

# 基于BP神经网络的缺陷CFST短柱承载力预测

陆征然<sup>1</sup>,赵婉东<sup>1</sup>,郭超<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学管理学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 基于大量钢管混凝土(Concrete Filled Steel Tube, CFST)短柱承载力试验数据,利用神经网络建立其承载力和破坏模式与构件各特征参数之间的映射关系,以便对复杂参数下的带缺陷CFST柱承载力进行预测。**方法** 通过对国内外文献中试验数据的收集整理,选取89组缺陷圆形CFST短柱承载力试验数据,构建并训练一个多层BP神经网络模型,对缺陷圆形CFST短柱承载力进行预测,并将预测值与实际值进行比较。**结果** 利用笔者构建的模型得到的缺陷圆形CFST短柱承载力的预测值与其实值相比,两者间的绝对相对误差ARE数值在5%之内,并且样本数据回归曲线的误差值 $r$ 值接近1,验证了网络构建的有效性,以及预测结果的精确性。**结论** BP神经网络对于预测缺陷圆形CFST短柱承载力是有效、准确的,为研究缺陷圆形CFST短柱的承载力提供了新方法。

**关键词** BP神经网络;缺陷;圆形CFST;短柱;承载力

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## Bearing Capacity Prediction of Defective CFST Short Columns Based on BP Neural Network

LU Zhengran<sup>1</sup>, ZHAO Wandong<sup>1</sup>, GUO Chao<sup>2</sup>

(1. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** Based on a large number of steel pipe concrete (concrete filled steel tube short column carrying capacity test data), the neural network is used to establish the mapping relationship between its carrying capacity and destruction mode and the characteristic parameters of the components, so as to predict the load carrying force and destruction mode of the defective CFST column under complex parameters. By collecting and sorting out test data in domestic and foreign literature, selecting 89 groups of defective circular CFST short column bearing capacity test data,

收稿日期:2021-02-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51678375);辽宁省“兴辽英才计划”资助项目(XLYC1907121);辽宁省教育厅基础科研项目(lnjc202019)

作者简介:陆征然(1982—),女,副教授,博士,主要从事钢-混凝土组合结构方面研究。

constructing and training a multi-layer BP neural network model to predict the bearing capacity of defective circular CFST short column, and compare predicted value with actual value. Using the model constructed in this paper, the predicted value of the bearing capacity of the defective circular CFST short column is compared with the actual value. The absolute relative error ARE value between the two is within 5%, and the error value  $r$  of the regression curve of the sample data is close to 1. Demonstrate the effectiveness of network construction and the accuracy of prediction results. BP neural network is effective and accurate in predicting the bearing capacity of defective circular CFST short columns, and provides a new method for studying the bearing capacity of defective circular CFST short columns.

**Key words:** BP neural network; defect; circular CFST; short column; bearing capacity

钢管混凝土 (Concrete Filled Steel Tube, CFST) 是一种由钢管和混凝土组成的复合结构,以其承载力高、具有较高塑性和韧性并且抗震性能好的优点已经被广泛应用于现代高层和桥梁等建筑中。但实际上圆形 CFST 存在不同的缺陷问题,在 CFST 结构中,若构件水平跨越,其截面顶部可能存在球冠形脱空缺陷;若构件竖向承载,可能存在环向均匀脱空缺陷。在实际项目中,通过超声波三维截面扫描对钢管混凝土内部脱空现象进行测试<sup>[1-3]</sup>,得到具体圆形 CFST 的脱空缺陷。

在 CFST 构件中,钢管和核心混凝土之间的相互作用和协同互补是其主要力学性能优势<sup>[4-5]</sup>。然而,脱空缺陷导致钢管和核心混凝土之间发生界面分离,削弱两者之间的相互作用,对 CFST 构件的承载力造成显著的影响。部分学者对于缺陷 CFST 承载力的研究多基于有限元模拟和试验数据进行分析。廖飞宇等<sup>[6]</sup>进行了 14 根构件在压弯扭复合作用下的试验研究,发现脱空缺陷对于构件承载力的影响更为显著。张建威等<sup>[7]</sup>对 12 根 CFST 试件进行压弯剪复合作用下的滞回性能试验,对 CFST 构件在不同参数下荷载-位移骨架进行分析,得出环向脱空缺陷大大降低构件承载力,并且降低构件的受剪承载力。

