

RC柱受剪承载力神经网络预测模型及其可解释性*

常旭¹, 马财龙^{1,2,3†}, 肖旭峰¹, 鲁成凤²

(1. 新疆大学 数学与系统科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017;
3. 新疆大学 新疆建筑结构与抗震重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 针对钢筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)柱的受剪承载力传统预测模型精度提升及已有试验数据的挖掘利用, 基于机器学习方法和可解释性SHAP方法, 建立人工神经网络模型对RC柱的受剪承载力进行预测. 基于受剪理论, 确定了纵筋配筋率 ρ_l 、纵筋屈服强度 f_{yl} 、面积配箍率 ρ_{sv} 等9个输入特征并对其相关性进行验证. 利用收集整理的441组RC柱受剪试验数据, 将所建神经网络模型与5种机器学习模型、5种传统半经验半理论公式进行比较, 发现所建神经网络模型具有更好的泛化性和鲁棒性, 其预测结果更加精准(在训练集和测试集上的 R^2 分别达到0.99和0.92). 然后, 采用SHAP方法对神经网络模型进行全局与局部可解释性分析. 结果表明: 截面宽度 b 、轴压力 N 、剪跨比 λ 、有效截面高度 h_0 、轴心抗拉强度 f_t 等特征对RC柱的受剪性能具有显著影响, SHAP方法对未知样例的预测结果同样给出了具有一定可信度的分析结果. 综上, 此数据与机理协同驱动的神经网络模型和SHAP可解释性方法可用于RC柱受剪承载力及类似问题的预测.

关键词: 结构工程; 钢筋混凝土柱; 受剪承载力; 神经网络; 可解释性; SHAP

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2023.11.04.0001

中图分类号: TP181; TU375 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2025)01-0114-015

引文格式: 常旭, 马财龙, 肖旭峰, 鲁成凤. RC柱受剪承载力神经网络预测模型及其可解释性[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2025, 42(1): 114-128.

英文引文格式: CHANG Xu, MA Cailong, XIAO Xufeng, LU Chengfeng. Neural network prediction model for shear bearing capacity of RC columns and its interpretability[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2025, 42(1): 114-128.

Neural Network Prediction Model for Shear Bearing Capacity of RC Columns and Its Interpretability

CHANG Xu¹, MA Cailong^{1,2,3}, XIAO Xufeng¹, LU Chengfeng²

(1. School of Mathematics and System Sciences, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Building Structure and Seismic Resistance, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China)

Abstract: The accuracy of traditional prediction models for the shear bearing capacity of reinforced concrete(RC) columns is improved and existing experimental data is mined and utilized. Based on machine learning methods and the interpretable SHAP method, an artificial neural network model is established to predict the shear bearing capacity of reinforced concrete columns. Firstly, based on shear theory, 9 input features including longitudinal reinforcement ratio ρ_l , longitudinal reinforcement yield strength f_{yl} , and area shear reinforcement ratio ρ_{sv} are determined and their correlations are verified. With 441 sets of collected and organized experimental data on shear tests of reinforced concrete columns, the neural network model is compared with 5 machine learning models and 5 traditional semi-empirical and semi-theoretical formulas. The prediction results show that the neural network model established in this paper has better generalization and robustness, and its prediction results are more accurate(with

* 收稿日期: 2023-11-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“硫酸盐-氯盐耦合作用下钢筋混凝土柱侵蚀机理与抗力退化模型”(52478215); 天山英才-青年拔尖人才项目“复杂服役环境下RC构件受剪问题及设计方法研究”(2023TSYCCX0110); 新疆维吾尔自治区优秀博士后特别资助项目“基于数据与机理协同驱动的RC节点受剪性能预测与分析方法”(10062301001).

作者简介: 常旭(1998—), 男, 硕士生, 从事混凝土受剪性能的研究, E-mail: 107552103318@stu.xju.edu.cn.

† 通讯作者: 马财龙(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事混凝土结构性能演化与控制的研究, E-mail: macailong@xju.edu.cn.

R^2 reaching 0.99 and 0.92 on the training set and test set, respectively). In addition, the SHAP method is used to analyze the interpretability of the neural network model. The analysis results show that features such as section width b , axial compression force N , shear span ratio λ , effective section height h_0 , and axial tensile strength f_t have significant influences on the shear performance of reinforced concrete columns. Moreover, the SHAP method also provides reasonably reliable analysis results for unknown samples. The study demonstrates that the data-driven and mechanism-driven neural network model and the SHAP interpretability method proposed in this paper can be applied to similar prediction problems of shear bearing capacity of reinforced concrete columns.

Key words: structural engineering; reinforced concrete columns; shear bearing capacity; neural network; interpretability; SHAP

0 引言

目前,已存在大量的钢筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)柱受剪承载力预测模型,绝大多数是依据受剪机理构建的机理驱动模型,即结合受剪机理和参数拟合方式得到的半经验半理论模型^[1-8]。然而,由于RC柱的受剪机理复杂、影响因素繁多,无法从演绎推导得到,受剪理论发展也是以受剪性能试验为基石^[1-4]。以上原因导致众多传统预测模型形式不一,且依托不同数据库时各模型及同一模型的计算结果差异性可能较大。同时,部分传统模型计算繁琐,如基于修正压力场的模型^[5-6]、桁架-拱的模型^[7]等。另一方面,由于RC柱的受剪承载力与各影响因素之间存在高度的非线性,导致传统模型的预测结果并不理想^[4]。因此,如何获得计算简便、结果精确的RC柱受剪承载力预测模型,是本文的研究重点。

近年来,随着机器学习方法的兴起,一系列复杂的非线性拟合问题有了新的解决方案。建筑工程学界,机器学习方法已被广泛应用于结构的分析设计、损伤评估等方面,在钢筋混凝土构件的受剪性能领域也有许多成功的应用^[9-26]。Lee等^[9]建立人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)模型对纤维增强聚合物(Fiber Reinforced Polymer, FRP)混凝土受弯梁的受剪承载力进行预测。Chun等^[10]使用ANN模型测定腐蚀钢板的抗拉强度。Bashir等^[11]使用ANN模型对138个FRP加固混凝土构件的受剪承载力进行建模预测,并以此评估了3种现有的剪切设计方案的优劣,发现ANN模型具有较高的预测精度。Wang等^[12]建立XGDT和XGBoost模型对RC梁的受剪模式作出判断并使用SHAP给出一定的可解释性分析,表明其在类似的RC构件问题上具有良好的预测表现。Mansour等^[13]利用ANN模型预测了RC梁的极限抗剪强度。Abuodeh等^[14]建立弹性反向传播神经网络以预测FRP加固钢筋混凝土梁的抗剪强度。虽然众多学者的工作已经在RC构件受剪性能预测方面取得了令人满意的效果,但绝大多数研究并未就模型的可解释性给出一定的讨论,这使得机器学习模型在实际应用中受到很大的制约。

综上,本文旨在使用数据与机理协同驱动的思路及方法对RC柱的受剪承载力进行精确预测,并给出可解释性分析。梗概如下:第1节介绍研究思路及数据库。第2节建立RC柱受剪承载力的机器学习模型,选择6种机器学习模型,并与5种传统半经验半理论公式对比,得出最优预测模型。第3节使用SHAP方法对第2节的最优模型从全局层面和个体样例(局部)两个方面给出预测结果的解释性分析。

1 研究思路与数据库介绍

1.1 研究思路

本文主要工作是RC柱的受剪承载力机器学习预测。研究思路如图1所示,具体如下:1)依据RC柱受剪机理确定机器学习模型的输入参数。2)收集并建立RC柱的受剪数据库,保证数据库包含所有输入参数,且足够精细。3)基于选取的机器学习方法、RC柱受剪机理及所建试验数据库,建立数据与机理协同驱动的RC柱受剪承载力机器学习预测模型。将数据库中70%的数据作为训练集对模型进行训练,剩余30%的数据作为测试集对模型效果进行评估,得到效果最优的机器学习模型。4)将此模型与5种传统的RC柱受剪承载力公式的预测结果进行比较讨论,检验其预测效果优劣。5)基于可解释性方法进一步揭示在机器学习模型中输入特征如何对RC柱受剪承载力产生影响并得到最终的预测结果,以增加工程师对此类数据与机理协同驱动模型的信任度。

