

基于 ANN 的 RECFST 短柱轴压承载力预测

杜运兴,刁俊杰

(湖南大学土木工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要 目的 针对相关设计规范和文献在计算圆端形截面钢管混凝土短柱轴压承载力上的局限性,开发高精高效的轴压承载力预测模型。**方法** 首先,基于国内外已有的 RECFST 短柱轴压试验研究结果建立有限元模型,并通过验证;其次,基于 Python 脚本批量生成有限元模型,建立涵盖广泛输入参数的数据集;然后,利用数据集开发高精度的 ANN 模型并与相关规范和文献结果进行比较;最后,基于 ANN 模型开发 GUI 图形用户界面工具。**结果** ANN 模型预测值与试验结果之比的平均值 $N_{ANN}/N_u = 0.98$,模型预测误差远低于相关规范和文献公式预测误差;ANN 模型的均方误差 $K_{MSE} = 7.3734 \times 10^{-7}$,总数据样本回归值 $R = 0.99963$,表明了 ANN 模型的有效性以及预测结果的精确性。**结论** ANN 模型可以准确预测 RECFST 短柱的轴压承载力,基于模型开发的 GUI 工具简便实用。

关键词 ANN;RECFST 短柱;轴压承载力;图形用户界面工具

中图分类号 TU398.9;TP183

文献标志码 A

引用格式:杜运兴,刁俊杰.基于 ANN 的 RECFST 短柱轴压承载力预测[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(3):414-422.(DU Yunxing,DIAO Junjie. Prediction of axial compression bearing capacity of RECFST Short columns based on artificial neural network[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(3):414-422.)

Prediction of Axial Compression Bearing Capacity of RECFST Short Columns Based on Artificial Neural Network

DU Yunxing, DIAO Junjie

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, China, 410082)

Abstract: In view of the limitations of relevant design specifications and literature formulas in calculating the axial compression bearing capacity of round-ended concrete-filled steel tubular (RECFST) short columns, a high-precision and wide-ranging axial compression bearing capacity prediction model was developed. Firstly, the axial compression test of RECFST short columns completed at home and abroad is investigated, and the finite element model which is strictly

收稿日期:2023-09-14

基金项目:国家自然科学基金项目(52178206)

作者简介:杜运兴(1971—),男,教授,博士,主要从事混凝土结构加固等方面研究。

verified by the test data is established. Secondly, the finite element model is generated in batches based on Python scripts, and a data set covering a wide range of input parameters is established. Then, the data set is used to develop a high-precision ANN model and compare it with relevant specifications and formulas. Finally, a graphical user interface (GUI) tool is developed based on the ANN model for practical engineering applications. The average value of the ratio of the predicted value of the ANN model to the experimental result is $N_{\text{ANN}}/N_u = 0.98$, and the prediction error of the model is much lower than that of the relevant specifications and formulas. The mean square error of the ANN model is $K_{\text{MSE}} = 7.3734 \times 10^{-7}$, and the regression value of the total data sample is $R = 0.99963$, indicating the validity of the ANN model and the accuracy of the prediction results. The ANN model can accurately predict the axial compression bearing capacity of RECFST short columns. The GUI tool developed based on the model is simple and practical, which provides a new idea and method for studying the axial compression bearing capacity of RECFST short columns.

Key words: artificial neural network; RECFST short column; axial bearing capacity; graphical user interface tools

圆端形截面钢管混凝土 (Round-Ended Concrete-Filled Steel Tubular, RECFST) 柱是由两端为半圆截面和中部为矩形截面组合而成的钢管混凝土结构^[1], 具有承载力高、抗震性能好等优点, 被广泛应用于各类桥梁工程与建筑工程中^[2-3]。准确预测 RECFST 短柱轴压承载力是确保结构安全使用的重要前提^[4]。现有设计规范中给出了圆形和矩形截面钢管混凝土短柱轴压承载力的计算公式, 但对圆端形截面的适用性还有待评估。另外, 也有学者提出 RECFST 短柱轴压承载力的计算公式, 但公式的适用范围相当有限。F. X. Ding 等^[5]通过试验数据拟合出了 RECFST 短柱轴压承载力的计算公式, 但公式仅对宽厚比小于 1.5 的 RECFST 短柱轴压承载力有较好的预测效果。任志刚等^[6]基于双剪切统一强度理论推导出 RECFST 短柱的轴压承载力计算公式, 并采用已有的试验数据进行验证, 但公式仅适用于宽厚比和材料强度在一定范围内的 RECFST 短柱。基于前述研究现状的局限性, 有学者使用有限元方法来研究 RECFST 短柱的轴压性能。谷利雄等^[7]使用 ABAQUS 有限元软件研究了圆端形截面宽厚比对钢管混凝土轴压短柱约束效应的影响, 仿真结果与试验结果吻合