现阶段对于缺陷圆形 CFST 承载力的研究主要集中于模型试验和有限元分析,但试验需要耗费大量的人工、时间和资金,并且实

际中,由于构件各主要特征参数具有随机性,模型试验中的参数设计无法完全满足实际工况。此外,由于 CFST 是一种组合结构,影响其承载力的因素较多,并且各因素之间的函数关系十分复杂,利用有限元模拟,计算量大,且对各特征参数化分析,过程繁琐。相比之下,人工神经网络能够提供与传统符号计算和数值分析不同的计算方式,利用输入层和输出层之间的非线性映射关系,进而分析问题。基于此,笔者利用神经网络对输入层和输出层数据进行有效的划分及两者之间的非线性映射关系,建立不同缺陷条件、等级与承载力及破坏模式之间的关系;在此基础上,对缺陷圆形 CFST 短柱构件的承载力进行预测。研究表明:通过神经网络模型对缺陷圆形钢管混凝土短柱的承载力进行预测是可行的,并且精确度较高。

## 1 BP 神经网络模型

### 1.1 人工神经网络

人工神经网络是模拟动物神经细胞神经元处理信号的方法<sup>[8]</sup>,即神经元之间大规模并行,互相连接构成的非线性动力系统的互连网络。通过调整内部各神经元之间节点,来进行信息处理<sup>[9]</sup>。具备基本的计算能力,还能够学习和推理,从而找出输入和输出变量之间的非线性关系,可以在复杂的工程问题上进行模拟,将输入层各参数设置为结构性能的影响参数,输出层设置为 CFST 结构

的承载力,所训练的神经网络模型能够将各影响参数与结构承载力之间建立起高质量的连接关系,从而进行预测分析。利用神经网络处理高度非线性问题的能力解决结构工程中非线性复杂问题十分适宜。

神经网络已对方形 CFST 进行广泛研究,朱美春等<sup>[10]</sup>使用 55 组试验数据对方形 CFST 短柱承载力进行成功预测,得到最佳模拟精度。陈志华等<sup>[11]</sup>建立三层神经网络模型成功预测出矩形 CFST 柱轴压破坏模态。同样,神经网络也运用到对圆形钢管混凝土的研究。T. Viet-Linh 等<sup>[12]</sup>对圆形钢管混凝土超高强混凝土柱进行非线性有限元分析,将得到的数据利用人工神经网络模型加以验证,预测超高强度混凝土圆形钢管混凝土柱的轴向压缩能力。H. N. Xuan 等<sup>[13]</sup>通过结合学习数据集的大小,随机实现和预测模型进行仿真,来预测圆形钢管混凝土钢管的极限载荷。

1.2 BP 神经网络

在人工神经网络的应用中,BP 神经网络的应用较为广泛。BP 神经网络除拥有自适应性、自学习性、自组织记忆等强大的非线性表达能力之外,还能够以较高精度逼近任何连续函数<sup>[14]</sup>。BP 神经网络是一种以信号正向传播,误差逆向传播的多层前向神经网络,其网络结构图如图 1 所示。

BP 神经网络由输入层、隐含层、输出层以及各层之间的权值  $w$ 、 $Z$  和阈值  $b$  组成。在正向传播过程中,信号由输入层传递到若干隐含层,再经过 Sigmoid 型函数传送到输出层,输出层采用线性函数作为传递函数,得到输出结果。实际输出与期望结果存在较大误差,需要进行误差逆向传播优化,将误差沿着原来的传播方向进行逆传播,即缩小误差的方向,从输出层经过中间隐含层各层,逐层向前修正网络各层中的连接权值。经过反复多次修改,达到误差最小,得到最终输出结果。综上,BP 神经网络实际就是不断修改完善各层之间的权值和阈值,然后进行训练仿真和预测。