1.2 输入特征确定及试验数据库

本文采用机器学习方法构建预测模型,特征选择工程是其中一项十分重要的工作。结合RC柱受剪机理确定输入特征,是实现数据驱动型向数据与机理协同驱动型转变的关键。基于已有的受剪理论^[27-29],从抗剪贡献来源角度入手,即混凝土项、箍筋项、轴力有利作用及柱纵筋有利作用,综合考虑了几何尺寸、材料用量、材料

特性、轴向荷载等,初步选取纵筋配筋率 ρ_l 、纵筋屈服强度 f_{yl} 、面积配箍率 ρ_{sv} 、箍筋屈服强度 f_{yt} 、轴心抗拉强度 f_t 、截面宽度 b 、有效截面高度 h_0 、剪跨比 λ 、轴压力 N 共9个特征作为模型的输入特征,取试验中测得的剪力峰值 V_{exp} 作为RC柱的实际受剪承载力,并将其作为模型的输出特征。

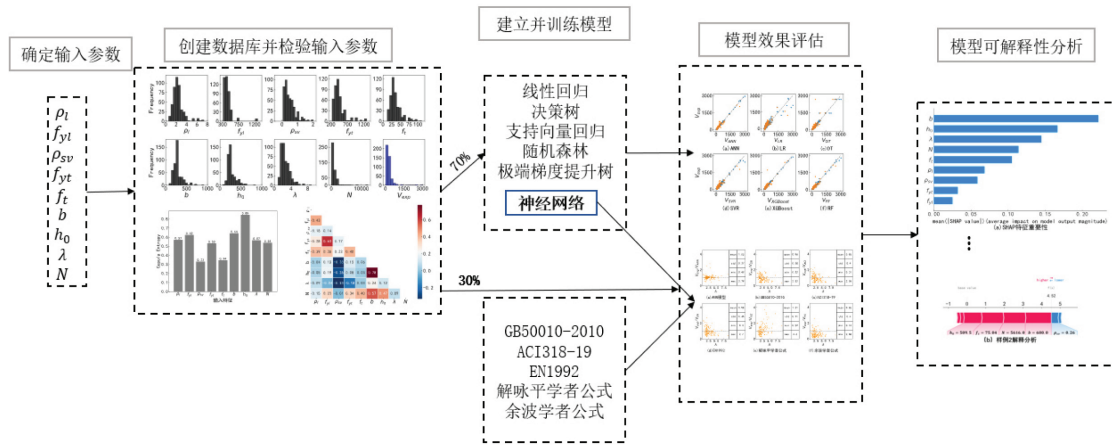


图 1 研究流程

本文建立了包含441组样例的RC柱受剪试验数据库,数据来源于66篇^[30-95]已发表文献.选取的特征概况如表1所示,并在图2给出了各特征的具体分布.由图2可知,该数据库中各特征的分布范围广、跨度区间大、包含种类多,是较具有代表性的.为保证所建模型的有效性,保留全部441组样例对模型进行训练和测试评估。

表 1 特征统计

特征参数	最小值	最大值	均值	标准差
$\rho_l/\%$	0.56	7.33	2.36	1.03
f_{yl}/MPa	318	1 286	444.51	138.98
$\rho_{sv}/\%$	0.06	2.01	0.49	0.35
f_{yt}/MPa	235	1 286	455.90	189.40
f_t/MPa	12.39	111.37	35.68	16.08
b/mm	80	914.4	284.22	113.94
h_0/mm	63	854.4	272.42	106.90
λ	0.86	8.90	2.65	1.17
$N/(\text{N/kN})$	0	12 226	944.04	1 369.57
$V_{exp}/(\text{N/kN})$	23	3 039	304.94	370.99

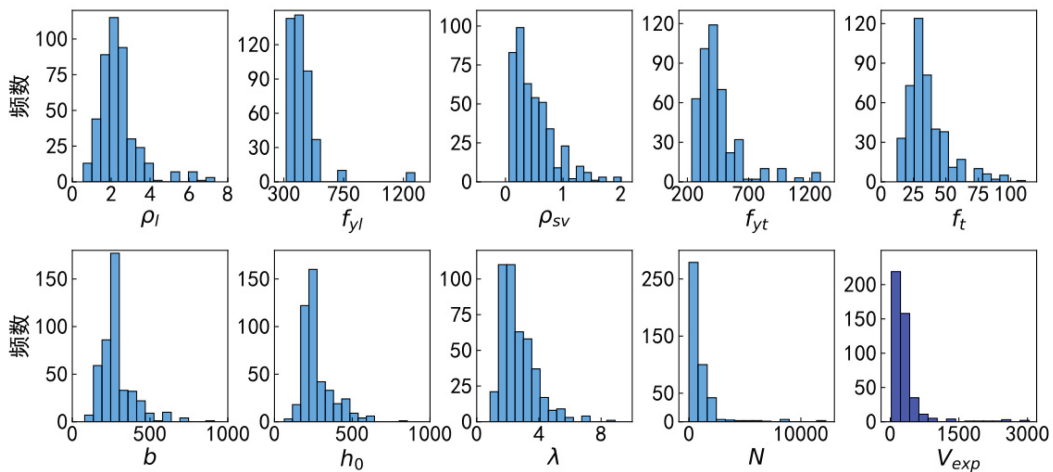


图 2 特征频数分布

在此基础上,本文使用皮尔逊相关系数(Pearson Correlation Coefficient, PCCs)和关联熵(Copula Entropy, CE)^[95]衡量所选特征之间的相关性.图3是输入特征间的PCCs热力图.由图3可知,截面宽度 b 和有效截面高度 h_0 之间具有较高的相关性,达到了0.78.此外,箍筋屈服强度 f_{yt} 和纵筋屈服强度 f_{yl} 之间、截面宽度 b 和轴压力 N 之间的相关系数也超过了0.5,说明它们彼此之间也存在着一定的相关性,而其余输入特征之间的相关性较弱.这说明,RC柱的受剪承载力不仅受到多种单个因素的影响,还存在更加复杂的多因素交互影响.图4给出了各输入特征与输出特征剪力峰值 V_{exp} 之间的CE值.CE方法是Ma等^[96]基于Copula理论提出的一种统计独立性的度量方法.相较传统的相关性度量方法,CE可以更好反映变量间的非线性关系.由于RC柱的受剪承载力与各影响因素之间具有较高的非线性特点,因此,选用CE方法衡量各影响因素对RC柱受剪承载力的影响是十分合理的.由图4可知,输入特征和剪力峰值 V_{exp} 之间的CE值均较大.其中:有效截面高度 h_0 、截面宽度 b 与剪力峰值 V_{exp} 之间的CE值最高,分别为0.85和0.64;最低的两项为面积配箍率 ρ_{sv} 和轴心抗拉强度 f_t ,分别达到了0.33和0.34.考虑到传统剪切理论和传统模型中所使用的影响因素,将所选9个特征全部作为输入参数加入到模型中是合理的.

