



基于 BP 神经网络的 FRP 筋混凝土板 抗冲切承载力预测模型

沈袁协, 梁诗雪

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

摘要: 为了改善现有 FRP 筋混凝土板抗冲切承载力预测模型因影响因素考虑不全而导致泛化性能较差的问题, 建立了以数据驱动为核心的 FRP 筋混凝土板抗冲切承载力预测模型。首先收集了 121 组 FRP 筋混凝土板柱节点抗冲切承载力数据, 采用 BP 神经网络建立了 FRP 筋混凝土板抗冲切承载力预测模型; 然后采用 Garson 算法对影响 FRP 筋混凝土板抗冲切承载力的因素进行敏感性分析。将该模型与其他传统承载力计算公式的预测结果进行对比, 结果表明该模型的预测结果最好, 误差更小。与英国规范相比, 均方根误差降低了 29.7%, 平均绝对百分比误差降低了 21.5%, 判定系数提升了 3.6%。敏感性分析的结果验证了输入参数选取的合理性并得出了各参数的影响性排序, 发现板的有效高度对冲切承载力的影响最为显著。该研究可为 FRP 筋板柱节点抗冲切性能的分析模型和精细化设计提供帮助。

关键词: BP 神经网络; FRP 筋混凝土板; 机器学习; 抗冲切承载力; Garson 算法

中图分类号: TU377.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2022) 05-0441-11

The punching shear capacity prediction model for FRP reinforced concrete slabs based on BP neural network

SHEN Yuanxie, LIANG Shixue

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang
Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to improve the poor generalization performance of punching shear capacity prediction model for FRP reinforced concrete slabs due to inadequate consideration of the influencing factors, a data drive-based model for predicting the punching shear capacity of FRP reinforced concrete slabs was established. Firstly, 121 groups of punching shear capacity data on FRP reinforced concrete slab-column joints were collected, and a punching shear capacity prediction model for FRP reinforced concrete slabs based on BP neural network was established. Secondly, the sensitivity analysis was performed on factors affecting the punching shear capacity of FRP reinforced concrete slabs using Garson algorithm. Through comparison with the prediction results of other traditional bearing capacity computing formulas, it was found that the model proposed in this paper had the optimal prediction results, with less errors. Compared with the British specification, the root-mean-square error reduced by 29.7%, mean absolute percentage error decreased by 21.5%, and coefficient of determination improved by 3.6%. The sensitivity analysis results have verified the rational selection of the input parameters and obtained the sort of the

收稿日期: 2021-11-12 网络出版日期: 2022-01-06

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LY22E080016, LGF20E080019)

作者简介: 沈袁协 (1998—), 男, 宁波人, 硕士研究生, 主要从事混凝土结构方面的研究。

通信作者: 梁诗雪, E-mail: liangshixue0716@126.com

influence degree of each parameter. This study has found that the effective height of the concrete slab has the most significant impact on the punching shear capacity of FRP reinforced concrete slabs. The study is expected to support the analysis model and fine design of the punching shear performance of FRP reinforced concrete slab-column joints.

Key words: BP neural network; FRP reinforced concrete slab; machine learning; punching shear capacity; Garson algorithm

0 引言

钢筋混凝土板作为桥梁、港口、水工结构中应用最为广泛的水平受力构件,其耐腐蚀能力直接影响结构的适用性和耐久性。相较于钢筋,纤维增强复合材料(Fiber reinforced polymer, FRP)具有强度高、质量轻、耐腐蚀等优点,可以代替钢筋,为混凝土结构的耐久性设计提供新的途径^[1]。因此,将具有优越抗腐蚀性能的 FRP 筋代替钢筋应用于混凝土板中,具有重要的工程应用价值。

混凝土板在竖向荷载的作用下,易发生冲切破坏,进而引发结构安全问题。在试验研究方面,针对钢筋混凝土板的抗冲切性能,已有大量研究成果^[2]。目前关于 FRP 筋混凝土板抗冲切性能研究的试验结果可以归纳为:a)在相同配筋率下,FRP 筋混凝土板的抗冲切承载力比钢筋混凝土板小^[3-6];b)在相同荷载作用下,FRP 筋混凝土板的刚度较小,裂缝宽度比钢筋混凝土板大^[5-6];c)板内 FRP 筋与混凝土的粘结性能与钢筋不同^[5, 7-8];d)FRP 筋混凝土板的抗冲切性能随着混凝土强度的提高而提高^[5];e)柱截面类型、柱截面面积、板有效高度、混凝土抗压强度、FRP 筋的杨氏模量和配筋率^[5, 9-14],对板的抗冲切承载力影响较为显著。但目前对各因素影响性大小的量化研究还较少。

有关 FRP 筋混凝土板的抗冲切承载力计算模型研究,大多借鉴钢筋混凝土板的计算理论。在中国规范《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010, 2015 年版)和美国规范 ACI 318-14 中,钢筋混凝土板的抗冲切承载力公式皆以偏心剪应力模型为理论基础,并结合试验数据和工程经验,确定其参数的选取。El-Ghandour 等^[15-16]修正了美国规范中钢筋混凝土冲切承载力计算公式,给出了 FRP 筋混凝土板冲切承载力公式。Ospina 等^[3]根据偏心剪应力模型,修正了 FRP 筋混凝土板的刚度,给出了其抗冲切承载力公式。Ju 等^[17]基于超越概率,采用蒙特卡洛模拟给出了改进的 FRP 筋混凝土板抗冲切承载力公式。然而,由于冲切破坏具有典型的空

素众多,传统的抗冲切分析方法大多基于力学推导,公式中的系数大多为经验系数,考虑的影响因素也较为片面,很难全面反映众多因素的影响,且引入了大量的假定和简化,导致模型的泛化性能较差。