良好。M. Ahmed 等^[8]提出了一种分析 RECFST 短柱轴压性能的数值建模方法, 通过与试验结果进行对比, 验证了建模方案的有效性。

人工神经网络 (Artificial Neural Network, ANN) 是一种类似于生物神经系统的机器学习算法, 它能够逼近任意未知函数, 以简单的方式解决常规数学方法难以解决的涉及大量数据分析的难题。近年来, ANN 已在预测、损伤识别等领域得到广泛应用^[9-11], 但由于试验数据量过少, 不能满足 ANN 的训练需求, 从而影响了 ANN 模型的预测精度和泛化能力。因此, 笔者在收集国内外 RECFST 短柱轴压试验数据的基础上, 利用有限元软件建立涵盖广泛输入参数的仿真数据集, 将试验数据集和仿真数据集结合, 开发高精度的 ANN 模型, 进行模拟分析, 并与现有规范和文献结果进行比较, 结果表明开发的 ANN 模型具有更高的预测精度和更广的适用范围; 最后, 基于提出的 ANN 模型开发图形用户界面工具, 以便工程应用。

1 数值模型

考虑对称性, 使用 ABAQUS 有限元软件建立 1/2 RECFST 柱模型, 进行轴压性能仿

真分析,利用文献[12]的试验结果对模型进行验证。

1.1 材料本构模型

1.1.1 受约束混凝土本构模型

RECFST 柱两端圆弧段钢管和中部矩形段钢管对混凝土的约束效应不同,而约束效应的大小将影响核心混凝土应力-应变关系中是否出现下降段^[13],因此,需将核心混凝土划分为强约束区域与弱约束区域(见图1),分别采用文献[14]中的不同本构模型,即 Hassanein 本构模型。

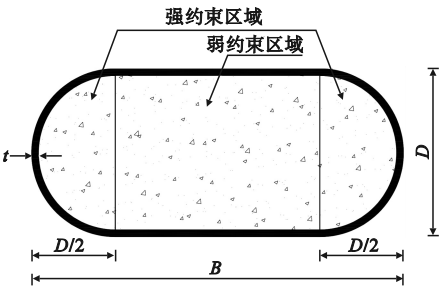


图1 核心混凝土强弱约束区域划分

Fig. 1 Division of strong and weak constraint regions of core concrete

1.1.2 外包钢管本构模型

考虑钢管局部屈曲影响,采用文献[15]给出的钢管本构模型,该应力-应变关系曲线包括了弹性、弹塑性、塑性、应变硬化和最终塑性变形五个阶段。

1.2 参数选取

外包钢管和混凝土分别选用4节点壳单元 S4R 和8节点三维实体单元 C3D8R^[15],

屈服准则分别选用 CDP 模型和 VM 模型,切向接触方式选用摩擦系数为 0.3 的“库伦”摩擦模型,法向选用“硬接触”。在短柱顶部采用刚性端板进行加载,板与混凝土和钢管的相互作用分别是绑定和壳-实体耦合。加载方式为中心加载点与端板刚体耦合后的位移加载模式。受力及有限元模型如图2所示。

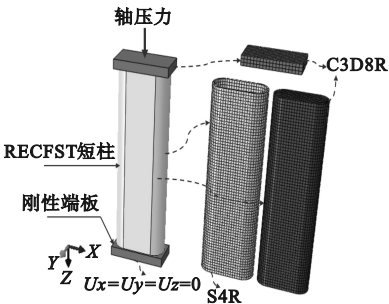
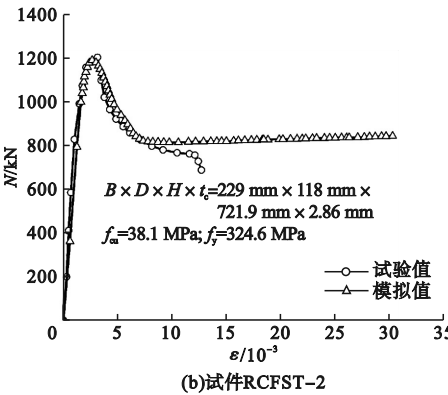
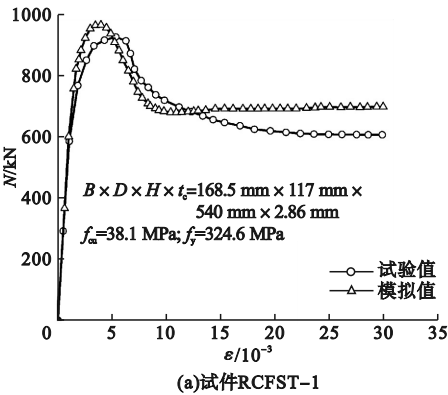