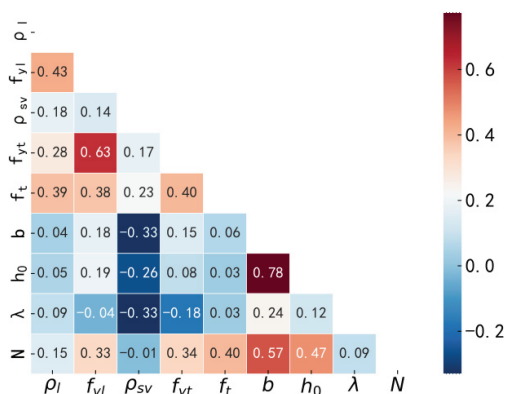


图3 输入特征间的皮尔逊相关系数

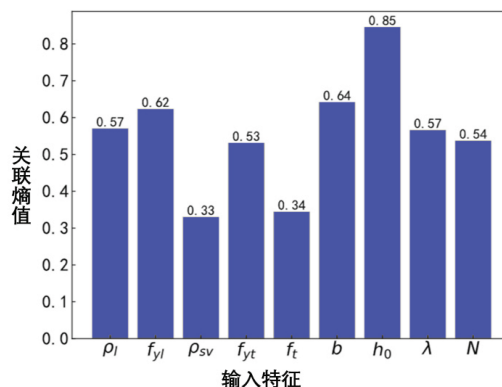


图4 输入特征与输出特征间的关联熵值

2 模型构建与预测效果分析

2.1 模型选择与评价指标

本文致力于构建RC柱受剪承载力的预测模型,属于监督学习中的回归任务.本节选择了6种具有代表性的机器学习模型^[97]对RC柱受剪承载力进行预测,并对它们的预测性能进行公平公正的比较和评估.本文选择的6种机器学习模型是:ANN、线性回归(Linear Regression, LR)、决策树(Decision Tree, DT)、支持向量回归(Support Vector Regression, SVR)、XGBoost、随机森林(Random Forest, RF).ANN模型通过大量神经元的并行互联形成复杂的网络结构,并通过并行神经元间的非线性映射来逼近复杂函数,本文通过粒子群算法对所建ANN模型进行优化,得到含3个隐藏层的全连接神经网络,其中隐藏层神经元数量分别为62、100、62.LR模型、DT模型、SVR模型都是机器学习中的经典模型,以往经验证明^[17],它们均能很好地完成回归任务;而RF模型和XGBoost模型都是基于集成思想的机器学习方法,两者通过联合多个弱学习器组成一个强学习器来作出更合理、准确的判断.基于上述6种机器学习算法,本文针对RC柱的受剪承载力问题构建了新颖且合理的预测模型,并通过逻辑严谨且充足的试验评估了所提方法的预测效果.

为消除数据量纲的影响、缩减训练时间以及获得更好的预测效果,开始训练前,对数据进行归一化处理.使用标准差标准化方法将RC柱的各特征进行归一化:

$$x^* = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

式中: x^* 为原始数据 x 标准化后的特征数据, μ 和 σ 分别为该组特征的均值和标准差.数据预处理完成后,选定0作为随机种子将数据集随机划分成训练集和测试集.其中,70%的数据作为训练集训练模型,30%的数据作为测试集评估模型效果.

本文选取了3个评价指标^[98]对模型的回归拟合效果进行衡量,如表2所示.其中: y_i 为真实样本标签, \hat{y}_i 为模型预测, n 为样本量, \bar{y} 为样本均值.对任意模型来说, RMSE、MAE值越小,则说明模型在总体数据上的预测误差越小,模型效果越好;而 R^2 的取值范围为0到1, R^2 越接近1,说明模型拟合效果越好,反之效果越差.

2.2 机器学习模型预测效果评估

本文所建6种机器学习模型的预测效果评估如表3所示.由表3可知,ANN模型在训练集和测试集上的拟合优度 R^2 分别为0.99和0.92,其RMSE和MAE值均为最小,故ANN模型在RC柱受剪试验数据库上具有最优的学习效果和泛化效果;而DT模型在训练集上的拟合优度 R^2 达到了0.96,但在测试集上的拟合优度 R^2 仅为0.49,下降十分明显,说明DT模型可能存在严重的过拟合问题;SVR和RF模型的预测效果不相上下,在训练集和测试集上均有较好的表现;XGBoost模型在测试集上泛化效果不佳,暗示其可能同样存在一定的过拟合现象;LR模型是基于传统线性模型的机器学习方法,在训练集和测试集上的表现也较差,这可能与该问题高度的非线性有关.从3个评价指标在训练集和测试集上的评估结果来看,ANN模型在6种机器学习模型中具有最优的预测效果.

表 2 回归评价指标

评价指标	计算公式
均方根误差 (RMSE)	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$
平均绝对误差 (MAE)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ y_i - \hat{y}_i }{ y_i }$
拟合优度 (R^2)	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$

表 3 机器学习方法性能评估

模型	训练集			测试集		
	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE	R^2
ANN	0.04	0.02	0.99	0.28	0.11	0.92
LR	0.36	0.22	0.88	0.48	0.28	0.69
DT	0.18	0.07	0.96	0.62	0.20	0.49
SVR	0.19	0.12	0.97	0.28	0.16	0.90
XGBoost	0.07	0.05	0.99	0.38	0.15	0.83
RF	0.12	0.06	0.98	0.28	1.38	0.90

为更加直观地比较机器学习模型的预测效果,图5给出了机器学习模型的预测效果.纵坐标为试验得出的真实剪力峰值 V_{exp} ,横坐标为相应的机器学习模型受剪承载力预测值;蓝色圆点为训练集样本,橙色圆点为测试集样本.由图5可知,数据库中绝大部分的RC柱受剪承载力处在0~1 000 kN区间,极少数的RC柱受剪承载力大于1 000 kN. ANN模型、SVR模型、XGBoost模型、RF模型在两种区间上的拟合效果均较好,而LR模型、DT模型在极少数受剪承载力较大的样本上预测效果不够理想.相较而言,ANN模型在测试集上的表现十分出色.总体来说,ANN模型在多种情况下预测效果优于其它5种模型,故本文选用ANN模型作为RC柱受剪承载力预测问题的最优机器学习模型进行下文的讨论分析.

为检验上述所建ANN模型在实际应用中的预测效果,本文选取了5种传统的半经验半理论公式与之对比,包括3个国家规范和2个学者公式,计算方法如表4所示.

图6给出了ANN模型及上述5种传统公式在测试集上的预测情况.横坐标为测试集数据的剪跨比 λ 值,纵坐标分别为真实剪力峰值 V_{exp} 与6种模型预测值的比值,即 V_{exp}/V_{ANN} 、 V_{exp}/V_{GB} 、 V_{exp}/V_{ACI} 、 V_{exp}/V_{EN} 、 V_{exp}/V_{XIE} 、 V_{exp}/V_{YU} .由图6可知,相比其它5种传统模型,ANN模型的 V_{exp}/V_{ANN} 比值散点分布更加紧密,大部分在 $y=1$ 附近,而其它5种传统公式的比值散点分布较为松散.总的来说,5种传统预测公式中,3种国家规范的RC柱受剪承载力计算公式预测效果相差不大;而解咏平学者公式^[17]预测比值的分布更加松散,说明其稳健性不强;余波学者公式^[4]预测比值大部分位于 $y=1$ 基准线的下部,说明其可能存在高估RC柱受剪承载力的情况.从预测比值结果的定量分析来看,ANN模型在RC柱的受剪承载力预测问题上仍优于传统模型,其预测比值的均值和标准差分别为1.05和0.27,最大值和最小值分别为2.79和0.49.相比传统模型,ANN模型的预测精度有所提升,更重要的是,其预测比值标准差大幅下降,说明ANN模型更加稳健.