近年来,机器学习算法的发展为解决结构问题提供了可靠的新途径。机器学习方法基于积累的大量试验数据,可以挖掘试验数据之间的映射关系,建立合理、稳定的预测模型。本文收集国内外 FRP 筋混凝土板冲切试验的结果,建立试验数据库;采用 BP 神经网络,建立 FRP 筋混凝土板的冲切承载力预测模型;将本文提出的冲切承载力预测模型与其他 6 种传统算法的预测精度进行对比,验证了预测模型的正确性和合理性。在此基础上,采用 Garson 算法^[18],对影响 FRP 筋混凝土板抗冲切承载力的因素进行敏感性分析,得出各因素的影响性排序,为 FRP 筋板柱节点抗冲切性能的分析模型和精细化设计提供帮助。

1 BP 神经网络模型

BP(Back propagation)神经网络是一类应用较为成熟的人工神经网络(Artificial neural network, ANN)模型^[19],在结构工程中多用于进行回归预测和分类预测。BP 神经网络由 1 个输入层、1~2 个隐含层和 1 个输出层组成,通过大量数据对其进行训练,在经过不断地调参后可得到一个误差较小的预测模型^[20],1 个 2-2-1 的 BP 神经网络基本结构如图 1 所示。

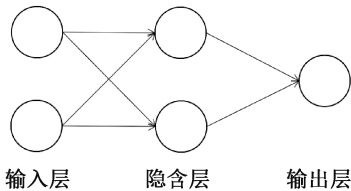


图 1 2-2-1 的 BP 神经网络结构示意图

由于 BP 神经网络具有隐含层,它能够将输入层和输出层之间的映射关系通过各层神经元之间的权值进行描述,从而表现出很强的非线性映射能力。板柱节点承受剪力、扭矩和不平衡弯矩,在试验过程中存在不确定的自然环境以及人为因素的影响,因

此节点上的受力性能呈现高度的非线性和严重的不确定性, BP 神经网络表现出了传统计算模型无法比拟的优越性^[21-23]。

1.1 板冲切承载力数据集

本文收集了国内外 121 组 FRP 筋混凝土板抗冲切承载力的数据^[3, 5, 24-46]作为数据集(见附录 A),并用留出法按照 8:2 的比例随机将其中 97 组数据作为训练集,剩下的 24 组数据作为测试集。输入层神经元个数为 6 个:柱截面类型 x_1 、柱截面面积 x_2 、板有效高度 x_3 、混凝土抗压强度 x_4 、FRP 筋的杨氏模量 x_5 和配筋率 x_6 。输出层神经元个数只有 1 个,即节点的抗冲切承载力 y 。

由表 A1 可知,输入层各个参数的取值范围有较大差别,因此需要采用离差标准化对其进行特征缩放,使输入层节点的取值介于[0, 1]之间。离差标准化可用式(1)表示:

$$x_i^* = \frac{x_i - \min_{1 \leq j \leq m} \{x_j\}}{\max_{1 \leq j \leq m} \{x_j\} - \min_{1 \leq j \leq m} \{x_j\}} \quad (1)$$

其中: x 为特征缩放前的输入参数; x^* 为特征缩放后的输入参数; m 为总样本数。

1.2 模型函数选取

BP 神经网络的神经元需要激活函数对其输入值进行激活,从而得到该神经元的输出值。一般激活函数都选用 S 型函数^[47]:

$$g(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (2)$$

$$z = \theta_0 + \sum_{i=1}^n \theta_i x_i^* \quad (3)$$

其中: θ 为特征参数; n 为总特征数。

由于一般的神经网络公式只适用于分类预测,而本文是进行回归预测,因此需要在原有的算法上进行修改:

- a)输出层的神经元不需要进行激活;
- b)代价函数 J 从原来的式(4)改为式(5):

$$\begin{aligned} J(\theta) = & -\frac{1}{m} \left[\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^K y_k^{(i)} \ln(y_{\text{pred}}^{(i)})_k + (1 - y_k^{(i)}) \right. \\ & \left. \ln(1 - y_{\text{pred}}^{(i)})_k \right] + \frac{\lambda}{2m} \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^{S_l} \sum_{i=1}^{S_{l+1}} (\Theta_{ij}^{(l)})^2 \quad (4) \\ J(\theta) = & \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_{\text{pred}}^{(i)} - y^{(i)})^2 + \\ & \frac{\lambda}{2m} \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^{S_l} \sum_{i=1}^{S_{l+1}} (\Theta_{ij}^{(l)})^2 \quad (5) \end{aligned}$$

其中: y_{pred} 为冲切承载力的预测值; Θ 为特征矩阵; K 为输出层神经元个数; λ 为正则化系数; L 为特征

矩阵数; S_l 为特征矩阵连接的上一层神经元个数; S_{l+1} 为特征矩阵连接的下一层神经元个数。

通过对代价函数式(5)采用梯度下降法降低代价函数值,从而降低该神经网络模型在训练集上的误差,进而提高该模型在训练集上的预测精度。梯度下降法可用式(6)表示:

$$\begin{cases} \theta_0 := \theta_0 - \alpha \frac{\partial}{\partial \theta_0} J(\theta); \\ \theta_j := \theta_j - \alpha \left[\frac{\partial}{\partial \theta_j} J(\theta) + \frac{\lambda}{m} \theta_j \right], j \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中: α 为学习率。

采用训练集对该 BP 神经网络模型进行多次训练,降低该模型在训练集上的代价函数值,从而提高模型在训练集上的预测精度。对该模型使用测试集进行预测精度测试,若在测试集上的预测误差也较小,则表示该模型的泛化能力良好,可予以输出;反之则需要进行调整,直到该模型在测试集上的预测表现良好为止。