2 模型构建及分析

2.1 试验数据统计

将文献[15-19]中的 89 组试验数据样本用于缺陷圆形 CFST 短柱承载力的建模研究(见表 1)。通过对 89 组试验数据的统计、分析,构建 BP 神经网络模型,探求各主要影响因素和缺陷圆形 CFST 短柱承载力之间的映射关系。

2.2 试验数据统计分析

使用 MATLAB 绘制出各参数散点矩阵图,如图 2 所示。

图 2 表明了各影响参数与模型输出之间的相关性<sup>[20]</sup>。文献[15-19]数据中分别选取了缺陷圆形 CFST 短柱的长  $L$ ,外直径  $D$ ,钢管壁厚  $t$ ,钢材的屈服强度  $f_y$  和混凝土抗压强度  $f_{cu}$ 。由于球冠形或环形脱空缺陷会大大降低构件的承载力,并且随着脱空率的增大,构件承载力会降低<sup>[21]</sup>。因此,还需考虑影响脱空缺陷 CFST 承载力的脱空率  $x$  和偏心距  $e$ 。使用 matlab 中 cftool 工具箱将上述 89 组实验数据中脱空率  $x$ 、偏心距  $e$  以及构件承载力的相关性进行绘制,拟合曲线如图 3、图 4 所示。

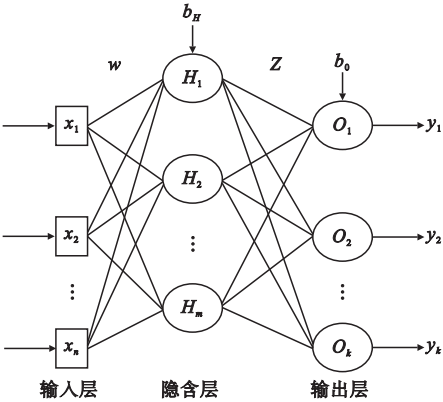


图 1 神经网络结构图

Fig. 1 Neural network structure

表 1 试验数据汇总

Table 1 Summary of test data

序号	$D/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$e/\text{mm}$	$\chi/\%$	$f_y/\text{MPa}$	$f_{cu}/\text{MPa}$	$N_{ut}/\text{kN}$	文献
1	180	630	3.8	0	0	360	64.1	2 110	[15]
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
12	180	630	3.8	0	6.6	360	64.1	1 830	
13	127	381	2.87	0	0	205	44.1	491.8	[16]
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
36	127	381	2.87	96	6.6	205	44.1	171.4	
37	127	381	2.87	0	0	383.9	44.05	491.8	[17]
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
68	127	381	2.87	96	6.6	383.9	44.05	171.4	
69	219	700	6	25	0	371.3	30.1	2 500	[18]
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
77	219	700	6	75	5	371.3	30.1	1 440	
78	180	630	3.8	27	0	360	67.9	1 559	[19]
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
89	180	630	3.8	27	6.6	360	67.9	1 222	

注: $L$ 为构件长; $D$ 为构件外直径; $t$ 为钢管壁厚; $x$ 为构件脱空率; $e$ 为偏心距; $f_y$ 为钢材屈服强度; $f_{cu}$ 为混凝土抗压强度; $N_{ut}$ 为构件承载力。