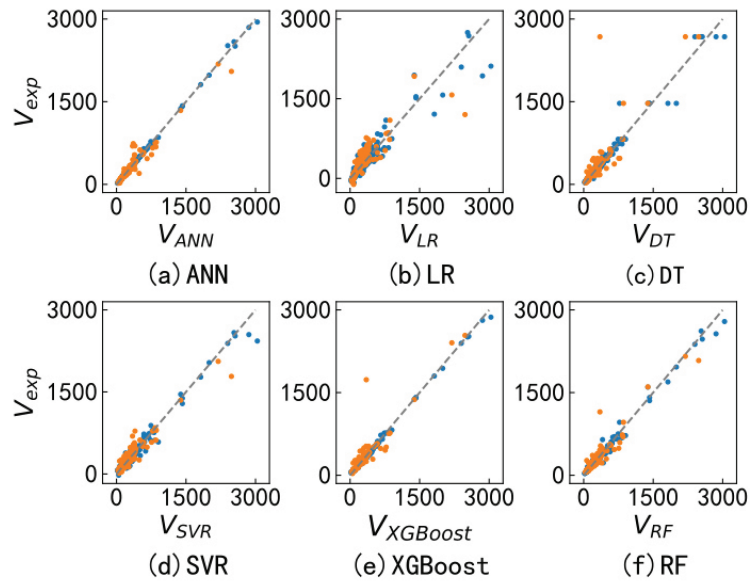


图5 机器学习模型预测效果

表4 半经验半理论公式

来源	RC柱受剪承载力计算公式
GB 50010—2010 ^[1]	$V_{GB} = \frac{1.75}{\lambda+1} f_t b h_0 + f_{yt} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.07N$
	$V_{ACI} = V_C + V_S$
ACI 318—19 ^[2]	$V_C = (0.17\alpha\sqrt{f_c} + \frac{N}{6A_g})bh_0, A_{sv} \geq A_{sv,min}$ $V_C = (0.66\lambda_s\alpha\sqrt{\rho_w}\sqrt{f_c} + \frac{N}{6A_g})bh_0, A_{sv} < A_{sv,min}$ $A_{sv,min} = \max(0.062\sqrt{f_c} \frac{bs}{f_{yt}}, 0.35 \frac{bs}{f_{yt}})$ $V_S = \frac{A_{sv} f_{yt} h_0}{s}$
EN 1992 ^[3]	$V_{EN} = \min(\frac{A_{sv}}{s} z f_{yt} \cot \theta, \frac{\alpha_{cw} b z v_1 f_c}{\cot \theta + \tan \theta})$
解咏平学者公式 ^[17]	$V_{XIE} = \alpha_h \alpha_{c,g} (1.1 - 0.2\lambda) b h \tan \varphi + 0.9 f_{yt} \frac{A_{sv}}{s} h$ $\alpha_h = \frac{1.5}{\sqrt{1 + \frac{h}{200}}}, h > 250$ $\alpha_h = 1, h \leq 250$ $\alpha_{c,g} = (1.2 - 0.4\lambda) \nu f_c + \frac{N}{bh(1.1 - 0.2\lambda)}$
余波学者公式 ^[4]	$V_{YU} = (0.2bh_0\sqrt{f_c} + 0.21 \frac{A_{sv} f_{yt} h_0}{s})(1 + \eta_1 \eta_2)$ $\eta_1 = -0.84n + 0.56, \eta_2 = 1.71\lambda^{-1.27}$

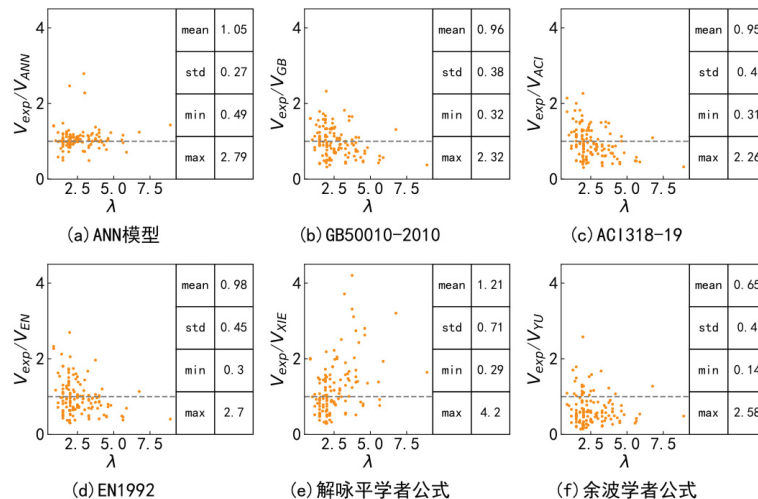


图6 预测比值分布

由以上分析结果可知,本文构建的数据驱动型ANN模型在RC柱受剪承载力的预测上取得了优越的效果.并且由于ANN模型可以自动从数据中寻求特征间的复杂关系,因此面对未知数据时,ANN模型能表现出更好的泛化效果.

3 模型可解释性分析

3.1 SHAP可解释性方法介绍

近年来,随着机器学习的兴起,大量复杂问题有了新的解决方案.神经网络等机器学习方法带来高准确性的同时,也使得预测结果的可解释性直线下降^[99-106].在医药卫生、经济金融以及本文涉及的建筑工程行业,不可解释意味着对上述ANN模型的预测结果很难做到完全相信,这也使得具有优越性能的方法难以推广.针对这些透明度极低的黑盒模型,众多学者从不同角度提出了可解释性方法.本文使用SHAP方法从模型全局和单个实例预测结果两个方面对所建RC柱受剪承载力ANN模型预测结果进行解释性分析.

SHAP方法是Lundberg等^[99]基于博弈论提出的一种线性可加的模型解释方法.SHAP不依赖于模型,具有很高的可移植性,可应用于多种机器学习方法中.SHAP方法使用SHAP值来衡量每个特征对模型的贡献.每个特征的SHAP值是该特征对模型预测的边际贡献.SHAP将模型的预测值解释为每个输入特征的SHAP值之和:

$$g(x') = \phi_0 + \sum_{j=1}^M \phi_j = f(x) \quad (2)$$

式中: $g(x')$ 是对应原始预测模型 $f(x)$ 的SHAP解释模型, x' 是对应原始输入 x 的近似简化映射, ϕ_0 是原始预测模型 $f(\cdot)$ 的预测均值, ϕ_j 是第 j 个特征的SHAP值(对预测模型的贡献值), M 是输入的总特征数.SHAP方法中每个特征的SHAP值是唯一的,可由式(3)计算:

$$\phi_j = \frac{|S|!(M-|S|-1)!}{M!} \sum_{S \subseteq \{x_1, \dots, x_M\} \setminus \{x_j\}} [f_x(S \cup \{x_j\}) - f_x(S)] \quad (3)$$

式中: S 为 $\{x_1, \dots, x_M\} \setminus \{x_j\}$ 的特征子集, $f_x(S)$ 为特征子集 S 的预测.

3.2 全局可解释性

SHAP方法在全局层面使用特征重要性排序和全局SHAP解释汇总图对模型输出结果进行解释性分析,如图7所示.此外,SHAP方法还使用特征依赖图考察了任意两个输入变量之间对输出结果的交互依赖作用,如图8所示.

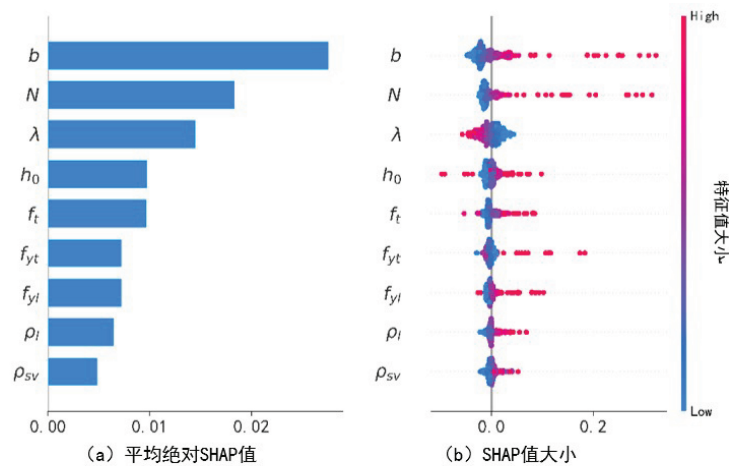


图7 SHAP全局可解释性分析

图7(a)为SHAP方法的特征重要性排序,体现了输入特征对模型预测结果的一般性影响.横坐标为输入特征的SHAP值,是特定输入特征在整个数据集上的绝对SHAP值的平均,纵坐标由上至下为按重要性排列的输入特征.由图7(a)可知,在RC柱受剪承载力的ANN预测模型中,截面宽度 b 、轴压力 N 和剪跨比 λ 具有较大的SHAP值,分别为0.028、0.018、0.015,说明它们对模型的预测结果具有较大的影响;此外,有效截面高度 h_0 和轴心抗拉强度 f_t 紧随其后,它们对模型预测也存在一定的影响,SHAP值均在0.010左右;而箍筋屈服强度 f_{yt} 、纵

筋屈服强度 f_{yt} 、纵筋配筋率 ρ_l 、面积配箍率 ρ_{sv} 的SHAP值较小,从0.005到0.007不等,说明配筋用料和配筋方式中的单独一项对模型预测结果的影响均较小,但综合几项来看,箍筋项和纵筋项对RC柱的受剪承载力还是存在较为明显的影响.图7(b)是全局SHAP解释汇总,不仅可以体现输入特征对模型预测结果的重要性,还可以显现输入特征值对模型预测结果的影响趋势.横坐标为输入特征在单个样本上的SHAP值,纵坐标同样是按重要性排序的输入特征.每个点表示数据集中的样本,样本点的颜色由蓝至红表示在特定输入特征上特征值由小到大.由图7(b)可知,截面宽度 b 、轴压力 N 、轴心抗拉强度 f_t 、箍筋屈服强度 f_{yt} 、纵筋屈服强度 f_{yl} 、纵筋配筋率 ρ_l 、面积配箍率 ρ_{sv} 等都对RC柱的受剪性能显现较为明显的正向影响,这些特征中具有较大的特征值样本都有较大的SHAP值;剪跨比 λ 对模型预测结果的影响趋势与上述特征相反,过大的剪跨比反而使RC柱的受剪承载力变小;而有效截面高度 h_0 对预测结果的影响趋势并不明显,其偏大的特征值既可能拥有正SHAP值、导致RC柱的受剪承载力增强,也可能拥有负SHAP值、导致RC柱的受剪承载力减小.由于RC柱的几何尺寸和其高度和宽度都有关,因此有效截面高度 h_0 的SHAP值受其特征值的影响,可信度需进一步验证.考虑有效截面高度 h_0 的影响时,应综合RC柱几何形状的其他参数来分析.