图2 RECFST 短柱轴压有限元模型

Fig. 2 RECFST short column axial compression finite element model

1.3 模型验证

图3为利用有限元模型得到的计算值与文献[12]的 RECFST 短柱轴压试验结果对比。从图3可以看出,有限元模型的荷载-应变曲线与试验曲线吻合较好,有限元模型的极限荷载 $N_{u,FE}$ 与文献[12]试验的极限荷载 $N_{u,exp}$ 的比值 $N_{u,FE}/N_{u,exp}$ 按构件顺序依次为 1.04、0.99、0.95、1.03,平均值、标准差与变异系数分别为 1.00、0.04、0.04。可见,有限元模型可以准确预测 RECFST 短柱的轴压承载力。



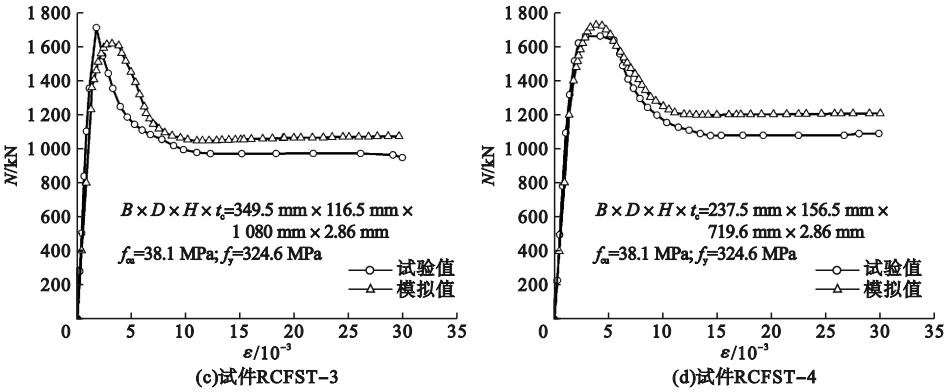


图3 有限元模拟值与文献[12]试验值的比较

Fig. 3 Comparison between finite element simulation values and experimental values in reference [12]

2 数据库建立

收集国内外学者完成的 66 组试验结果^[5-7,12-13,16-18],生成涵盖广泛输入参数的数据集。考虑各个因素之间的交互影响,采用全因子试验设计方法对 RECFST 短柱的轴压性能进行仿真试验。试验自变量包括截

面宽度 B 、截面厚度 D 、截面宽厚比 B/D 、短柱高度 H 、钢管厚度 t_c 、混凝土强度 f_{cu} 以及钢材强度 f_s 。为减少工作量,在不影响结果的情况下,适当简化计算,取柱高 $H = 2B$ 、 $H = 3B$,简化后的算例分为 6 组,每组 192 个试件,共 1 152 个(见表 1)。

表 1 仿真试验工况设计

Table 1 Simulation test condition design

组别	B/mm	D/mm	B/D	t_c/mm	H/mm	f_{cu}/MPa	f_s/MPa
1	400	400,200,133,100	1,2,3,4	4,6,8,10	800	30,50,70,90	235,345,420
2	400	400,200,133,100	1,2,3,4	4,6,8,10	1 200	30,50,70,90	235,345,420
3	600	600,300,200,150	1,2,3,4	4,6,8,10	1 200	30,50,70,90	235,345,420
4	600	600,300,200,150	1,2,3,4	4,6,8,10	1 800	30,50,70,90	235,345,420
5	800	800,400,267,200	1,2,3,4	4,6,8,10	1 600	30,50,70,90	235,345,420
6	800	800,400,267,200	1,2,3,4	4,6,8,10	2 400	30,50,70,90	235,345,420

数据库生成过程中需用 ABAQUS 软件进行大量重复建模操作,为减少计算时间,笔者通过 ABAQUS 接口开发 RECFST 短柱参数化建模的 Python 脚本,脚本基于各试验数

据不断重复运行,最终共生成 1152 个 RECFST 短柱有限元模型,加上试验数据总计 1218 个。表 2 给出了数据集各参数的统计特性,图 4 为输入与输出参数之间的关系。