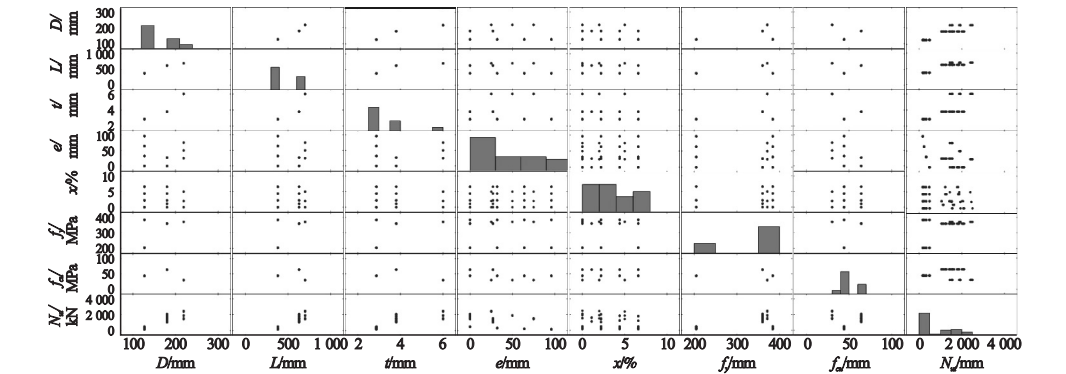


图 2 各因素散点矩阵图

Fig. 2 Scatter matrix of each factor

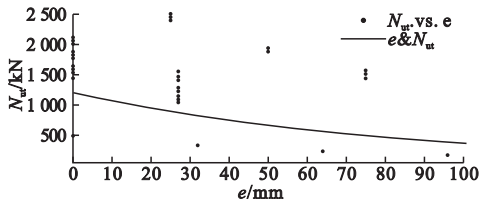


图 3 偏心距  $e$  与承载力  $N_{ut}$  关系

Fig. 3 Relationship between eccentricity  $e$  and bearing capacity

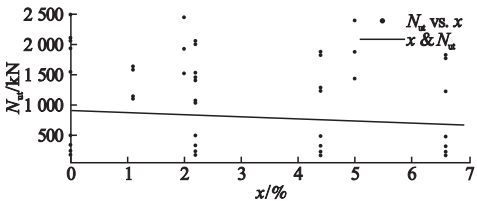


图 4 脱空率  $x$  与承载力  $N_{ut}$  关系

Fig. 4 Relationship between void ratio  $x$  and bearing capacity

由图可知,偏心距越大,构件承载力越低;不同脱空率下构件承载力随着脱空率增高而降低。由此确定出模型的 7 个影响因素。

2.3 BP 神经网络模型建立

对上述 89 组数据进行划分,训练集数据 80 个(包括 80% 训练集和 10% 验证集)测试集数据 9 个(10%)。网络输入层节点数 7,表示上述选取的 7 个主要影响因素,即缺陷圆形 CFST 短柱的柱长  $L$ ,外直径  $D$ ,钢管壁厚  $t$ ,脱空率  $\chi$ ,偏心距  $e$ ,钢材的屈服强度  $f_y$  和混凝土抗压强度  $f_{cu}$ 。输出层节点数是 1,即缺陷圆形 CFST 短柱的承载力。设置三层隐含层,隐含层各节点数设置为 10。为使模型的收敛速度最快,采用 trainlm 算法,学习率  $lr=0.03$ ,最大训练步数  $epochs=1\ 000$ ,控制误差  $goal=1.0\times10^{-6}$ ,附加动量因子  $mc=0.9$ 。在对网络进行训练前,先将输入向量和输出向量进行统一的归一化处理,有利于网络进行快速收敛。

神经网络 ANN-1 输入变量对应上述 7 个主要影响因素,相应编号:①钢管外直径  $D$ ;②柱长  $L$ ;③钢管壁厚  $t$ ,mm;④偏心距  $e$ ;⑤脱空率  $\chi$ ,%;⑥钢管屈服强度  $f_y$ ;⑦混凝土抗压强度  $f_{cu}$ 。输出变量为构件承载力  $N_{ut}$ 。按照上述进行设置,得到神经网络 ANN-1 结构图,如图 5 所示。