1.3 超参数取值

隐含层节点数作为 BP 神经网络的一个超参数,其取值往往较难确定,本文采用文献[48]的方法对其取值范围进行缩小,从而便于确定隐含层的神经元个数:

$$\sum_{i=0}^X C_H^i > m \quad (7)$$

$$H = \sqrt{X + O} + a \quad (8)$$

$$H = \log_2 X \quad (9)$$

其中: X 为输入层神经元个数; H 为隐含层神经元个数; O 为输出层神经元个数; a 为[1,10]之间的常数。

本文中训练集样本数 m 为 97,输入层神经元个数 X 为 6,输出层神经元个数 O 为 1,根据公式(7)–(9)最终确定隐含层神经元个数的取值范围为 $7 \leq H \leq 13$ 。为了验证模型的预测结果,本文引入三类误差,分别为均方根误差 $RMSE$ 、平均绝对百分比误差 $MAPE$ 、判定系数 R^2 :

$$\begin{aligned} RMSE = & \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_{\text{pred}}^{(i)} - y^{(i)})^2}, \\ MAPE = & \frac{100\%}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{y_{\text{pred}}^{(i)} - y^{(i)}}{y^{(i)}} \right|, \\ SSE = & \sum_{i=1}^m (y_{\text{pred}}^{(i)} - y^{(i)})^2, \\ SST = & \sum_{i=1}^m \left(y^{(i)} - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y^{(i)} \right)^2, \\ R^2 = & 1 - \frac{SSE}{SST}. \end{aligned}$$

对不同的隐含层神经元个数进行对比分析,计算结果如表 1 所示,最终选定隐含层节点数为 10 个。

表 1 不同隐含层节点数的 BP 神经网络模型在测试集上的性能及排序

节点数	测试集			排序		
	RMSE	MAPE	R^2	RMSE	MAPE	R^2
7	100.401	37.659	0.884	3	2	3
8	93.094	40.548	0.901	1	7	1
9	104.146	40.417	0.876	4	6	4
10	95.033	37.620	0.897	2	1	2
11	111.774	40.352	0.857	5	5	5
12	119.228	39.928	0.837	6	4	6
13	122.708	39.209	0.827	7	3	7

表 2 训练次数及代价函数值

训练次数/次	0	50	100	200	400	...	5000
代价函数值	232074.223	43245.208	32374.257	25274.012	21813.205	...	19313.458

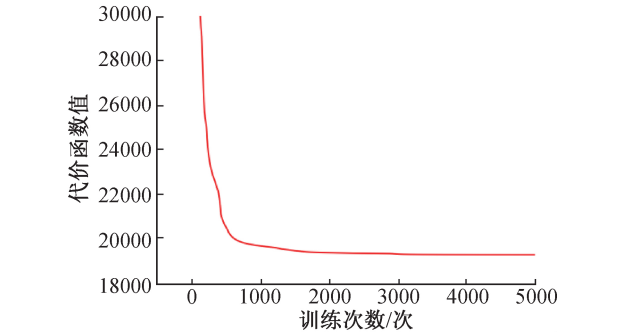


图 2 训练次数及误差关系曲线

将测试集代入该 6-10-1 的 BP 神经网络模型进行测试,其预测精度和训练集的最终预测精度如表 3 所示。训练集和测试集的真实值与预测值之间的关系分别如图 3 和图 4 所示。由图 3 可知,在承载力小于 1400 kN 时,预测精度很高。该 ANN 模型在冲切承载力大于 1400 kN 时的预测精度偏低,这是由于在数据集中缺乏这类冲切承载力较大的数据而导致的^[49],因此目前该 6-10-1 的 BP 神经网络模型建议应用于冲切承载力不大于 1400 kN 的 FRP 筋混凝土板柱节点上。

表 3 训练集和测试集的预测精度

数据集	RMSE	MAPE	R^2
训练集	92.428	21.657	0.899
测试集	50.216	13.672	0.966

将本模型在测试集上的预测精度同表 4 中其他 6 个常用算法的预测精度进行对比,其中包括 3 类规范中的算法,即《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010,2015 年版)、美国规范 ACI 318-11、英国规范 BS 8110: 1997,以及 3 类 FRP 筋混凝土板的理论计算公式^[3,15-16],结果如图 5 和表 5 所示。由

除了隐含层节点数外,其他超参数的取值均通过手动调参的方式予以优化。最终得到的超参数及取值分别为:a)隐含层层数:1 层;b)隐含层神经元数:10 个;c)训练次数:5000 次;d)学习率 α : 5×10^{-5} ;e)正则化系数 λ :20。

1.4 模型预测结果

对训练集进行 5000 次训练后的情况如表 2 和图 2 所示,训练误差从最初随机初始化时的 232074.223 下降到了最终的 19313.458。训练初期,误差快速下降,在训练次数达到约 600 次后该 BP 神经网络模型在训练集上的训练误差下降平缓并逐渐收敛。

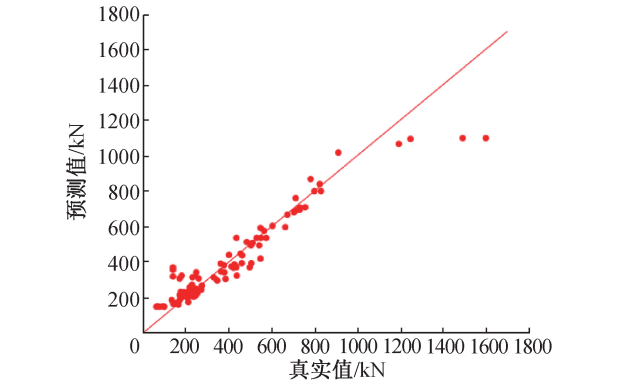


图 3 训练集真实值和预测值关系曲线

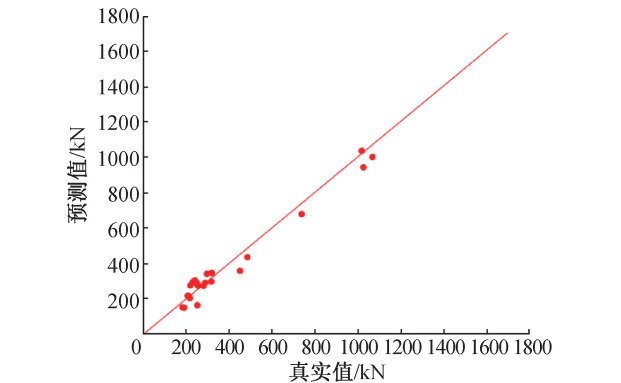


图 4 测试集真实值和预测值关系曲线

图 5 和表 5 可知:本文提出的 BP 神经网络预测模型的预测值与试验值吻合程度最好, RMSE、MAPE、 R^2 误差值都明显低于其他模型;采用英国规范的算法,模型结果的理论值和试验值吻合较好,采用中国规范和美国规范的算法,精度相对较低;采用 3 类 FRP 筋混凝土板的理论计算公式,其中 Ospina 的模型预测结果较好,但与本文提出的模型仍有一定差距。