表 2 数据集各参数统计特性

Table 2 Statistical characteristics of each parameter in data set

结果	B/mm	D/mm	H/mm	t_c/mm	f_{cu}/MPa	f_s/MPa	N_u/kN
最大值	806.00	800.00	2 400.00	10.00	90.00	420.00	51 211.83
最小值	168.50	100.00	400.00	2.50	30.00	235.00	925.00
平均值	582.94	304.81	1 453.87	6.83	58.85	332.31	11 503.45
标准差	172.93	195.05	525.21	2.27	22.12	74.07	8 952.67

由表 2 可得, B 、 D 、 H 、 t_c 、 f_{cu} 、 f_s 和 N_u 的变异系数分别为 0.29 67、0.639 9、0.361 3、0.332 1、0.375 9、0.222 9、0.778 3。

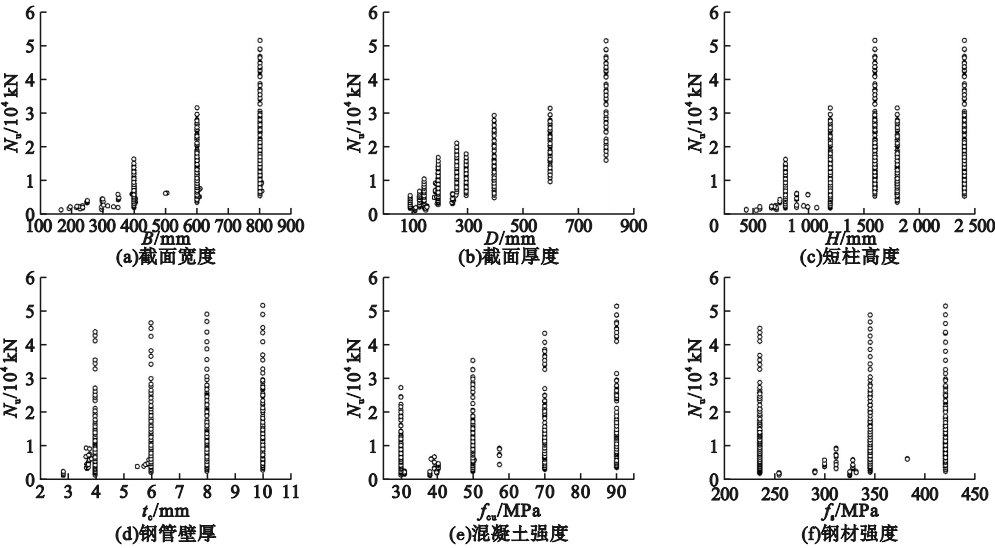


图4 输入参数与输出参数之间的关系

Fig. 4 The relationship between input parameters and output parameters

3 ANN 模型建立与验证

3.1 ANN 模型的提出

(1)利用生成的数据总集训练 ANN 模型,模型输入层包含 6 个节点,分别是:圆端形截面宽度 B 、圆端形截面厚度 D 、短柱高度 H 、外包钢管厚度 t_c 、混凝土抗压强度 f_{cu} 和钢材屈服强度 f_s ; 输出层包含 1 个节点即 RECFST 短柱的轴压承载力 $N_{u,pre}$ 。

(2)为消除各数据属性值间量级的差别,防止数据经过激活函数出现过饱和现象,对数据进行归一化处理,使数据分布在一个范围内,平滑数据样本值的波函数,从而加快网络训练的收敛速度,提高模型精度。笔者采用将输入输出变量限制在 $(-1,1)$ 范围的归一化方法:

$$X_{normal} = \frac{2(X_{real} - X_{min})}{X_{max} - X_{min}} \tag{1}$$

式中: X_{normal} 为数据归一化后的值; X_{real} 为数据归一化前的实际值; X_{max} 为数据样本中的最大值; X_{min} 为数据样本中的最小值。

(3)将数据集划分为训练、测试和验证 3 个数据集,训练集包括 852 个 RECFST 短柱数据(70%),测试集包括 150 个(15%),验证集包括 150 个(15%),用于调整连接权值和阈值,防止出现过拟合现象。

(4)已有理论证明,一个隐含层的人工神经网络可以逼近任何区间内的连续函数,且能取得较好的预测效果^[19],因此,采用一个隐含层,同时选择 TANSIG 函数和 PURELIN 函数作为隐含层和输出层的传递函数(见图 5),函数表达式分别为