图8是基于SHAP的特征依赖图,本文只考察了前4个重要性较高的输入参数的特征依赖.图8(a~c)分别是截面宽度 b 、轴压力 N 、有效截面高度 h_0 关于剪跨比 λ 的特征依赖图,图8(d)为剪跨比 λ 关于轴心抗拉强度 f_t 的特征依赖图.横坐标为相应特征的特征值,纵坐标为该特征的SHAP值,每个点代表一个样本,而点的颜色表示该样本在其依赖特征上的特征值大小,颜色由蓝至红表示其依赖特征值由小到大.由图8可知,对于截面宽度 b 、轴压力 N 、有效截面高度 h_0 来说,随着其特征值的增加,相应的特征SHAP值随之增大,RC柱的受剪承载力也随之变大;而对于剪跨比 λ ,总体趋势是其SHAP值随剪跨比 λ 的增加而减小,这同图7(b)所得结论一致.从相应依赖图中还可以观察到与该输入特征具有交互作用的输入特征对该特征SHAP值的影响.由图8(c)可知,当有效截面高度 h_0 大于300时,增大剪跨比 λ 使得 h_0 的SHAP值明显变小,从而使得RC柱的受剪承载力减小;由图8(d)可知,当 λ 小于3时,增大轴心抗拉强度 f_t 使得剪跨比 λ 的SHAP值变大,从而减小模型的预测结果;而当 λ 大于3时,增大轴心抗拉强度 f_t 使得剪跨比 λ 的SHAP值变小,从而使得模型的预测结果增大.这也使得两两特征之间对RC柱受剪性能的交互影响有迹可循.

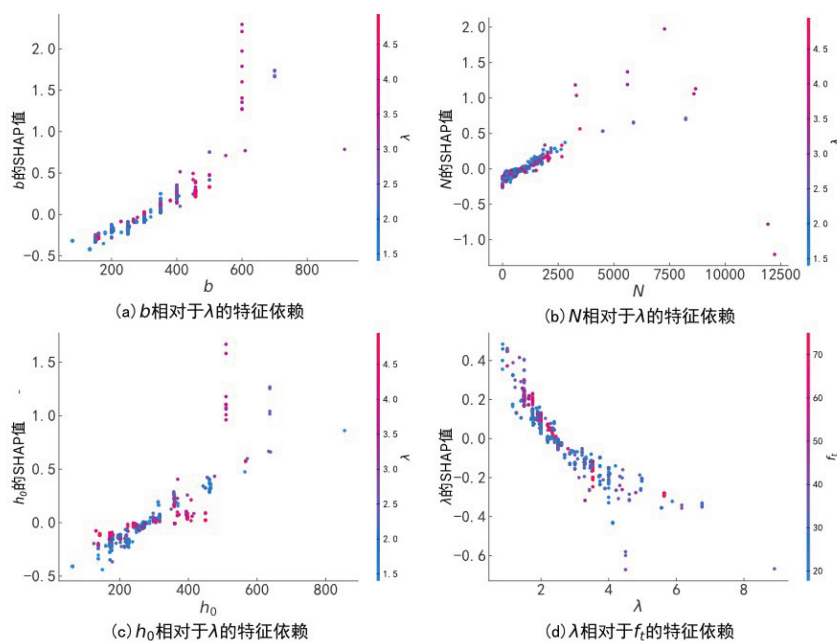


图8 特征依赖图

3.3 单个样例(局部)解释性分析

除对模型全局层次进行解释分析外,SHAP方法还针对单个样例的预测结果给出具体的局部可解释性.本文给出了两个测试集中代表性样例的预测结果及其SHAP解释力图,并对其作了解释性说明.表5是两个代表性样例的参数信息.样例1为参考文献[14]的HSC2样本,样例2为参考文献[64]的B-3.1样本.将表5中数据归一化输

入到ANN预测模型中,可以得到RC柱受剪承载力的预测结果,将结果反归一化后,表示为 V_{ANN} .使用SHAP方法对单个样例的预测结果进行可解释性分析,得到图9所示结果.

表 5 个体样例特征值

样例	ρ_t	f_{yt}	ρ_{sv}	f_{yt}	f_t	b	h_0	λ	N	V_{exp}	V_{ANN}
HSC2 ^[14]	2.36	444	1.00	648	29.20	250	223.50	1.80	547.50	173.57	167.16
B-3.1 ^[64]	3.38	735	0.26	862	75.04	600	509.50	3.53	5 616.00	1 999.00	1 970.33

如图9所示,红色箭头表示该特征对RC柱的受剪承载力产生正向贡献,使得预测值变大;而蓝色箭头表示该特征对RC柱的受剪承载力产生负向贡献,使得预测值变小.基线值是不添加任何输入特征时得到的预测,一般为数据集预测结果的平均值,本文为0.093.不同特征的SHAP值相互抵消,使得预测从基线值逐渐趋向最终结果.样例1和样例2的ANN模型最终预测值 V_{ANN} 分别为167.16和1 970.33,相应的真实剪力峰值 V_{exp} 分别为173.57和1 999.00.对于样例1,截面宽度 b (250)、轴压力 N (547.50)、有效截面高度 h_0 (223.50)等都使得预测值降低,而剪跨比 λ (1.80)是提高预测值的最显著因素.对于样例2,轴压力 N (5 616.00)、截面宽度 b (600)、轴心抗拉强度 f_t (75.04)等是提高预测值的最显著因素,而面积配箍率 ρ_{sv} (0.26)使得预测值降低.结合图2的特征分布情况和图7(b)的全局SHAP解释汇总,上述针对单个样例的预测解释是合理的.

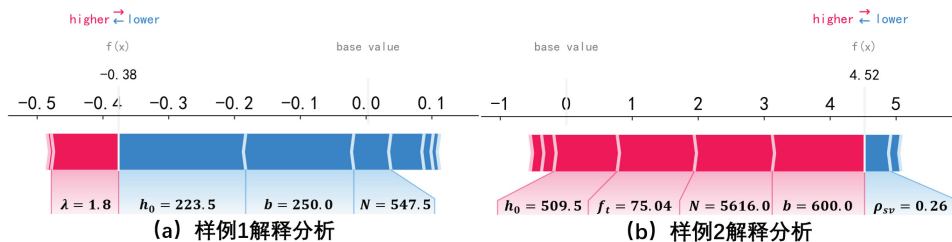


图 9 SHAP个体样例(局部)可解释性分析

4 结论与展望

本文按照数据与机理协同驱动的研究思路,依据RC柱受剪机理、数据驱动为主的机器学习方法及所建RC柱试验数据库,建立了数据与机理协同驱动的RC柱受剪承载力机器学习预测模型,并基于SHAP方法对模型结果作了解释性分析,主要得到以下结论.

1) 依据RC柱受剪机理,从抗剪贡献来源角度入手,即混凝土项、箍筋项、轴力有利作用及柱纵筋有利作用,综合考虑了几何尺寸、材料用量、材料特性、轴向荷载等,初步选取纵筋配筋率 ρ_t 、纵筋屈服强度 f_{yt} 、面积配箍率 ρ_{sv} 、箍筋屈服强度 f_{yt} 、轴心抗拉强度 f_t 、截面宽度 b 、有效截面高度 h_0 、剪跨比 λ 、轴压力 N ,共计9个特征作为模型的输入特征.