表 4 国内外无抗冲切钢筋的受冲切承载力计算公式

公式编号	来源	计算公式
公式 1	GB 50010-2010(2015 年版)	$V_1 = 0.7\beta_h f_t \eta u_m h_0; \eta = \min \begin{cases} \eta_1 = 0.4 + \frac{1.2}{\beta_s} \\ \eta_2 = 0.5 + \frac{\alpha_s h_0}{4u_m} \end{cases}$
公式 2	ACI 318-11	$V_2 = 0.33 \sqrt{f'_c} b_{0,0.5d} d$
公式 3	BS 8110: 1997	$V_3 = 0.79 (100\rho_s)^{1/3} \left(\frac{400}{d}\right)^{1/4} \left(\frac{f_{cu}}{25}\right)^{1/3} b_{0,1.5d} d$
公式 4	El-Ghandour 等 ^[15]	$V_4 = 0.33 \sqrt{f'_c} \left(\frac{E_f}{E_s}\right)^{1/3} b_{0,0.5d} d$
公式 5	El-Ghandour 等 ^[16]	$V_5 = 0.79 \left(100\rho_s 1.8\left(\frac{E_f}{E_s}\right)\right)^{1/3} \left(\frac{400}{d}\right)^{1/4} \left(\frac{f_{cu}}{25}\right)^{1/3} b_{0,1.5d} d$
公式 6	Ospina 等 ^[3]	$V_6 = 2.77 (\rho_s f'_c)^{1/3} \sqrt{\frac{E_f}{E_s}} b_{0,1.5d} d$

注： β_h 表示截面高度影响系数； f_t 表示混凝土抗拉强度设计值； u_m 表示临界截面周长； h_0 表示板的有效高度； β_s 表示局部荷载或集中反力作用截面形状的长边与短边的比值； α_s 表示板柱结构中柱类型的影响系数； f'_c 表示混凝土抗压强度； $b_{0,0.5d}$ 表示距离柱面 $d/2$ 处板的临界截面周长； d 表示板的有效高度； f_{cu} 表示混凝土立方体抗压强度； ρ_s 表示配筋率； $b_{0,1.5d}$ 表示距离柱面 $1.5d/2$ 处板的临界截面周长； E_f 表示 FRP 筋的杨氏模量； E_s 表示钢筋的杨氏模量。

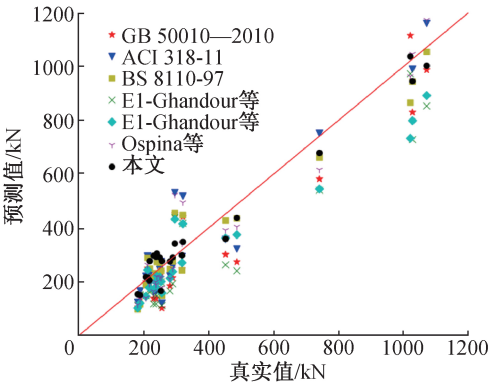


图 5 各算法在测试集上的预测精度散点图

2 抗冲切承载力影响因素分析

FRP 筋混凝土板的抗冲切承载力的影响因素众多,目前还未有明确的量化结论。对于工程设计而言,明确各因素对承载力的影响大小,对采取合理的构造措施来提高板柱节点抗冲切性能具有指导作用。

本文将所选取的柱截面类型(x_1)、柱截面面积(x_2)、板的有效高度(x_3)、混凝土抗压强度(x_4)、FRP 筋的杨氏模量(x_5)和配筋率(x_6)作为基本的

表 5 不同算法的预测精度

性能指标	算法						
	公式 1	公式 2	公式 3	公式 4	公式 5	公式 6	本文
RMSE	105.398	107.719	71.417	130.814	111.567	81.718	50.216
MAPE	26.338	22.030	17.416	31.186	23.219	21.351	13.672
R ²	0.852	0.846	0.932	0.772	0.834	0.911	0.966

影响因素,将得到的 BP 神经网络模型采用 Garson 算法^[18]进行敏感性分析,其公式如式(10)所示:

$$\Theta_i = \frac{\sum_{j=1}^X (|\Theta_{ij}^1 \Theta_j^2| / \sum_{k=1}^X |\Theta_{kj}^1 \Theta_j^2|)}{\sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^H (|\Theta_{ij}^1 \Theta_j^2| / \sum_{k=1}^X |\Theta_{kj}^1 \Theta_j^2|)} \quad (10)$$

其中： Θ^1 表示输入层到隐含层之间的特征矩阵； Θ^2 表示隐含层到输出层之间的特征矩阵。将 BP 神经网络的参数代入式(10),并用 Python 程序语言进

行编写与计算,最终得到图 6 所示的敏感性分析结果。

对比图 6 中 6 种输入参数的敏感性系数可以发现,本文模型选用的 6 种输入参数对 FRP 筋混凝土板的抗冲切承载力的影响都是不可忽略的。上述影响因素按影响力大小排序为:板的有效高度、配筋率、柱截面面积、混凝土抗压强度、FRP 筋的杨氏模量、柱截面类型。FRP 筋混凝土板的抗冲切承载力计算公式应将上述 6 个参数都考虑在内。然而,目