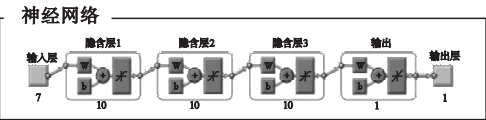


图 5 神经网络 ANN-1 结构图

Fig. 5 Ann-1 structure of neural network

2.4 模型验证及结果分析

对构建成功的神经网络模型进行验证,计算决定系数 ( $R^2$ ),平均绝对百分比误差 ( $MAPE$ ),平均绝对误差 ( $MAE$ ),均方误差 ( $MSE$ ),均方根误差 ( $RMSE$ ) 统计数据值,计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2} \tag{1}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{2}$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{3}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(\hat{y}_i - y_i)| \tag{4}$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right| \tag{5}$$

其中, $\hat{y}_i$  是数据的预测值,即构件承载力  $N_{ut}$  的预测值; $y_i$  是数据实际值,即构件承载力  $N_{ut}$  的实际值。

计算结果如表 2 所示,其中,误差值 ( $RMSE,MAE,MSE$ ) 越低,表明构建的模型具有预测和泛化能力,即预测值与模型值之间存在较强关联性<sup>[22]</sup>。

表 2 各统计参数计算结果

Table 2 Results of statistical parameters

$R^2$	$MAPE$	$MAE$	$RMSE$	$MSE$
0.997 3	0.025 9	29.226	37.854 7	1 432.98

样本数据的回归曲线如图 6 所示。

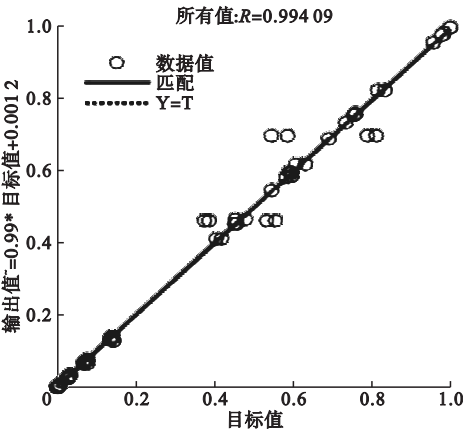


图 6 样本数据回归线

Fig. 6 Regression line of sample data

通过原点的回归线斜率接近 1,模型样本数据相关系数  $r$  值为 0.994 09, $r>0.8$ ,决



定系数  $R^2 = 0.997\ 3$ , 接近 1,  $MAPE = 0.025\ 9$ , 接近 0, 说明该网络构建有效。

通过将利用神经网络模型获得的缺陷 CFST 短柱承载力预测值与部分文献中的试验值进行比较(见表 3), 可以发现预测值和试验值之间存在较小的误差, 均在 5% 以内, 最小误差可达 0.72%。

表 3 神经网络预测值与文献中试验结果对比

Table 3 Comparison of neural network prediction results

序号	承载力/kN		绝对误差/kN	ARE/%
	试验值	预测值		
1	1 930 <sup>[18]</sup>	1 872.9	57.1	2.96
2	332.8 <sup>[16]</sup>	330.4	2.4	0.72
3	229.3 <sup>[16]</sup>	225.5	3.8	1.66
4	1 113 <sup>[19]</sup>	1 143	30	2.7
5	1 440 <sup>[18]</sup>	1 504.3	64.3	4.47
6	229.3 <sup>[17]</sup>	225.5	3.8	1.66
7	1 780 <sup>[15]</sup>	1 830	50	2.81
8	1 833 <sup>[15]</sup>	1 878	45	2.45
9	171.3 <sup>[16]</sup>	164.8	6.5	3.79

注:绝对误差 = |真实值 - 预测值|; ARE(绝对相对误差) = 绝对误差/真实值。

由此表明, 笔者构建的神经网络模型已将缺陷 CFST 的试验数据进行了有效划分, 成功地找到构件各特征参数与承载力之间的映射关系, 通过本模型得到的预测值具有较高的精度。

