

基于 XGBoost 模型集成学习的 RC 框架结构地震响应预测方法

赵煜东^{1,2}, 许卫晓^{1,2,*}, 李 静³, 杨伟松^{1,2}, 赵继幸^{1,2}, 姜冠宇^{1,2}

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 海洋环境混凝土技术教育部工程技术研究中心, 青岛 266525; 3. 青岛市人民防空工程质量监督站, 青岛 266072)

摘要:为实现钢筋混凝土(RC)框架结构地震响应的快速预测,提出了基于集成学习的 RC 框架结构地震响应预测方法。设计低层、多层和小高层共 3 个 RC 框架结构作为研究算例,根据条件均值谱(CMS)选取地震动记录,通过弹塑性时程分析搭建样本数据库,以地震动强度信息和结构信息为输入预测结构响应,同时对模型进行特征重要性分析。研究表明,建立的 XGBoost 模型相比梯度提升回归树(GBRT)模型具有更好的泛化性能,特征参数中平均谱加速度(AvgS_a)的相对重要性最大,提出的方法为快速预测 RC 框架结构地震响应提供了借鉴,具有较高的应用价值。

关键词: RC 框架结构;集成学习;地震响应;特征重要性分析

中图分类号: TU375.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)02-0076-08

Seismic response prediction method of RC frame structure based on XGBoost model of ensemble learning

ZHAO Yudong^{1,2}, XU Weixiao^{1,2,*}, LI Jing³, YANG Weisong^{1,2}, ZHAO Jixing^{1,2}, JIANG Guanyu^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Engineering Research Center of Concrete Technology under Marine Environment, Ministry of Education,

Qingdao 266525, China; 3. Qingdao Civil Air Defense Engineering Quality Supervision Station, Qingdao 266072, China)

Abstract: In order to realize the rapid prediction of seismic response of reinforced concrete (RC) frame structure, a seismic response prediction method of RC frame structure based on ensemble learning is proposed. Three RC frame structures, namely low-rise, multi-story and small high-rise, were designed as research examples. The ground motion records were selected according to the conditional mean spectrum (CMS), and the sample database was built through elastoplastic time history analysis. The structural response was predicted with the input of ground motion intensity information and structural information, and the feature importance of the model was analyzed. The results show that the established XGBoost model has better generalization performance than the gradient boosting regression tree (GBRT) model, and the relative importance of the average spectral acceleration (AvgS_a) in the characteristic parameters is the largest. The proposed method provides a reference for quickly predicting the seismic response of RC frame structures and has high application value.

收稿日期: 2022-11-17

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2020ME246; ZR2022ME029)

作者简介: 赵煜东(1997-), 男, 山东青岛人。硕士, 研究方向为结构抗震。E-mail: 1541002131@qq.com。

* 通信作者: 许卫晓(1988-), 男, 山东临沂人。博士, 副教授, 主要从事结构抗震研究。E-mail: wxgodspeed@163.com。

Key words: RC frame structure; ensemble learning; seismic response; feature importance analysis

地震引发的建筑结构破坏会造成大量的人员伤亡和严重的经济损失,现代概率地震风险评估主要目的是估计地震风险的量化指标,其包括人员伤亡数和经济损失程度等^[1-2]。相关的研究工作通常采用基于性能的地震工程评估方法^[3]计算超过一定损失水平的年平均频率,其中包含了地震动强度(IM)、结构响应(EDP)和结构损伤(DM)等指标,各指标之间的关系通过易损性和脆弱性评估获得^[4]。

多年来,地震工程领域已有大量研究 IM 与 EDP 之间关系的科研成果,增量动力分析(IDA)法、云图法以及多条带分析法等相继被提出^[5-7]。大量研究表明,以峰值地震加速度(PGA)为代表的普通地震动强度指标有许多局限性^[8],为此,科研人员提出了更高阶的地震动强度指标,如地震动整体持时强度(I_a)^[9]以及平均谱加速度($AvgS_a$)^[10]等。然而,地震动强度和结构响应之间存在着非常强的非线性关系^[11],通常需要大量的弹塑性时程分析进行确定,导致最终的评估工作无法高效完成。因此,如何通过其他手段回避弹塑性时程分析耗时耗力的过程,从而提高结构响应指标的获取速度,一直是地震工程领域亟待解决的问题。