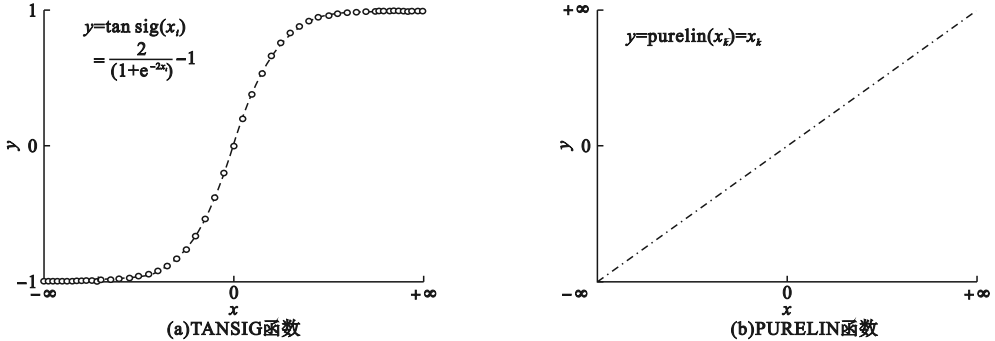


图5 激活函数

Fig. 5 Activation function

$$y_j = \tan \operatorname{sig}(x_j) = \frac{2}{(1 + e^{-2x_j})} - 1. \quad (2)$$

$$y_k = \operatorname{purelin}(x_k) = x_k. \quad (3)$$

(5) LM(Levenberg-Marquard)算法已被各研究学者用于 ANN 模型的构建,并取得了较优的学习效果^[20];均方误差(Mean Squared Error) K_{MSE} 和 R 值是评估模型性能的重要依据,也是停止网络训练的标准。因此,采用 LM 算法作为模型的学习算法,基于均方误差 K_{MSE} 值和 R 值,不断调整隐含层神经元个数,选取模型性能最优的网络结构。 K_{MSE} 值和 R 值表达式为

$$K_{\text{MSE}} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i^p - X_i^a)^2}{n}. \quad (4)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i^p - X_i^a)^2}{\sum_{i=1}^N (X_i^p - X_{\text{mean}}^p)^2}. \quad (5)$$

式中: n 为样本数; X_i^p 、 X_i^a 、 X_{mean}^p 分别为预测值、实际值和均值。

神经元个数为 1~20 的 K_{MSE} 值和 R 值如图 6 所示。

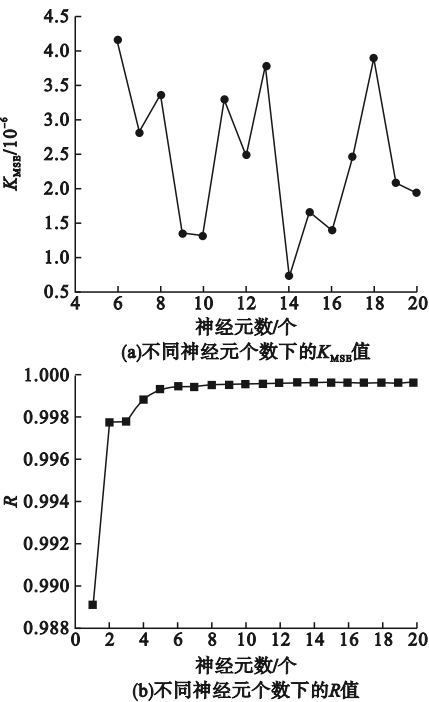


图 6 不同神经元个数下的 K_{MSE} 值和 R 值

Fig. 6 K_{MSE} and R values under different number of neurons

(6)神经元个数为 1~5 的 K_{MSE} 值较大,便不予以绘出。由图 6 可知,隐含层为 14 个神经元的模型具有最小的 K_{MSE} 值与最大 R 值,即具备最佳性能。因此,ANN 模型采用 6-14-1 结构(见图 7)。

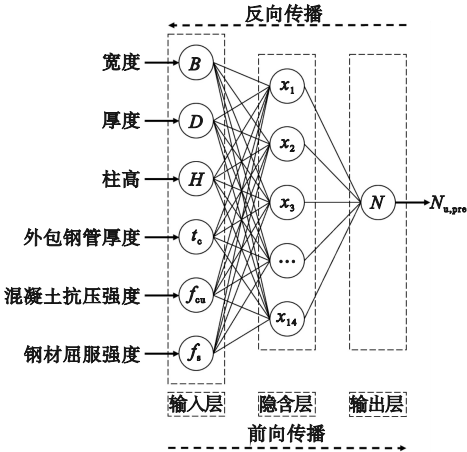


图 7 ANN 模型结构

Fig. 7 ANN model structure

3.2 ANN 模型的性能

训练完成后 ANN 模型的性能如图 8 所示。可以看出,训练集、测试集和验证集的 K_{MSE} 值均呈现出下降趋势,由最大值标志训练的开始,并结束于较小值,模型在第 413 次迭代取得了最佳训练效果, K_{MSE} 值为 $7.373\,4 \times 10^{-7}$ 。