2) 建立了6种机器学习的RC柱受剪承载力预测模型,其中ANN模型在训练集和测试集上拥有最小的RMSE和MAE,并且 R^2 分别高达0.99和0.92,说明ANN模型在RC柱受剪数据库上具有很好的学习和预测效果.其预测效果也明显优于5个半经验半理论公式.

3) 针对所提ANN模型存在不透明的黑盒特性问题,采用SHAP方法对ANN预测模型进行了可解释性研究.结果表明:截面宽度 b 、轴压力 N 、剪跨比 λ 、有效截面高度 h_0 和轴心抗拉强度 f_t 等参数对RC柱的受剪性能具有显著的影响.基于本文受剪数据库,给定未知样例,SHAP方法能给出具有一定可信度的预测结果解释性分析,使得ANN模型的可信度大幅提升,进而在实际应用中给出令人信服的建议.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [2] American Concrete Institute. Commentary on building code requirements for structural concrete(ACI 318R—19)[S]. Michigan: ACI Committee 318, 2019.

- [3] Eurocode 2: Design of concrete structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings(Foreign Standard): ONORM EN 1992-1-1: 2005[S]. Austrian Standards Institute [on], 2005.
- [4] 余波,陈冰,吴然立. 剪切型钢筋混凝土柱抗剪承载力计算的概率模型[J]. 工程力学, 2017, 34(7): 136-145.
YU B, CHEN B, WU R L. Probabilistic model for shear strength of shear-critical reinforced concrete columns[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(7): 136-145. (in Chinese)
- [5] VECCHIO F J, COLLINS M P. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear[J]. ACI Journal Proceedings, 1986, 83(2): 219-231.
- [6] VECCHIO F J, COLLINS M P. Predicting the response of reinforced concrete beams subjected to shear using the modified compression field theory[J]. ACI Structural Journal, 1988, 85(3): 258-268.
- [7] RITTER W. Die bauweise hennebique(hennebiques construction method)[J]. Schweizerische Bauzeitung, 1899, 33(7): 59-61.
- [8] OMRAN B A, CHEN Q, JIN R Y. Comparison of data mining techniques for predicting compressive strength of environmentally friendly concrete[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2016, 30(6): 04016029.
- [9] LEE S, LEE C. Prediction of shear strength of FRP-reinforced concrete flexural members without stirrups using artificial neural networks[J]. Engineering Structures, 2014, 61: 99-112.
- [10] CHUN P J, OKUBO K, NADA C K N. Tensile strength prediction of corroded steel plates by using machine learning approach[J]. Steel and Composite Structures, 2017, 24(5): 635-641.
- [11] BASHIR R, ASHOUR A. Neural network modelling for shear strength of concrete members reinforced with FRP bars[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(8): 3198-3207.
- [12] WANG S X, MA C L, WANG W H, et al. Prediction of failure modes and minimum characteristic value of transverse reinforcement of RC beams based on interpretable machine learning[J]. Buildings, 2023, 13(2): 469.
- [13] MANSOUR M Y, DICLELI M, LEE J Y, et al. Predicting the shear strength of reinforced concrete beams using artificial neural networks[J]. Engineering Structures, 2004, 26(6): 781-799.
- [14] ABUODEH O R, ABDALLA J A, HAWILEH R A. Prediction of shear strength and behavior of RC beams strengthened with externally bonded FRP sheets using machine learning techniques[J]. Composite Structures, 2020, 234: 111698.
- [15] MANSOURI I, KISI O. Prediction of debonding strength for masonry elements retrofitted with FRP composites using neuro fuzzy and neural network approaches[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 70: 247-255.
- [16] ZHENG M J, LEI Z J, ZHANG K. Intelligent detection of building cracks based on deep learning[J]. Image and Vision Computing, 2020, 103: 103987.
- [17] YAN H Y, HE Z, GAO C, et al. Investment estimation of prefabricated concrete buildings based on XGBoost machine learning algorithm[J]. Advanced Engineering Informatics, 2022, 54: 101789.
- [18] XU J G, CHEN S Z, XU W J, et al. Concrete-to-concrete interface shear strength prediction based on explainable extreme gradient boosting approach[J]. Construction and Building Materials, 2021, 308: 125088.
- [19] MANGALATHU S, SHIN H, CHOI E, et al. Explainable machine learning models for punching shear strength estimation of flat slabs without transverse reinforcement[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 39: 102300.
- [20] MANGALATHU S, KARTHIKEYAN K, FENG D C, et al. Machine-learning interpretability techniques for seismic performance assessment of infrastructure systems[J]. Engineering Structures, 2022, 250: 112883.
- [21] GAO X L, LIN C. Prediction model of the failure mode of beam-column joints using machine learning methods[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 120: 105072.
- [22] LIANG M F, CHANG Z, WAN Z, et al. Interpretable Ensemble-Machine-Learning models for predicting creep behavior of concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 125: 104295.
- [23] SANNI B A, MOHAMED HAMDY M, AMMAR Y, et al. Explainable extreme gradient boosting tree-based prediction of load-carrying capacity of FRP-RC columns[J]. Engineering Structures, 2021, 245: 112836.
- [24] FENG D C, WANG W J, MANGALATHU S, et al. Interpretable XGBoost-SHAP machine-learning model for shear strength prediction of squat RC walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(11): 04021173.
- [25] XU J G, HONG W, ZHANG J, et al. Seismic performance assessment of corroded RC columns based on data-driven machine-learning approach[J]. Engineering Structures, 2022, 255: 113936.
- [26] 马财龙,王文虎,侯宪龙,等. 基于可解释机器学习方法的RC深受弯构件开裂剪力预测[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2023, 40(5): 621-629.

- MA C L, WANG W H, HOU X L, et al. Prediction of the shear cracking strength of RC deep beams based on the interpretable machine learning approach[J]. *Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English)*, 2023, 40(5): 621-629. (in Chinese)
- [27] 金浏, 万顺寅, 李冬, 等. 配箍率对CFRP筋混凝土梁-柱节点抗剪强度尺寸效应的影响分析[J]. *中国科学: 技术科学*, 2022, 52(10): 1484-1494.
- JIN L, WAN S Y, LI D, et al. Influence of stirrup ratio on size effect of shear strength of concrete beam-column joints reinforced with CFRP bars[J]. *Scientia Sinica(Technologica)*, 2022, 52(10): 1484-1494. (in Chinese)
- [28] 范晓庆, 郭迅, 刘爱文, 等. 基于平面框架拟静力试验的RC框架柱的破坏模式研究[J]. *地震工程学报*, 2022, 44(5): 1074-1081.
- FAN X Q, GUO X, LIU A W, et al. Failure mode of RC frame columns based on the plane frame quasi-static test[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2022, 44(5): 1074-1081. (in Chinese)
- [29] 史庆轩, 王朋, 王秋维. 钢筋混凝土柱剪切粘结破坏影响因素分析[J]. *工程力学*, 2013, 30(11): 136-142+179.
- SHI Q X, WANG P, WANG Q W. Analysis of the influencing factors for the shear-bond failure of RC columns[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(11): 136-142+179. (in Chinese)
- [30] 刘力维. 弯剪破坏钢筋混凝土柱的抗震性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- LIU L W. Study on seismic behavior of RC columns in flexural-shear failure[D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese)
- [31] 王全凤, 周博, 郑济坤, 等. HRBF500级细晶钢筋混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. *建筑结构*, 2014, 44(1): 38-41+11.
- WANG Q F, ZHOU B, ZHENG J K, et al. Experimental study on seismic behavior of HRBF500 reinforced concrete short columns[J]. *Building Structure*, 2014, 44(1): 38-41+11. (in Chinese)
- [32] 张亚齐. 不同配箍率再生混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. *建筑结构*, 2011, 41(S1): 272-276.
- ZHANG Y Q. Experimental study on the seismic behavior of recycled concrete short columns with different stirrup ratios[J]. *Building Structure*, 2011, 41(S1): 272-276. (in Chinese)
- [33] 孙双喜. 高强钢筋高强混凝土短柱抗震性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2015.
- SUN S X. Research on seismic performance of high-strength concrete short column reinforced with high-strength rebar[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2015. (in Chinese)
- [34] 史庆轩, 杨文星, 王秋维, 等. 高强箍筋高强混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(9): 49-58.
- SHI Q X, YANG W X, WANG Q W, et al. Experimental research on seismic behavior of high-strength concrete short columns with high-strength stirrups[J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(9): 49-58. (in Chinese)
- [35] 宋昌. 配置HRB600级高强箍筋约束混凝土短柱抗震试验研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
- SONG C. Experiments on seismic behavior of concrete short columns with HRB600 high-strength stirrups[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [36] 张辉. 高延性纤维混凝土短柱受剪性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- ZHANG H. Experimental study on shear behavior of ductile fiber reinforced concrete short column[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014. (in Chinese)
- [37] 冯涛. 超高韧性水泥基复合材料短柱抗震性能试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2016.
- FENG T. Experimental research on seismic behavior of short column with ultra high toughness cementitious[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2016. (in Chinese)
- [38] 李振宝, 解咏平, 杜修力, 等. 钢筋混凝土短柱受剪性能尺寸效应研究[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(6): 26-33.
- LI Z B, XIE Y P, DU X L, et al. Size effect on shear behavior of reinforced concrete short columns[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(6): 26-33. (in Chinese)
- [39] 崔宇强. CFRP加固钢筋混凝土柱受压性能和抗震性能的尺寸效应研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2018.
- CUI Y Q. Research of size effect on compressive and seismic behavior of CFRP reinforced concrete columns[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2018. (in Chinese)
- [40] 苑寿刚. CFRP约束带载加固混凝土柱滞回性能试验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- YUAN S G. Experimental study on the hysteretic behavior of preloaded concrete columns with CFRP confinement[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009. (in Chinese)
- [41] 郑松彬. FRP-ECC延性铰钢筋混凝土柱抗震性能研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2018.
- ZHENG S B. Seismic behavior of FRP-ECC reinforced concrete columns with ductile hinges[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2018. (in Chinese)