3 结 论

(1) 笔者对缺陷 CFST 短柱承载力预测时, 以对其性能影响显著的 7 个因素为依据, 对文献中的大量数据进行筛选、统计和分析。通过在对试验数据的有效选取以及精确划分, 获得了较高预测精度的神经网络。

(2) 笔者建立的神经网络模型能够将影响缺陷 CFST 各主要参数与承载力之间构建起非线性关系, 并且模型具有较好的学习精度和泛化能力, 能够找到影响承载力各参数和承载力之间的映射关系, 从而将缺陷

CFST 的承载力合理并较为精确地预测出来。

(3) 在试验及有限元分析基础上, 利用笔者构建的 BP 神经网络模型对缺陷 CFST 承载力进行预测, 可为今后 CFST 承载力的深入研究提供了一种新的方法和思路。

参考文献

[1] LU Zhengran, GUO Chao. Effects of SWS strength and concrete air void composite defects on performance of CFST arch bridge rib [J]. Mathematical problems in engineering, 2020, 2020: 7202807 - 7202825.

[2] GUO Chao, LU Zhengran. Air void and cap gap composite defects of concrete-filled steel-tube arch bridge transverse brace [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2020, 34(4): 04020073.

[3] 杜国锋, 别雪梦. 考虑混凝土损伤塑性的 CFST 柱轴压力学性能数值模拟 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(3): 444 - 452.  
(DU Guofeng, BIE Xuemeng. Numerical simulation of axial compression mechanical behavior of CFST column with concrete damaged plasticity [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32(3): 444 - 452.)

[4] 刘明辉, 韩冰, 朵君泰. 界面缺陷对钢管混凝土受弯构件抗弯性能影响研究 [J]. 土木工程学报, 2019, 52(6): 55 - 66.  
(LIU Minghui, HAN Bing, DUO Juntai. Investigation on the effect of interface imperfection on the flexural behaviors of concrete filled steel tubular bending members [J]. Chinese journal of civil engineering, 2019, 52(6): 55 - 66.)

[5] 廖飞宇, 韩浩, 王宇航. 带环向脱空缺陷的钢管混凝土构件在压弯扭复合受力作用下的滞回性能研究 [J]. 土木工程学报, 2019, 52(7): 57 - 68.  
(LIAO Feiyu, HAN Hao, WANG Yuhang. Cyclic behaviour of concrete-filled steel tubular (CFST) members with circumferential gap under combined compression-bending-torsion load [J]. Chinese journal of civil engineering, 2019, 52(7): 57 - 68.)

[6] 张传钦, 廖飞宇, 王静峰, 等. 脱空缺陷对钢管混凝土压弯扭构件力学性能的影响研究 [J]. 工业建筑, 2019, 49(10): 19 - 24.  
(ZHANG Chuanqin, LIAO Feiyu, WANG Jingfeng, et al. Effects of gap on the mechanical properties of concrete-filled steel tube under combined compression-bending-torsion loading [J]. Industrial building, 2019, 49(10): 19 - 24.)

[7] 张建威, 廖飞宇, 张伟杰. 带环向脱空缺陷的钢管混凝土构件压弯剪复合作用下的滞回性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2019, 40(增