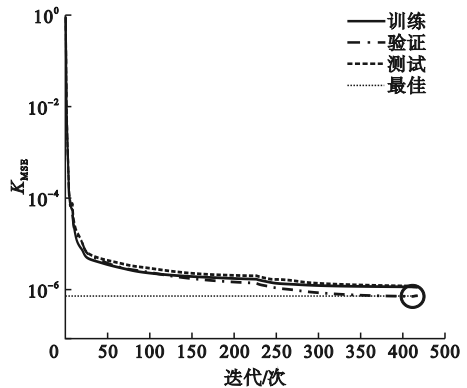


图 8 ANN 模型的性能

Fig. 8 The performance of ANN model

图 9 为训练集、测试集、验证集和数据总集的误差直方图,大部分数据的误差都接近于 0,训练效果良好。图 10 为三个数据集和

数据总集的回归图,其 R 值分别是0.999 63, 0.999 62,0.999 62,0.999 63。显然,模型输出值与试验数据集具有强相关性,提出的ANN模型在预测 RECFST 短柱轴压承载力上表现出较高的精确性。

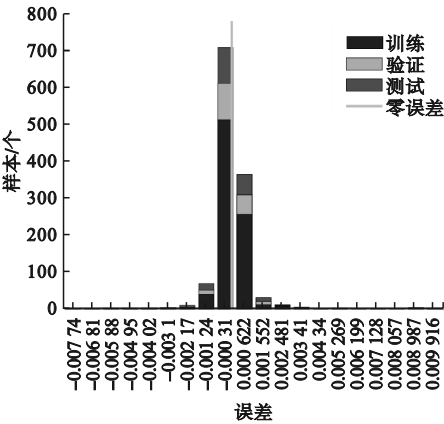


图9 ANN模型的误差直方图

Fig. 9 Error histogram of ANN model

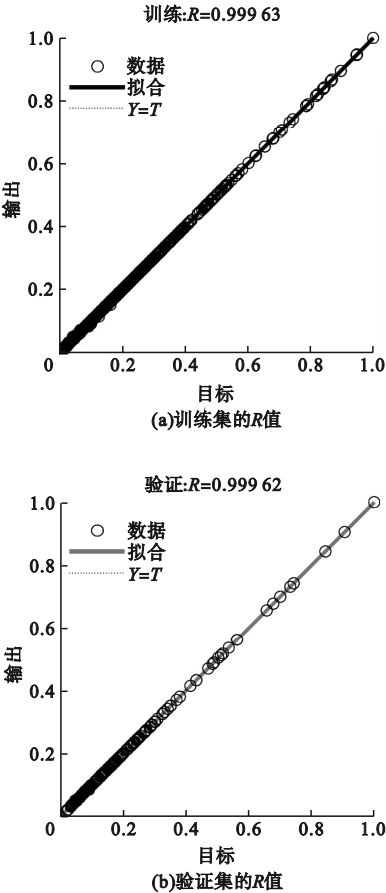


图10 ANN模型的 R 值

Fig. 10 The R value of ANN model

3.3 结果与分析

将ANN模型预测值与试验结果、美国混凝土协会规范(ACI 318-11)^[21]、欧洲规范(Eurocode 4)^[22]、中国标准(GB50936-2014)^[23]和文献[6]公式计算结果进行对比,如图11所示。各模型预测值与试验结果之比的平均值分别为 $N_{ACI}/N_u = 0.78$ 、 $N_{Euro}/N_u = 0.82$ 、 $N_{GB,R}/N_u = 0.84$ 、 $N_{GB,C}/N_u = 0.85$ 、 $N_{GS}/N_u = 0.88$ 、 $N_{ANN}/N_u = 0.98$ 。结果表明,文献[6]公式仅对一定范围内的输入参数具有较好的预测效果,现行相关设计规范对于预测 RECFST 短柱轴压承载力的适用性较差,各规范的预测值皆偏于保守。文献[6]公式相比于ACI 318—11、Eurocode 4和GB50936—2014,在预测准确性和离散程度上表现较好。ANN模型的预测效果高于各规范和文献[6]公式。