- [42] 金茂鑫. FRP-钢复合管约束混凝土方柱抗震性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
JIN M X. Seismic performance of FRP-steel composite tube confined columns[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [43] 魏渊峰. 预应力钢带加固钢筋混凝土短柱抗震性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
WEI Y F. Experimental study on seismic performance of RC short column retrofitted by prestressed steel strip[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. (in Chinese)
- [44] 李传林. 预应力钢板箍加固高轴压比RC短柱抗震性能研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2007.
LI C L. Study on seismic performance of RC columns with high compressive ratio retrofitted by prestressing steel plate hoops[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2007. (in Chinese)
- [45] 张哲铭. 预应力CFRP布-RPC增大截面法复合加固钢筋混凝土方柱抗震性能[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2020.
ZHANG Z M. Seismic behavior of reinforced concrete square columns strengthened by prestressed CERF-RPC method[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [46] 王全凤, 沈章春, 杨勇新, 等. HRB400级钢筋混凝土短柱抗震试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(2): 114-117.
WANG Q F, SHEN Z C, YANG Y X, et al. Seismic behavior of HRB400 reinforcement concrete short columns[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(2): 114-117. (in Chinese)
- [47] 孙治国, 司炳君, 郭迅, 等. 钢筋混凝土柱地震剪切-粘结破坏试验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(3): 109-117+149.
SUN Z G, SI B J, GUO X, et al. Experimental research on the shear-bond failure of RC columns under seismic action[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(3): 109-117+149. (in Chinese)
- [48] 张勤. RC柱考虑剪切作用的抗震性能和残余变形研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
ZHANG Q. Study on seismic performance considering shear effects and residual deformations of reinforced concrete columns[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [49] 郭建明, 解咏平, 张丽, 等. 大尺寸高轴压比钢筋混凝土短柱剪切-粘结破坏试验研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(12): 89-93+133.
GUO J M, XIE Y P, ZHANG L, et al. Experimental study on shear-bond failure of large-scale reinforced concrete short columns with high axial compression ratio[J]. Building Structure, 2019, 49(12): 89-93+133. (in Chinese)
- [50] 刘伟. 钢筋混凝土构造配筋短柱抗震性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
LIU W. Seismic behavior of reinforced concrete short columns with minimum reinforcements[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)
- [51] 邓明科, 张辉, 梁兴文, 等. 高延性纤维混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(12): 62-69.
DENG M K, ZHANG H, LIANG X W, et al. Experimental study on seismic behavior of high ductile fiber reinforced concrete short column[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(12): 62-69. (in Chinese)
- [52] 贾金青, 赵国藩. 高强混凝土框架短柱力学性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(3): 43-47.
JIA J Q, ZHAO G F. Experimental research on mechanical performance of high-strength concrete frame short columns[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(3): 43-47. (in Chinese)
- [53] 刘文林. PVA纤维增强混凝土柱抗震性能试验和数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
LIU W L. Experimental investigation and numerical simulate on seismic behavior of PVA fiber-reinforced concrete columns[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [54] 陈金波. 高强纤维混凝土柱抗震性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
CHEN J B. Research on seismic performance of high strength fiber-reinforced concrete columns[D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese)
- [55] 张闯. PET纤维布加固锈蚀钢筋混凝土柱抗震性能的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
ZHANG C. Seismic behavior of corroded RC columns wrapped with PET sheet[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)
- [56] 胡慧娟. 不同配箍率装配式约束高强混凝土柱抗震性能研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2020.
HU H J. Research on seismic behavior of precast confined high strength concrete columns with different stirrup ratio[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2020. (in Chinese)
- [57] 史纪从. 超高性能混凝土免拆模板钢筋混凝土柱抗震性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
SHI J C. Study on seismic behavior of reinforced concrete columns with permanent template of ultra-high performance concrete[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019. (in Chinese)

- [58] 张振成. 钢板栓筋连接高强箍筋约束混凝土柱的抗震性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
ZHANG Z C. Experimental research on seismic performance of new fabricated confined concrete column with steel plate and horizontal strengthened bars[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. (in Chinese)
- [59] 王新宇. 钢板网约束高强混凝土柱抗震性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
WANG X Y. Experimental study on seismic behavior of high-strength concrete columns with expanded metal lath[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [60] 胡伟强. 高强箍筋混凝土柱抗震抗剪性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
HU W Q. Experimental study on seismic shear performance of high-strength reinforced concrete columns[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018. (in Chinese)
- [61] TRAN C T N. Experimental and analytical studies on the seismic behavior of reinforced concrete columns with light transverse reinforcement[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2010.
- [62] JIN C H, PAN Z F, MENG S P, et al. Seismic behavior of shear-critical reinforced high-strength concrete columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(8): 04014198.
- [63] 赵广旗. 地铁站分体中柱抗震性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
ZHAO G Q. Research on seismic performance of split central column of metro station[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. (in Chinese)
- [64] 张峰. 基于高强箍筋约束混凝土柱的承载耗能能力试验研究[J]. 太原学院学报(自然科学版), 2017, 35(2): 10-14.
ZHANG F. Experimental study on bearing capacity of concrete columns confined by high strength stirrups[J]. Journal of Taiyuan University(Natural Science Edition), 2017, 35(2): 10-14. (in Chinese)
- [65] 刘伦. 配置CRB600H高强箍筋混凝土柱抗震抗剪性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
LIU L. Experimental research on seismic shear behavior of reinforced concrete columns with CRB600H high-strength stirrups[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)
- [66] 张家骏. 配置HRB600高强箍筋混凝土短柱性能试验研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
ZHANG J J. Experimental performance research on the short concrete columns with HRB600 high strength stirrup[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [67] 韦雷. 高强箍筋约束高强混凝土短柱受剪承载力试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
WEI L. The experimental study on shear capacity for high-strength concrete columns with high-strength stirrup[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010. (in Chinese)
- [68] 郑婉婷. 后掺骨料混凝土短柱的抗震性能试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
ZHENG W T. Experimental study on seismic behavior of short columns of after-mixing coarse aggregate concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [69] 连筱钦. 超高韧性混凝土短柱抗震性能研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2019.
LIAN X Q. Study on seismic performance of ultra-high toughness concrete short columns[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2019. (in Chinese)
- [70] 于皓晨. 复杂地震作用下钢筋增强UHTCC柱的抗震性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
YU H C. Research on seismic performance of steel reinforced UHTCC columns under complex seismic earthquakes[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [71] 陈俊. 预制混凝土底层柱抗震性能试验研究与分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
CHEN J. Experimental research and analysis on seismic performance of precast concrete bottom column[D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese)
- [72] UMEHARA H, JIRSA J O. Shear strength and deterioration of short reinforced concrete columns under cyclic deformations[D]. Austin: University of Texas at Austin, 1983.
- [73] LYNN A C. Seismic evaluation of existing reinforced concrete building columns[D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2001.
- [74] SEZEN H, MOEHLE J P. Seismic tests of concrete columns with light transverse reinforcement[J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(6): 842-849.
- [75] TAKAINE Y, YOSHIMURA M, NAKAMURA T. Collapse drift of reinforced concrete columns[J]. Journal of Structural and Construction Engineering(Transactions of AIJ), 2003, 68(573): 153-160.

