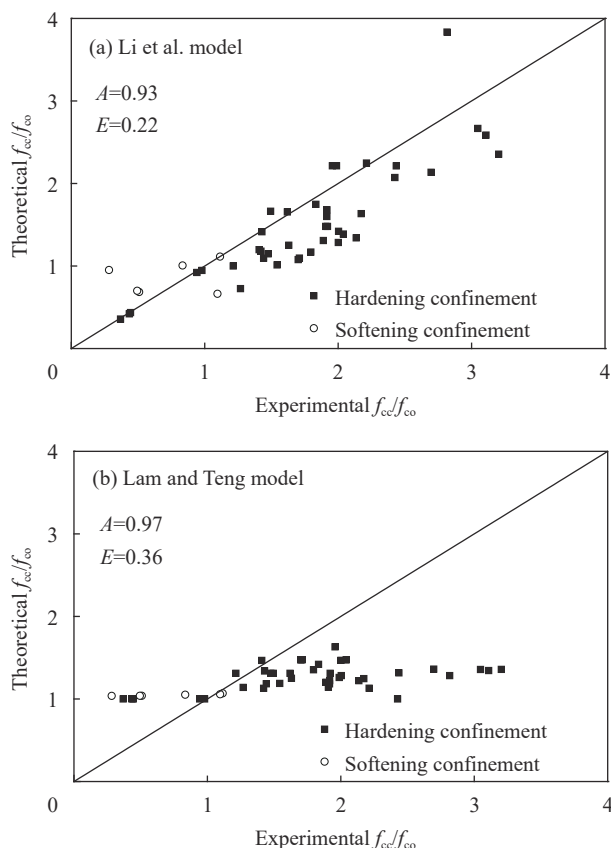


图 4 现有抗压强度模型预测结果

Fig. 4 Prediction results of existing compressive strength models

- ment[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(8): 2015-2028(in Chinese).
- [7] 高鹏, 赵元鸿, 洪丽, 等. 圆角半径对碳纤维增强聚合物复合材料布约束型钢筋混凝土矩形短柱轴压性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(4): 775-785.
- GAO P, ZHAO Y H, HONG L, et al. Effect of corner radius on axial compressive performance of steel reinforced concrete rectangular short columns confined by carbon fiber reinforced polymer composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(4): 775-785(in Chinese).
- [8] MA G, LI H, DUAN Z. Repair effects and acoustic emission technique-based fracture evaluation for predamaged concrete columns confined with fiber-reinforced polymers[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2012, 16(6): 626-639.
- [9] LI Y, LIN Y, CHEN C, et al. Theoretical and experimental studies on repaired and rehabilitated reinforced concrete frames[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2007, 34(8): 923-933.
- [10] LENWARI A, RUNGAMORN R, WOONPRASERT S. Axial compression behavior of fire-damaged concrete cylinders confined with CFRP sheets[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2016, 20(5): 04016027.
- [11] CAO Y, LI X, HU J. Compressive strength estimation for the fiber-reinforced polymer (FRP)-confined concrete columns with different shapes using artificial neural networks[J]. *Journal of Donghua University (English Edition)*, 2015, 32(3): 395-400.
- [12] SAADATMANESH H, EHSANI M R, JIN L. Repair of earthquake-damaged RC columns with FRP wraps[J]. *ACI Structural Journal*, 1997, 94(2): 206-214.
- [13] MA C K, LEE Y H, AWANG A Z, et al. Artificial neural network models for FRP-repaired concrete subjected to pre-damaged effects[J]. *Neural Computing and Applications*, 2019, 31(3): 711-717.
- [14] 尤杰, 车轶, 仲伟秋. 基于BP神经网络的既有建筑混凝土强度预测[J]. *建筑科学与工程学报*, 2011, 28(1): 70-75.
- YOU J, CHE Y, ZHONG W Q. Prediction of concrete strength of existing buildings based on BP neural networks[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2011, 28(1): 70-75(in Chinese).
- [15] WU Y, YUN Y, WEI Y, et al. Effect of predamage on the stress-strain relationship of confined concrete under monotonic loading[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 140(12): 4014093.
- [16] ÖZTAŞ A, PALA M, ÖZBAY E, et al. Predicting the compressive strength and slump of high strength concrete using neural network[J]. *Construction and Building Materials*, 2006, 20(9): 769-775.
- [17] LI P, WU Y, GRAVINA R. Cyclic response of FRP-confined concrete with post-peak strain softening behavior[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 123: 814-828.
- [18] WANG L, WU Y. Effect of corner radius on the performance of CFRP confined square concrete columns: Test[J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(2): 493-505.
- [19] 张扬, 曹玉贵, 胡志礼. 基于Griffith破坏准则的FRP约束未损伤混凝土和损伤混凝土的抗压强度统一模型[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(9): 2358-2366.
- ZHANG Y, CAO Y G, HU Z L. Unified strength model based on Griffith failure criterion for FRP-confined undamaged and damaged concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(9): 2358-2366(in Chinese).
- [20] REN S, YANG D, JI F, et al. Application of generalized regression neural network in prediction of cement properties[C]//2010 International Conference On Computer Design and Applications. Qinhuaingdao: IEEE, 2010.
- [21] 何正风. MATLAB R2015b神经网络技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- HE Z F. MATLAB R2015b neural network technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016(in Chinese).
- [22] 陈涛, 郭卫卫, 孟令智, 等. 基于广义回归神经网络的路面摩擦系数预测模型[J]. *公路*, 2014, 59(6): 1-6.
- CHEN T, GUO W W, MENG L Z, et al. Prediction model of road friction coefficient based on GRNN network[J]. *High Way*, 2014, 59(6): 1-6(in Chinese).
- [23] LI P, SUI L, XING F, et al. Stress-strain relation of FRP-confined predamaged concrete prisms with square sections of different corner radii subjected to monotonic axial compression[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2019, 23(2): 04019001.
- [24] GUO Y, XIE J, XIE Z, et al. Experimental study on compressive behavior of damaged normal and high strength concrete confined with CFRP laminates[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 107: 411-425.
- [25] CAO Y G, LIU M, ZHANG Y, et al. Effect of strain rates on the stress-strain behavior of FRP-confined pre-damaged concrete[J]. *Materials*, 2020, 13(5): 1078.
- [26] MA G, LI H, YAN L, et al. Testing and analysis of basalt FRP-confined damaged concrete cylinders under axial compression loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 169: 762-774.
- [27] CUI C. Behaviour of normal and high strength concrete confined with fibre reinforced polymers (FRP)[D]. Toronto: University of Toronto, 2009.
- [28] LAM L, TENG J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2003, 22(13): 1149-1186.
- [29] LAM L, TENG J G. Strength models for fiber-reinforced plastic-confined concrete[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(5): 612-623.
- [30] OZBAKKALOGLU T, LIM J C. Axial compressive behavior of FRP-confined concrete: Experimental test database and a new design-oriented model[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 55: 607-634.