近年来,机器学习(ML)在现代地震工程领域引起了重视,机器学习算法可以改进传统的数理分析模型,能够快速高效地解决多种工程问题^[12]。XGBoost 和 GBRT 属于机器学习中的集成学习算法,是回归分析中经常使用的 2 种模型,在提升回归预测准确度方面有着很大的优势^[13]。目前集成学习已在多个学科领域有相关的研究应用^[14-16],而在结构响应预测方面的研究较少。故本文选择 XGBoost 和 GBRT 2 种算法,研究实现基于集成学习对不同层数 RC 框架结构地震响应的合理预测。

研究算例以雅安地区为目标场地,设计低层、多层和小高层共 3 个典型 RC 框架结构作为研究对象。特征参数选择地震动强度信息和结构信息,为考虑地震动不确定性的影响,根据条件均值谱选取地震动记录作为输入,通过弹塑性时程分析搭建结构响应的样本数据库,用于训练模型以预测 RC 框架结构的地震响应。根据 XGBoost 和 GBRT 模型的泛化能力对 2 种算法做对比选优,最后对各个特征参数进行重要性分析。

1 RC 框架结构有限元模型

1.1 结构参数及有限元建模方法

研究按照《建筑抗震设计规范》^[17]《混凝土结构设计规范》^[18]和《高层建筑混凝土结构技术规程》^[19]设计了 3、8、14 层共 3 个 RC 框架结构作为算例结构。3 个结构底层层高为 4000 mm,其余层层高均为 3400 mm。楼板厚度为 120 mm,楼层恒载为 4.0 kN/m²,活载为 2.0 kN/m²。3 层结构采用 C30 混凝土,8 层结构采用 C35 混凝土,14 层结构采用 C40 混凝土。结构中的梁、柱纵筋均采用 HRB400,箍筋采用 HPB235。选择四川省雅安市(30°N/103°E)为中心 250 km 内的区域作为算例场地^[20],设计地震分组为第二组,抗震设防烈度为 7 度(0.1g, $g=9.8 \text{ m/s}^2$),设计场地类别为 I 类。结构平面与立面如图 1 所示,梁、柱截面配筋如图 2 所示。

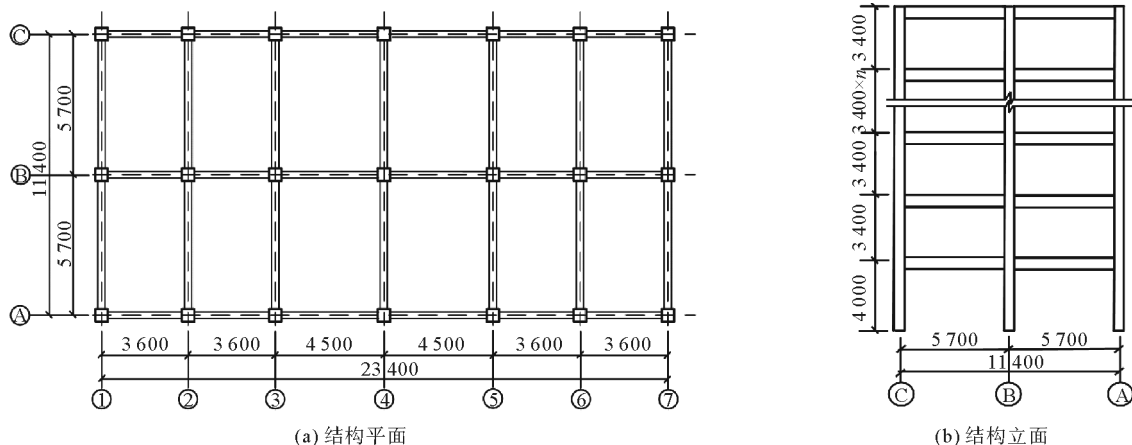


图 1 结构的平面及立面(单位:mm)