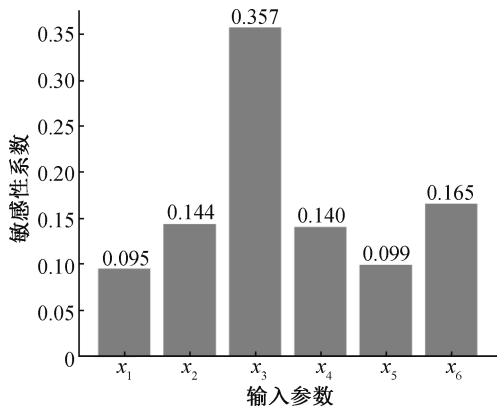


图6 输入参数敏感性分析结果

前各国规范对于冲切承载力的影响因素的认定各不相同,尚没有完整考虑上述6种影响因素的模型。另外,板的有效高度(x_3)的敏感性系数达到了0.357,在6种输入参数的敏感性系数中最大。因此,在结构形式的优化设计中,应着重从板的有效高度出发,改善板柱节点的抗冲切性能。

3 结论

本文收集了121组FRP筋混凝土板柱节点抗冲切承载力数据,建立了BP神经网络模型,并与选取的3种国家规范及3种理论计算模型进行对比分析。在此基础上,采用Garson算法对影响FRP筋混凝土板抗冲切承载力的因素(柱截面类型、柱截面面积、板的有效高度、混凝土抗压强度、FRP筋的杨氏模量和配筋率)进行敏感性分析。结果发现:本模型比其中泛化性能最佳的英国规范RMSE降低了29.7%,MAPE降低了21.5%, R^2 提升了3.6%。敏感性分析的结果验证了本文参数选取的合理性并得出了各参数的影响性排序,其中板的有效高度(x_3)的敏感性系数达到了0.357,在所有参数中最大。

本文的BP神经网络模型所考虑的6种影响因素能更为全面地反映了FRP筋混凝土板柱节点上的受力情况,一定程度上克服了传统计算模型对影响因素考虑不足的缺陷,预测结果比传统模型的计算结果更为准确,可应用于工程实践。敏感性分析的结果也能够为提升FRP筋板柱节点的抗冲切性能提供新的设计思路。

参考文献:

[1] 叶列平,冯鹏. FRP在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36.
 [2] 韦锋,任子华,张俊华. 钢筋混凝土板柱节点抗冲切性能研究综述[J]. 建筑结构, 2020, 50(S2): 499-505.

[3] Ospina C E, Alexander S D B, Cheng J J R. Punching of two-way concrete slabs with fiber-reinforced polymer reinforcing bars or grids[J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(5): 589-598.
 [4] Ebead U, Marzouk H. Fiber-reinforced polymer strengthening of two-way slabs [J]. ACI Structural Journal, 2004, 101(5): 650-659.
 [5] Bouguerra K, Ahmed E A, El-Gamal S, et al. Testing of full-scale concrete bridge deck slabs reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(10): 3956-3965.
 [6] El-Gamal S E. Finite Element analysis of concrete bridge slabs reinforced with fiber reinforced polymer bars[J]. The Journal of Engineering Research, 2014, 11(2): 50.
 [7] Harajli M H, Soudki K A. Shear strengthening of interior slab-column connections using carbon fiber-reinforced polymer sheets[J]. Journal of Composites for Construction, 2003, 7(2): 145-153.
 [8] Elsayed W, Ebead U A, Neale K W. Interfacial behavior and debonding failures in FRP-strengthened concrete slabs [J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11(6): 619-628.
 [9] Mosallam A S, Mosalam K M. Strengthening of two-way concrete slabs with FRP composite laminates[J]. Construction and Building Materials, 2003, 17(1): 43-54.
 [10] Abdullah A, Bailey C G. Punching behaviour of column-slab connection strengthened with non-prestressed or prestressed FRP plates[J]. Engineering Structures, 2018, 160: 229-242.
 [11] 张亚坤. 偏置荷载下FRP筋砼双向板冲切性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010: 44-66.
 [12] 张亚坤,朱海堂,侯黎黎. 集中荷载下FRP筋混凝土双向板的冲切受力性能[J]. 工业建筑, 2012, 42(12): 30-34.
 [13] 侯黎黎,张亚坤. 有限元模拟FRP筋混凝土双向板的冲切过程[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(5): 87-91.
 [14] 张亚坤,侯黎黎,朱海堂. FRP筋混凝土双向板冲切性能试验研究[J]. 混凝土, 2017(11): 54-57.
 [15] El-Ghandour A W, Pilakoutas K, Waldron P. New approach for punching shear capacity prediction of fiber reinforced polymer reinforced concrete flat slabs[J]. ACI Structural Journal, 1999, 188: 135-144.
 [16] El-Ghandour A W, Pilakoutas K, Waldron P. Punching shear behavior and design of FRP RC flat slabs[C]// Proceedings of the International Workshop on Punching Shear Capacity of RC Slabs. Stockholm, Sweden: TRITA-BKN Bulletin 57, 2000: 359-366.