- [76] XIAO Y, MARTIROSSYAN A. Seismic performance of high-strength concrete columns[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1998, 124(3): 241-251.
- [77] 彭有开. 再生混凝土框架柱抗震性能试验研究[D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2011.
PENG Y K. Experimental study on the seismic behavior of recycled concrete frame columns[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2011. (in Chinese)
- [78] WIBOWO A, WILSON J L, LAM N, et al. Drift capacity of lightly reinforced concrete columns[J]. *Australian Journal of Structural Engineering*, 2014, 15(2): 522-535.
- [79] AZIZINAMINI A, BAUM KUSKA S S, BRUNGARDT P, et al. Seismic behavior of square high-strength concrete columns[J]. *ACI Structural Journal*, 1994, 91(3): 336-345.
- [80] OUSALEM H, KABEYASAWA T, TASAI A. Evaluation of ultimate deformation capacity at axial load collapse of reinforced concrete columns[C]//13th World Conference on Earthquake Engineering. August 1-6, 2004, Vancouver, Canada. WCEE, 2004: 370.
- [81] LAM S S E, WU B, WONG Y L, et al. Drift capacity of rectangular reinforced concrete columns with low lateral confinement and high-axial load[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(6): 733-742.
- [82] NAKAMURA T, YOSHIMURA M. Gravity load collapse of reinforced concrete columns with brittle failure modes[J]. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2002, 1(1): 21-27.
- [83] LI Y A, HUANG Y T, HWANG S J. Seismic response of reinforced concrete short columns failed in shear[J]. *ACI Structural Journal*, 2014, 111(4): 945-954.
- [84] HAROON M, SHIN D, LEE J Y, et al. Deformability of reinforced concrete columns failing in shear after flexural reinforcement yielding[J]. *ACI Structural Journal*, 2020, 117(3): 71-90.
- [85] OU Y C, ALRASYID H, VAN BAO NGUYEN N. Minimum shear reinforcement for columns with high-strength reinforcement and concrete[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2021, 147(2): 04020313.
- [86] 尹齐. 低周往复荷载作用下混凝土短柱抗剪性能试验研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.
YIN Q. Experimental study on shear resistance of concrete short columns under low cyclic loading[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014. (in Chinese)
- [87] 刘界鹏, 王伟, 张小冬. 钢筋混凝土与型钢混凝土超短柱的滞回性能试验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2009, 39(6): 1193-1199.
LIU J P, WANG W, ZHANG X D. Seismic behavior of reinforced-concrete and steel reinforced concrete ultra short columns[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2009, 39(6): 1193-1199. (in Chinese)
- [88] 万海涛, 弓喆. 高强箍筋RC柱性能退化的研究[J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(5): 608-617.
WAN H T, GONG Z. Research on performance degradation of RC columns with high-strength stirrup[J]. *Journal of Henan University(Natural Science)*, 2020, 50(5): 608-617. (in Chinese)
- [89] 王建. 套筒浆锚连接钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
WANG J. Experimental research on seismic behavior of reinforced concrete columns assembled by grout-filled sleeve and mechanical connection[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. (in Chinese)
- [90] 刘籍蔚. 外包式ECC/RC组合柱抗震性能及设计方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
LIU J W. Seismic behavior and design method of ECC/RC composite columns[D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [91] 张华. 碳纤维布和角钢复合加固钢筋混凝土柱抗剪性能研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
ZHANG H. Experimental research on shear behavior of reinforced concrete columns combination rehabilitation with bonded steel angles and carbon fiber reinforced polymer sheet[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese)
- [92] 陈杰. FRP加固钢筋混凝土柱抗震性能的试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2004.
CHEN J. Experimental research on seismic behavior of concrete column restrengthened with reinforced polymer[D]. Nanjing: Southeast University, 2004. (in Chinese)
- [93] 路湛沁, 陈家夔, 崔锦, 等. 钢筋混凝土框架柱在低周反复荷载作用下的抗弯强度及延性[J]. *西南交通大学学报*, 1987, 22(1): 1-11.
LU Z Q, CHEN J K, CUI J, et al. The flexural strength and displacement ductility of reinforced concrete framed columns under cyclic loading[J]. *Journal of Southwest JiaoTong University*, 1987, 22(1): 1-11. (in Chinese)
- [94] 姚燕, 李功洲, 高春勇, 等. 大于C80混凝土轴心抗压强度设计值取值的探讨[J]. *煤炭工程*, 2015, 47(1): 110-111+114.

- YAO Y, LI G Z, GAO C Y, et al. Discussion on design value selection of axial compressive strength of over C80 concrete[J]. *Coal Engineering*, 2015, 47(1): 110-111+114. (in Chinese)
- [95] MA J. Variable selection with Copula Entropy[J]. *Chinese Journal of Applied Probability and Statist*, 2021, 37(4): 405-420.
- [96] MA J, SUN Z Q. Dependence structure estimation via Copula[EB/OL]. 2019: arXiv: 0804.4451v2. <https://arxiv.org/pdf/0804.4451v2.pdf>.
- [97] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
ZHOU Z H. Machine learning[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016. (in Chinese)
- [98] SHCHERBAKOV M, BREBELS A, SHCHERBAKOVA N L, et al. A survey of forecast error measures[J]. *World Applied Sciences Journal*, 2013, 24(24): 171-176.
- [99] LUNDBERG S M, LEE S I. A unified approach to interpreting model predictions[C]//*Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems*. December 4-9, 2017, Long Beach, California, USA. ACM, 2017: 4768-4777.
- [100] FERNANDO Z T, SINGH J, ANAND A. A study on the Interpretability of Neural Retrieval Models using DeepSHAP[C]//*Proceedings of the 42nd International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*. Paris, France. ACM, 2019: 1005-1008.
- [101] MANGALATHU S, HWANG S H, JEON J S. Failure mode and effects analysis of RC members based on machine-learning-based SHapley Additive exPlanations(SHAP) approach[J]. *Engineering Structures*, 2020, 219: 110927.
- [102] SHRIKUMAR A, GREENSIDE P, KUNDAJE A. Learning important features through propagating activation differences[C]//*Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning - Volume 70*. August 6-11, 2017, Sydney, NSW, Australia. ACM, 2017: 3145-3153.
- [103] 冯德成, 吴刚. 混凝土结构基本性能的可解释机器学习建模方法[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(4): 228-238.
FENG D C, WU G. Interpretable machine learning-based modeling approach for fundamental properties of concrete structures[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(4): 228-238. (in Chinese)
- [104] 邵平, 杨健颖, 苏思达, 等. 可解释机器学习: 模型、方法与实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
SHAO P, YANG J Y, SU S D, et al. Interpretable machine learning: Models, methods and practices[M]. Beijing: China Machine Press, 2022. (in Chinese)
- [105] 克里斯托夫·莫尔纳. 可解释性机器学习: 黑盒模型可解释性理解指南[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021.
CHRISTOPH M. Interpretable machine learning: A guide for making Black Box models interpretable[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2021. (in Chinese)
- [106] 列奥尼达·詹法纳, 安东尼奥·迪·塞科. AI可解释性: Python语言版[M]. 北京: 清华大学出版社, 2022.
LEONIDA Z, ANTONIO D S. Explainable AI with Python[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2022. (in Chinese)

责任编辑: 张自强