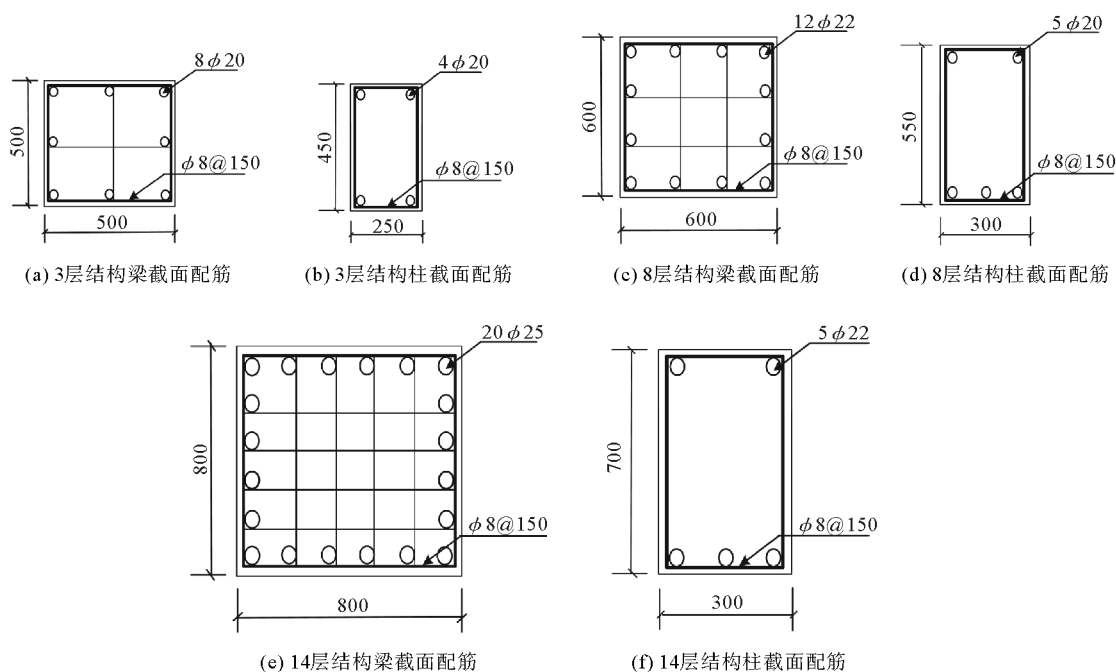


图2 各结构梁、柱截面配筋(单位:mm)

基于 OpenSEES 开源平台建立 RC 框架结构有限元模型。采用基于柔度法的纤维单元建立框架梁、柱模型,建模时考虑结构的重力二阶效应。定义纤维单元截面时,考虑框架梁、柱混凝土核心区箍筋的约束作用,不再定义箍筋的纤维截面。纤维单元混凝土采用 Concrete02 本构模型,纤维单元钢筋采用 Steel02 本构模型,如图 3 所示。模型参数值依据《混凝土结构设计规范》^[18] 计算获得。

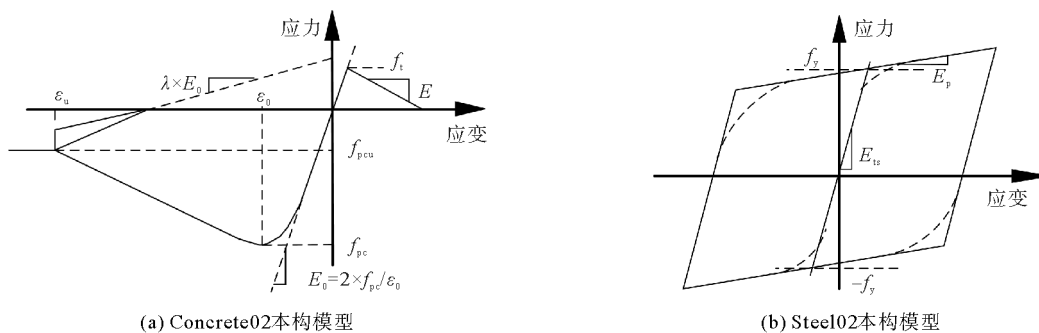


图3 纤维单元材料本构示意

ϵ_u —极限应变; λ —卸载斜率比值; E_0 —初始刚度; ϵ_0 —受压应变; f_t —抗拉强度; E —受压刚度;
 f_{pcu} —极限抗压强度; f_{pc} —抗压强度; f_y —屈服强度; E_{ts} —受拉刚度; E_p —塑性刚度