- [17] Ju M, Ju J W W, Sim J. A new formula of punching shear strength for fiber reinforced polymer (FRP) or steel reinforced two-way concrete slabs[J]. *Composite Structures*, 2021, 259: 113471.
- [18] Garson G D. Interpreting neural-network connection weights[J]. *AI Expert*, 1991, 6(4): 46-51.
- [19] Tsai C H, Hsu D S. Diagnosis of reinforced concrete structural damage base on displacement time history using the back-propagation neural network technique [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2002, 16(1): 49-58.
- [20] Hoang N D. Estimating punching shear capacity of steel fibre reinforced concrete slabs using sequential piecewise multiple linear regression and artificial neural network[J]. *Measurement*, 2019, 137: 58-70.
- [21] 陈周熠, 赵国藩. 人工神经网络在钢管核心柱设计参数预报中应用[J]. *大连理工大学学报*, 2002, 42(1): 89-92.
- [22] 郭昱良. 基于机器学习的腐蚀 RC 柱抗震性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 33-52.
- [23] Vu D, Hoang N. Punching shear capacity estimation of FRP-reinforced concrete slabs using a hybrid machine learning approach [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2015, 12(9): 1153-1161.
- [24] Ahmad S H, Zia P, Yu T J, et al. Punching shear tests of slabs reinforced with 3 dimensional carbon fiber fabric[J]. *Concrete International*, 1994, 16: 36-41.
- [25] Banthia N, Al-Asaly M, Ma S. Behavior of concrete slabs reinforced with fiber-reinforced plastic grid[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1995, 7(4): 252-257.
- [26] Matthys S, Taerwe L. Concrete slabs reinforced with frp grids. II: Punching resistance [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2000, 4(3): 154-161.
- [27] El-Ghandour A W, Pilakoutas K, Waldron P. Punching shear behavior of fiber reinforced polymers reinforced concrete flat slabs; Experimental study[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2003, 7(3): 258-265.
- [28] Hussein A, Rashid I. Two-way concrete slabs reinforced with GFRP bars[C]// *Proceeding of the 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*. Calgary, Alberta: Canadian Science Publishing, 2004: 20-23.
- [29] El-Gamal S, El-Salakawy E, Benmokrane B. Behavior of concrete bridge deck slabs reinforced with fiber-reinforced polymer bars under concentrated loads[J]. *ACI Structural Journal*, 2005, 102(5): 727-735.
- [30] Zhang Q, Marzouk H, Hussein A. A preliminary study of high-strength concrete two-way slabs reinforced with GFRP bars[C]// *Proceedings of the 33rd CSCE Annual Conference: General Conference and International History Symposium*. Toronto, Canada: CSCE, 2005: 1-10.
- [31] Zaghoul A. Punching Shear Strength of Interior and Edge Column-slab Connections in CFRP Reinforced Flat Plate Structures Transferring Shear and Moment [D]. Ottawa: Carleton University, 2007: 288-289.
- [32] Salama T, Mahmoud Z I, Zaghoul E R F. Punching behaviour and strength of two-way concrete slabs reinforced with glass fiber polymer (GFRP) rebars[C]// *The Fifth Middle East Symposium on Structural Composites for Infrastructure Applications (MESC)*. Hurghada, Egypt: Structural Composites for Infrastructure Applications, 2008: 23-25.
- [33] Lee J H, Yoon Y S, Cook W D, et al. Improving punching shear behavior of glass fiber-reinforced polymer reinforced slabs[J]. *ACI Structural Journal*, 2009, 106(4): 427-434.
- [34] Khanna O S, Mufti A A, Bakht B. Experimental investigation of the role of reinforcement in the strength of concrete deck slabs[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2000, 27(3): 475-480.
- [35] 肖志龙. 中置集中荷载作用下 FRP 筋混凝土双向板冲切性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010: 16-18.
- [36] Dulude C, Hassan M, Ahmed E A, et al. Punching shear behavior of flat slabs reinforced with glass fiber-reinforced polymer bars[J]. *ACI Structural Journal*, 2013, 110(5): 723-734.
- [37] Hassan M, Ahmed E, Benmokrane B. Punching-shear strength of normal and high-strength two-way concrete slabs reinforced with GFRP bars [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2013, 17(6): 04013003.
- [38] Nguyen-Minh L, Rovňák M. Punching shear resistance of interior GFRP reinforced slab-column connections [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2013, 17(1): 2-13.
- [39] Elgabbas F, Ahmed E A, Benmokrane B. Experimental testing of concrete bridge-deck slabs reinforced with basalt-FRP reinforcing bars under concentrated loads[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(7): 04016029.
- [40] Gouda A, El-Salakawy E. Behavior of GFRP-RC interior slab-column connections with shear studs and high-moment transfer[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2016, 20(4): 04016005.
- [41] Hussein A H, El-Salakawy E F. Punching shear behavior of glass fiber-reinforced polymer-reinforced

concrete slab-column interior connections [J]. ACI Structural Journal, 2018,115(4): 1075-1088.

[42] Eladawy B M, Hassan M, Benmokrane B. Experimental study of interior glass fiber-reinforced polymer-reinforced concrete slab-column connections under lateral cyclic load [J]. ACI Structural Journal, 2019,116(6): 165-180.

[43] 谷圣杰. 集中荷载作用下 FRP 筋混凝土板冲切性能理论研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020: 39-40.

[44] 周旭晓. GFRP 筋混凝土方板抗冲切试验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020: 55-57.

[45] Eladawy M, Hassan M, Benmokrane B, et al. Lateral cyclic behavior of interior two-way concrete slab-column connections reinforced with GFRP bars [J]. Engineering Structures, 2020,209:109978.

[46] AlHamaydeh M, Anwar Orabi M. Punching shear behavior of synthetic fiber-reinforced self-consolidating concrete flat slabs with GFRP bars[J/OL]. Journal of Composites for Construction, 2021, 25 (4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001131](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001131).

[47] Yonaba H, Anctil F, Fortin V. Comparing sigmoid transfer functions for neural network multistep ahead streamflow forecasting [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2010,15(4):275-283.

[48] 沈花玉, 王兆霞, 高成耀, 等. BP 神经网络隐含层单元数的确定[J]. 天津理工大学学报, 2008, 24(5):13-15.

[49] 王庆利, 刘之洋, 王斌. 人工神经网络方法与劲性钢筋混凝土短柱抗剪承载力[J]. 东北大学学报, 1998, 19 (5): 15-17.