- 刊1):251-256.  
(ZHANG Jianwei, LIAO Feiyu, ZHANG Weijie. Cyclic behavior of concrete-filled steel tubular members with circumferential gap under combined compression-bending-shear loading [J]. Journal of building structures, 2019, 40 (S1):251-256.)
- [8] 张清允, 陈志华, 王小盾. 基于神经网络的矩形钢管高强混凝土计算方法[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2018, 31(1): 11-15.  
(ZHANG Qingyun, CHEN Zhihua, WANG Xiaodun. Calculation method of high strength concrete-filled rectangular steel tubular columns based on artificial neural networks [J]. Journal of Shijiazhuang tiedao university (natural science edition), 2018, 31(1):11-15.)
- [9] 张清允. 基于神经网络的矩形钢管混凝土柱破坏模式及承载力研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.  
(ZHANG Qingyun. Research on the failure modes and bearing capacity of concrete-filled rectangular steel tubular columns based on artificial neural network [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.)
- [10] 朱美春, 王清湘, 冯秀峰. 方钢管混凝土短柱轴心受压承载力的神经网络模拟[J]. 计算力学学报, 2006(3):353-356.  
(ZHU Meichun, WANG Qingxiang, FENG Xiufeng. Neural network modeling of bearing capacity of axially loaded concrete filled square steel tubular short columns [J]. Journal of computational mechanics, 2006(3): 353-356.)
- [11] 陈志华, 李红星, 王小盾. 基于神经网络的矩形钢管混凝土破坏模式研究[J]. 河北工业大学学报, 2017, 46(4):104-110.  
(CHEN Zhihua, LI Hongxing, WANG Xiaodun. Study on the failure mode of concrete-filled rectangular steel tubular columns based on artificial neural network [J]. Journal of Hebei university of technology, 2017, 46(4): 104-110.)
- [12] VIET-LINH T, DUC-KIEN T, DUY-DUAN N. Practical artificial neural network tool for predicting the axial compression capacity of circular concrete-filled steel tube columns with ultra-high-strength concrete [J]. Thin-walled structures, 2020(151):106720.
- [13] XUAN H N, LE T T. Effects of variability in experimental database on machine-learning-based prediction of ultimate load of circular concrete-filled steel tubes [J]. Measurement, 2021(176):109198.
- [14] 赵明. 基于神经网络的矩形钢管混凝土柱承载性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.  
(ZHAO Ming. Research on the bearing capacity of concrete-filled rectangular steel tubular columns based on neural network [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.)
- [15] LIAO Feiyu, HAN Linhai, HE Shanhu. Behavior of CFST short column and beam with initial concrete imperfection; experiments [J]. Journal of constructional steel research, 2011, 67(12):1922-1935.
- [16] 廖飞宇, 李艳飞, 尧国皇, 等. 带球冠形脱空缺陷的钢管混凝土构件抗拉弯试验和承载力计算方法研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(5):18-29.  
(LIAO Feiyu, LI Yanfei, YAO Guohuang, et al. Mechanical behaviour and design approach of concrete filled steel tubes with circular-segment gap under combined actions of tension and bending [J]. Journal of building structure, 2021, 42(5):18-29.)
- [17] 彭志强. 带脱空缺陷的不锈钢管混凝土构件在偏拉作用下的力学性能研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.  
(PENG Zhiqiang. Experimental behavior of concrete-filled stainless steel tubes with initial concrete imperfection under eccentric tension [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.)
- [18] 梁柯峰. 脱空对钢管混凝土受力性能的影响[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.  
(LIANG Kefeng. The research on the behaviors of concrete-filled steel tube with gaps under load [D]. Changsha: Hu'nan University, 2008.)
- [19] LIAO Feiyu, LI Yongjin. Experimental behaviour of concrete filled steel tubes (CFST) with initial concrete imperfection subjected to eccentric compression [J]. Applied mechanics and materials, 2012, 1801:35-38.
- [20] GANDOMI A H, ROKE D A. Assessment of artificial neural network and genetic programming as predictive tools [J]. Advances in engineering software, 2015, 88:63-72.
- [21] 韩浩, 廖飞宇, 林挺伟, 等. 脱空缺陷对钢管混凝土拉弯构件性能的影响分析[J]. 工业建筑, 2018, 48(3):170-175.  
(HAN Hao, LIAO Feiyu, LIN Tingwei, et al. Effects of concrete gap on the mechanical properties of CFST members subjected to bending and tension [J]. Industrial building, 2018, 48(3):170-175.)
- [22] GANDOMI A H, ALAVI A H, MOUSAVI M, et al. A hybrid computational approach to derive new ground-motion prediction equations [J]. Engineering applications of artificial intelligence, 2011, 24(4):717-732.  
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)