1.2 有限元模型验证

为验证使用上述建模方法建立 RC 框架结构有限元模型的准确性,以课题组已经完成的 RC 框架-剪力墙结构拟静力试验^[20] 为算例进行验证。纤维单元混凝土采用 Concrete02 本构模型,壳单元混凝土采用 PlaneStressUserMaterial 本构模型,纤维单元钢筋和壳单元钢筋均采用 Steel02 本构模型。

将有限元模拟计算得到的滞回曲线与试验第一轮实测滞回曲线进行对比(图 4)。由图 4 可知,试件 FW1、FW2 有限元模拟得到的极限荷载与试验得到的极限荷载基本一致,误差均小于 10%,说明有限元模拟结果与试验结果吻合情况良好,故可以使用本文提出的 OpenSEES 纤维单元建模方法模拟 RC 框架结构的地震响应。

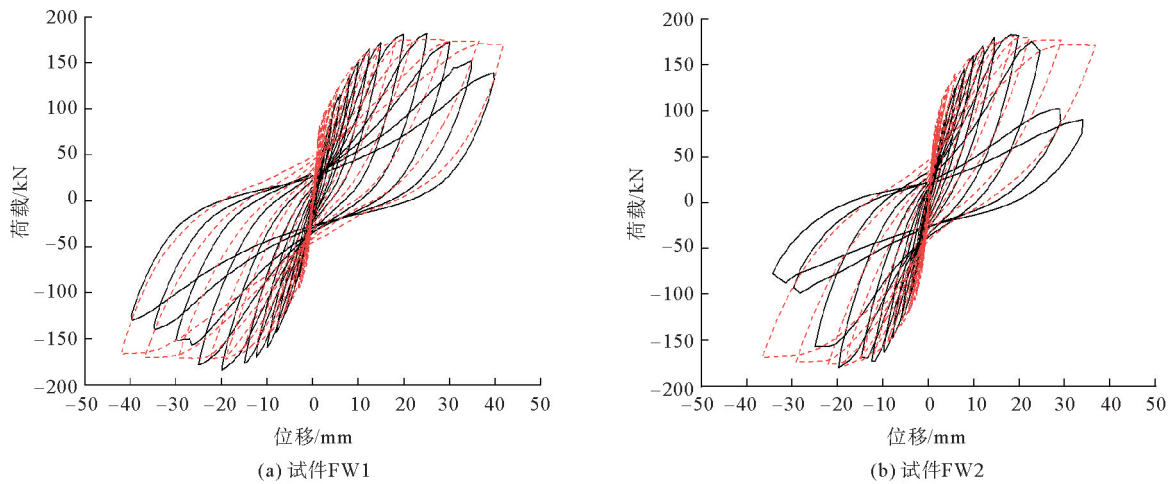


图 4 滞回曲线对比验证
—— 试验; - - - 模拟

2 地震动记录选取及弹塑性时程分析

为综合考虑算例场地的地震危险性,以条件均值谱为目标谱进行地震动记录的选取。分别计算 3 个 RC 框架结构模型主方向(Y 向)的自振周期,并在此方向输入地震动记录进行弹塑性时程分析。一般以结构的一阶自振周期构建条件均值谱,而对于具有长周期特征的高层结构,其多阶振型效应是不可忽略的,故在一阶自振周期的基础上考虑二阶自振周期建立包络条件均值谱^[21]。3 层、8 层和 14 层结构的一阶自振周期 T_1 分别为 0.52、1.03、1.47 s,14 层结构的二阶自振周期 T_2 为 0.48 s。通过公式(1)构建条件均值谱^[22]:

$$\mu_{\ln S_a(T_i)|\ln S_a(T_1)} = \mu_{\ln S_a}(M, R, T_i) + \boldsymbol{\rho}(\epsilon(T_i), \epsilon(T_1))\epsilon(T_1)\sigma_{\ln S_a}(M, T_i) \quad (1)$$

式中: $\mu_{\ln S_a}(M, R, T_i)$ 为在 (M, R) 的条件下,任意 T_i 的加速度反应谱对数值; $\boldsymbol{\rho}(\epsilon(T_i), \epsilon(T_1))$ 为 T_i 与 T_1 对应的标准差系数之间的相关系数矩阵; $\epsilon(T_i)$ 为 T_i 对应的加速度反应谱对数值 $\mu_{\ln S_a}(T_i)$ 同加速度反应谱对数值 $\mu_{\ln S_a}(M, R, T_i)$ 作差后与该周期点加速度反应谱对数标准差 $\sigma_{\ln S_a}(M, T_i)$ 的比值。