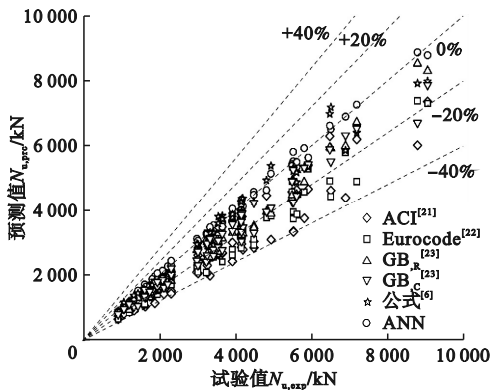


图 11 ANN 模型与相关规范和文献[6]的比较

Fig. 11 Comparison of ANN model with relevant specifications and formulas [6]

4 基于 ANN 模型的 GUI 工具

笔者基于 ANN 模型在 Matlab 中开发 GUI 工具。对设计参数进行初步确定和后期复核,拓展 ANN 预测模型的使用场景。操作者只需依照图示输入 RECFST 短柱的截面宽度、截面厚度、钢管厚度、短柱高度、混凝土立方体抗压强度和钢材屈服强度,然后点击“开始预测”,便可对 RECFST 短柱的轴压承载力实现精准预测(见图 12),方便技术人员使用。

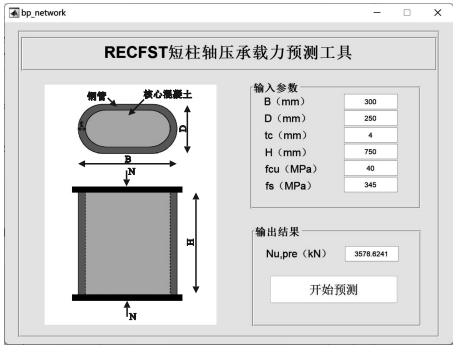


图 12 RECFST 短柱轴压承载力预测工具

Fig. 12 RECFST short column axial compression bearing capacity prediction tool

5 结 论

(1)笔者提出有限元模型的极限轴压荷载与试验结果的比值 $N_{u,FE}/N_{u,exp}$ 依次为 1.04、0.99、0.95、1.03,表明有限元模型可准

确预测 RECFST 短柱的轴压承载力。

(2)利用试验数据集与仿真数据集相结合的新方法训练 ANN 模型具有较高的精确性,预测值与试验结果之比的平均值 $N_{ANN}/N_u=0.98$,小于相关规范比值和文献结果的比值,极大地提高了模型的预测精度和泛化能力,并且预测结果的离散度更小,具有更广的适用范围。

(3)基于 ANN 模型开发的 GUI 工具,操作简便,适合工程应用。

参考文献

[1] 李培鹏,任志刚.圆端形钢管混凝土短柱轴压性能仿真分析[J].武汉理工大学学报,2014,36(9):96-101.
(LI Peipeng,REN Zhigang.Simulation analysis of round-ended rectangular CFST stub columns under axial load [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2014, 36 (9) : 96 - 101.)

[2] 任志刚,徐圣海,李培鹏,等.圆端形钢管混凝土偏压柱截面优化研究[J].建筑科学与工程学报,2021,38(4):1-12.
(REN Zhigang, XU Shenghai, LI Peipeng, et al. Sectional optimization of round-ended rectangular concrete-filled steel tubular columns under eccentric compression [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2021, 38 (4) : 1 - 12.)

[3] 王志滨,郑一波,赖志超,等.圆端形截面钢管混凝土柱抗震性能研究[J].建筑结构学报,2023,44(5):183-194.
(WANG Zhibin,ZHENG Yibo,LAI Zhichao, et al. Seismic behaviour of round-ended concrete-filled steel tubular columns [J]. Journal of building structures, 2023, 44 (5) : 183 - 194.)

[4] 侯超,周晓光.基于机器学习的矩形钢管混凝土柱偏压承载力预测[J].建筑结构学报,2022,43(增刊1):155-166.
(HOU Chao,ZHOU Xiaoguang.Eccentric compression capacity prediction of rectangular CFST columns based on machine learning [J]. Journal of building structures, 2022, 43 (S1) : 155 - 166.)

[5] DING F X, FU L, YU Z, et al. Mechanical performances of concrete-filled steel tubular stub columns with round ends under axial loading [J]. Thin-walled structure, 2015, 97: 22-34.