(责任编辑:康 锋)

附录 A FRP 筋混凝土板试验数据

表 A1 中列出了数据集的来源以及具体的材料信息。试件参数分别为：柱截面类型 x_1 、柱截面面积 $x_2(A/\text{cm}^2)$ 、板的有效高度 $x_3(d/\text{mm})$ 、混凝土抗压强度 $x_4(f'_c/\text{MPa})$ 、FRP 筋的杨氏模量 $x_5(E_f/\text{GPa})$ 和配筋率 $x_6(\rho_f/\%)$ ； $y(V/\text{kN})$ 为抗冲切承载力的试验值；柱截面类型有三种：正方形(x_1

=1)、圆形($x_1=2$)和矩形($x_1=3$)。为便于各模型之间进行性能分析对比,在实验前将不同形状(圆柱体和立方体)柱的混凝土抗压强度进行统一。为防止数据精度不同引起的误差,将除柱截面类型 x_1 以外的试验数据保留小数点后两位有效数字。

表 A1 FRP 筋混凝土板试验数据汇总

数据来源	编号	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	y
Ahmad 等 ^[24] (1994)	SN1	1	56.25	61.00	42.40	113.00	0.95	93.00
	SN2	1	56.25	61.00	39.60	113.00	0.95	78.00
	SN3	1	100.00	61.00	36.00	113.00	0.95	96.00
	SN4	1	100.00	61.00	36.60	113.00	0.95	99.00
Banthia 等 ^[25] (1995)	I	2	78.54	55.00	41.00	100.00	0.31	65.00
	II	2	78.54	55.00	52.90	100.00	0.31	61.00
Matthys 等 ^[26] (2000)	C1	2	176.72	96.00	36.70	91.80	0.27	181.00
	C1'	2	415.48	96.00	37.30	91.80	0.27	189.00
	C2	2	176.72	95.00	35.70	95.00	1.05	255.00
	C2'	2	415.48	95.00	36.30	95.00	1.05	273.00
	C3	2	176.72	126.00	33.80	92.00	0.52	347.00
	C3'	2	415.48	126.00	34.30	92.00	0.52	343.00
	CS	2	176.72	95.00	32.60	147.00	0.19	142.00
	CS'	2	415.48	95.00	33.20	147.00	0.19	150.00
	H1	2	176.72	95.00	118.00	37.30	0.62	207.00
	H2	2	176.72	89.00	35.80	40.70	3.76	231.00
	H2'	2	50.27	89.00	35.90	40.70	3.76	171.00
	H3	2	176.72	122.00	32.10	44.80	1.22	237.00
El-Ghandour 等 ^[27] (2003)	H3'	2	50.27	122.00	32.10	44.80	1.22	217.00
	SG1	1	400.00	142.00	32.00	45.00	0.18	170.00
	SC1	1	400.00	142.00	32.80	110.00	0.15	229.00
	SG2	1	400.00	142.00	46.40	45.00	0.38	271.00
	SG3	1	400.00	142.00	30.40	45.00	0.38	237.00
Ospina 等 ^[3] (2003)	SC2	1	400.00	142.00	29.60	110.00	0.35	317.00
	GFR-1	1	625.00	120.00	29.50	34.00	0.73	217.00
	GFR-2	1	625.00	120.00	28.90	34.00	1.46	260.00
Hussein 等 ^[28] (2004)	NEF-1	1	625.00	120.00	37.50	28.40	0.87	206.00
	G-S1	1	625.00	100.00	40.00	42.00	1.18	249.00
	G-S3	1	625.00	100.00	29.00	42.00	1.67	240.00
	G-S4	1	625.00	100.00	26.00	42.00	0.95	210.00
El-Gamal 等 ^[29] (2005)	G-S1	3	1500.00	163.00	49.60	44.60	1.00	740.00
	G-S2	3	1500.00	159.00	44.30	38.50	1.99	712.00
	G-S3	3	1500.00	159.00	49.20	46.50	1.21	732.00
	C-S1	3	1500.00	156.00	49.60	122.50	0.35	674.00
	C-S2	3	1500.00	165.00	44.30	122.50	0.69	799.00
Zhang 等 ^[30] (2005)	GS2	1	625.00	100.00	35.00	42.00	1.05	218.00
	GSHS	1	625.00	100.00	71.00	42.00	1.18	275.00
Zaghloul ^[31] (2007)	ZJF5	1	625.00	75.00	44.80	100.00	1.33	234.00

续表								
数据来源	编号	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	y
Salama 等 ^[32] (2008)	F1	1	400.00	82.00	37.40	46.00	1.10	165.00
	F2	1	400.00	112.00	33.00	46.00	0.81	170.00
	F3	1	400.00	82.00	38.20	46.00	1.29	210.00
	F4	1	400.00	82.00	39.70	46.00	1.54	230.00
Lee 等 ^[33] (2009)	GFU1	1	506.25	110.00	36.30	48.20	1.18	222.00
	GFB2	1	506.25	110.00	36.30	48.20	2.15	246.00
	GFB3	1	506.25	110.00	36.30	48.20	3.00	248.00
Khanna 等 ^[34] (2010)	1	3	1250.00	138.00	35.00	42.00	2.40	756.00
肖志龙 ^[35] (2010)	A	1	225.00	130.00	22.16	45.60	0.42	176.40
	B-2	1	225.00	130.00	32.48	45.60	0.42	209.40
	B-3	1	225.00	130.00	32.40	45.60	0.55	245.30
	B-4	1	225.00	130.00	32.80	45.60	0.29	166.60
	B-6	1	225.00	130.00	33.20	45.60	0.42	217.20
	B-7	1	225.00	130.00	28.32	45.60	0.42	221.50
	C	1	225.00	130.00	46.05	45.60	0.42	252.50
Bouguerra 等 ^[5] (2011)	G-200-N	3	1500.00	155.00	49.10	43.00	1.20	732.00
	G-175-N	3	1500.00	135.00	35.20	43.00	1.20	484.00
	G-150-N	3	1500.00	110.00	35.20	43.00	1.20	362.00
	G-175-H	3	1500.00	135.00	64.80	43.00	1.20	704.00
	G-175-N-0.7	3	1500.00	135.00	53.10	43.00	0.70	549.00
	G-175-N-0.35	3	1500.00	137.00	53.10	43.00	0.35	506.00
	C-175-N	3	1500.00	140.00	40.30	122.00	0.40	530.00
Hassan 等 ^[3637] (2013)	$G_{(0.7)}30/20$	1	900.00	134.00	34.30	48.20	0.71	329.00
	$G_{(1.6)}30/20$	1	900.00	131.50	38.60	48.10	1.56	431.00
	$G_{(0.7)}45/20$	1	2025.00	134.00	45.40	48.20	0.71	400.00
	$G_{(1.6)}45/20$	1	2025.00	131.50	32.40	48.10	1.56	504.00
	$G_{(0.3)}30/35$	1	900.00	284.00	34.30	48.20	0.34	825.00
	$G_{(0.7)}30/35$	1	900.00	284.00	39.40	48.10	0.73	1071.00
	$G_{(0.3)}45/35$	1	2025.00	284.00	48.60	48.20	0.34	911.00
	$G_{(0.7)}45/35$	1	2025.00	281.50	29.60	48.10	0.73	1248.00
	$G_{(1.6)}30/20$ -H	1	900.00	131.00	75.80	57.40	1.56	547.00
	$G_{(1.2)}30/20$	1	900.00	131.00	37.50	64.90	1.21	438.00
	$G_{(1.6)}30/35$	1	900.00	275.00	38.20	56.70	1.61	1492.00
	$G_{(1.6)}30/35$ -H	1	900.00	275.00	75.80	56.70	1.61	1600.00
	$G_{(0.7)}30/20$ -B	1	900.00	131.00	38.60	48.20	0.73	386.00
	$G_{(1.6)}45/20$ -B	1	2025.00	131.00	39.40	48.10	1.56	511.00
	$G_{(0.3)}30/35$ -B	1	900.00	284.00	39.40	48.20	0.34	781.00
	$G_{(1.6)}30/20$ -B	1	900.00	131.00	32.40	48.10	1.56	451.00
	$G_{(0.3)}45/35$ -B	1	2025.00	284.00	32.40	48.20	0.34	1020.00
	$G_{(0.7)}30/35$ -B-1	1	900.00	281.00	29.60	48.10	0.73	1027.00
	$G_{(0.7)}30/35$ -B-2	1	900.00	281.00	46.70	48.10	0.73	1195.00
	$G_{(0.7)}37.5/27.5$ -B-2	1	1406.25	209.00	32.30	48.20	0.72	830.00
Nguyen-Minh 等 ^[38] (2013)	GSL-0.4	1	400.00	129.00	39.00	48.00	0.48	180.00
	GSL-0.6	1	400.00	129.00	39.00	48.00	0.68	212.00
	GSL-0.8	1	400.00	129.00	39.00	48.00	0.92	244.00

续表								
数据来源	编号	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	y
Elgabbas 等 ^[39] (2016)	S2-B	3	1500.00	167.00	48.81	64.80	0.70	548.30
	S3-B	3	1500.00	169.00	42.20	69.30	0.69	664.60
	S4-B	3	1500.00	167.00	42.20	64.80	0.70	565.90
	S5-B	3	1500.00	167.00	47.90	64.80	0.99	716.40
	S6-B	3	1500.00	167.00	47.90	64.80	0.42	575.80
	S7-B	3	1500.00	167.00	47.90	64.80	0.42	436.40
Gouda 等 ^[40] (2016)	GN-0.65	1	900.00	160.00	42.00	68.00	0.65	363.00
	GN-0.98	1	900.00	160.00	38.00	68.00	0.98	378.00
	GN-1.30	1	900.00	160.00	39.00	68.00	1.13	425.00
	GH-0.65	1	900.00	160.00	70.00	68.00	0.65	380.00
	G-00-XX	1	900.00	160.00	38.00	68.00	0.65	421.00
	G-30-XX	1	900.00	160.00	42.00	68.00	0.65	296.00
Hussein 等 ^[41] (2018)	R-15-XX	1	900.00	160.00	40.00	63.10	0.65	320.00
	H-1.0-XX	1	900.00	160.00	80.00	65.00	0.98	461.00
	H-1.5-XX	1	900.00	160.00	84.00	65.00	1.46	541.00
Eladawy 等 ^[42] (2019)	H-2.0-XX	1	900.00	160.00	87.00	65.00	1.93	604.00
	G _{1(1.06)}	1	900.00	151.00	52.00	62.60	1.06	140.00
	G _{2(1.51)}	1	900.00	151.00	46.00	62.60	1.51	140.00
谷圣杰 ^[43] (2020)	G _{3(1.06)} -SL	1	900.00	151.00	46.00	62.60	1.06	180.00
	A30-1	1	900.00	88.00	27.40	51.10	1.28	191.00
	A30-2	1	900.00	108.00	27.30	51.10	1.05	289.00
	A30-3	1	900.00	138.00	26.20	51.10	0.82	413.00
	A30-4	1	1225.00	86.00	26.80	51.10	1.31	209.00
	A40-1	1	1225.00	88.00	28.20	51.10	1.28	232.00
	A40-2	1	1225.00	88.00	26.40	54.10	0.89	221.00
	A40-3	1	900.00	88.00	28.60	51.10	1.28	236.00
	A50-1	1	900.00	88.00	29.20	51.10	1.28	253.00
	A50-2	1	900.00	90.00	32.20	54.10	0.87	237.00
周旭晓 ^[44] (2020)	A50-3	1	1225.00	88.00	26.70	51.10	1.28	280.00
	S40-1	1	900.00	88.00	32.30	51.10	0.98	187.00
	S50-1	1	900.00	86.00	43.20	54.40	0.70	134.00
Eladawy 等 ^[45] (2020)	G _{4(1.06)} -H	1	900.00	151.00	92.00	62.60	1.06	140.00
Mohammed 等 ^[46] (2021)	0F-60S	1	625.00	125.00	38.20	50.60	2.81	463.00
	0F-80F	1	625.00	125.00	38.20	50.60	2.11	486.00
	0F-110S	1	625.00	125.00	38.20	50.60	1.53	436.00
	1.25F-60S	1	625.00	125.00	39.80	50.60	2.81	455.00
	1.25F-80S	1	625.00	125.00	39.80	50.60	2.11	506.00
	1.25F-110S	1	625.00	125.00	39.80	50.60	1.53	498.00