[6] 任志刚,刘闯,王丹丹,等.圆端形钢管混凝土短柱极限承载力计算方法研究[J].建筑结构,2021,51(7):38-45.
(REN Zhigang, LIU Chuang, WANG Dandan,

- et al. Study on calculating method of ultimate bearing capacity of round-ended concrete filled steel tube short columns [J]. Building structure, 2021, 51(7): 38–45.)
- [7] 谷利雄, 丁发兴, 付磊, 等. 圆端形钢管混凝土轴压短柱受力性能研究[J]. 中国公路学报, 2014, 27(1): 57–63.
(GU Lixiong, DING Faxing, FU Lei, et al. Mechanical behavior of concrete-filled round-ended steel tubular stub columns under axial load [J]. China journal of highway and transport, 2014, 27(1): 57–63.)
- [8] AHMED M, LIANG Q Q. Numerical analysis of thin-walled round-ended concrete-filled steel tubular short columns including local buckling effects [C]//Structures. [S. l.]: Elsevier, 2020: 181–196.
- [9] 卜良桃, 洪俊鹏. 基于 SSA-BP 神经网络的圆钢管 RPC 短柱轴压承载力预测[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023, 39(4): 587–595.
(BU Liangtao, HONG Junpeng. Axial compression bearing capacity prediction of RPC filled circular steel tube stub columns based on SSA-BP neural network [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2023, 39(4): 587–595.)
- [10] 陆征然, 赵婉东, 郭超. 基于 BP 神经网络的缺陷 CFST 短柱承载力预测[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(4): 702–708.
(LU Zhengran, ZHAO Wandong, GUO Chao. Bearing capacity prediction of defective CFST short columns based on BP neural network [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(4): 702–708.)
- [11] HOŁA A, SADOWSKI Ł. A method of the neural identification of the moisture content in brick walls of historic buildings on the basis of non-destructive tests [J]. Automation in construction, 2019, 106: 102850.
- [12] 王志滨, 陈靖, 谢恩普, 等. 圆端形钢管混凝土柱轴压性能研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(7): 123–130.
(WANG Zhibin, CHEN Jing, XIE Enpu, et al. Behavior of concrete-filled round-end steel tubular stub columns under axial compression [J]. Journal of building structures, 2014, 35(7): 123–130.)
- [13] 王丹丹. 圆端形钢管混凝土构件轴压性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
(WANG Dandan. Behavior study on compressive behavior of concrete-filled round-ended steel tubular stub columns [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.)
- [14] HASSANEIN M F, PATEL V I. Round-ended rectangular concrete-filled steel tubular short columns: FE investigation under axial compression [J]. Journal of constructional steel research, 2018, 140: 222–236.
- [15] WANG J, SHEN Q. Numerical analysis and design of thin-walled RECFST stub columns under axial compression [J]. Thin-walled structures, 2018, 129: 166–182.
- [16] REN Z, WANG D, LI P. Axial compressive behaviour and confinement effect of round-ended rectangular CFST with different central angles [J]. Composite structures, 2022, 285: 115193.
- [17] LU D, WANG W, DING F, et al. The impact of stirrups on the composite action of concrete-filled steel tubular stub columns under axial loading [C]//Structures. [S. l.]: Elsevier, 2021: 786–802.
- [18] 刘闯. 带约束拉杆圆端形钢管混凝土短柱轴压性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
(LIU Chuang. Axial compression behavior of round-ended concrete filled steel tubular short columns with binding bars [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021.)
- [19] 马高, 刘康. 基于 BP 神经网络 CFRP 约束混凝土抗压强度预测[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(9): 88–97.
(MA Gao, LIU Kang. Prediction of compressive strength of CFRP-confined concrete columns based on BP neural network [J]. Journal of Hu'nan university (natural sciences), 2021, 48(9): 88–97.)
- [20] TRAN V L, THAI D K, KIM S E. Application of ANN in predicting ACC of SCFST column [J]. Composite structures, 2019, 228: 111332.
- [21] American Concrete Institute. Building code requirements for reinforced concrete: ACI 318—11 [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2011.
- [22] European Committee for Standardization. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures-part1-1: general rules and rules for buildings; BS EN 1994–1–1: 2004 [S]. London: British Standards Institution, 2004.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢管混凝土结构技术规范; GB 50936—2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
(Ministry Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for concrete filled steel tubular structures; GB 50936—2014 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014.)
(责任编辑: 王国业 英文审校: 刘永军)