基于算例场地在 50 年超越概率 2% 下的一致概率谱^[20],根据中国西南地区衰减关系^[23]以及概率地震危险性分析(PSHA)的解耦方法^[24],按照公式(1)构建 3 层和 8 层结构 T_1 所对应的条件均值谱 CMS。对于 14 层结构的包络条件均值谱,其由 T_2 对应的 CMS 前段,UHS 的 T_1 到 T_2 部分以及 T_1 对应的 CMS 后段构成,如图 5 所示^[21]。根据雅安地区的场地信息,基于条件均值谱在 PEER NGA-WEST2 数据库中筛选地震动记录,最终 3 个结构分别选取 30 条地震动记录,作为弹塑性时程分析的输入。各结构基于 T_1 点的谱型匹配结果如图 6 所示。

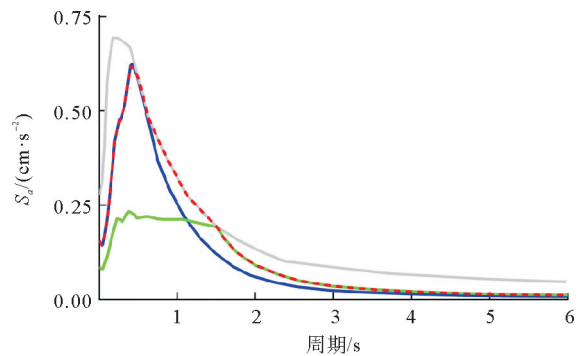


图 5 14 层结构包络条件均值谱构成

— T_2 条件均值谱; — T_1 条件均值谱;
— 目标场地一致概率谱; - - - 包络条件均值谱

采用全概率性态地震工程评估结构的抗震性能时,主要关注的是结构构件的损伤,其表征形式主要体现在变形和耗能两类参数。其中,以变形参数应用最为广泛。为此,本文采用了 2 个典型的结构位移响应指标,即最大层间位移角和最大水平位移。为获取不同地震强度下的结构响应,采用 IDA 中的等步长法,以 $S_a(T_1, 5\%)$ 为地震强度调幅指标,调幅步长取 0.1g,将 90 条地震动记录分别由 0.1g 调幅到 2.0g 输入到各个结构中进行增量动力分析。对 IDA 方法计算的 1800 组结构响应进行数据分布统计,如图 7 所示。

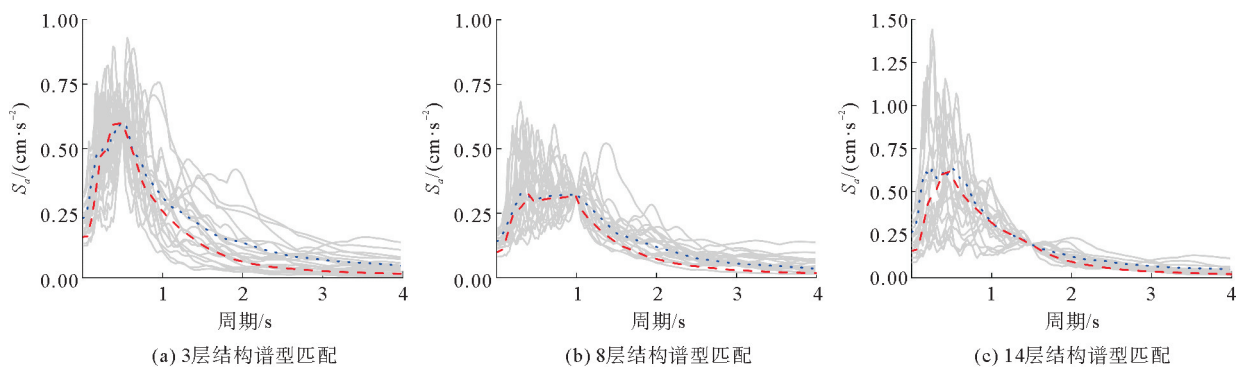


图6 各结构谱型匹配结果

— 地震动反应谱; ··· 平均反应谱; - - 包络条件均值谱

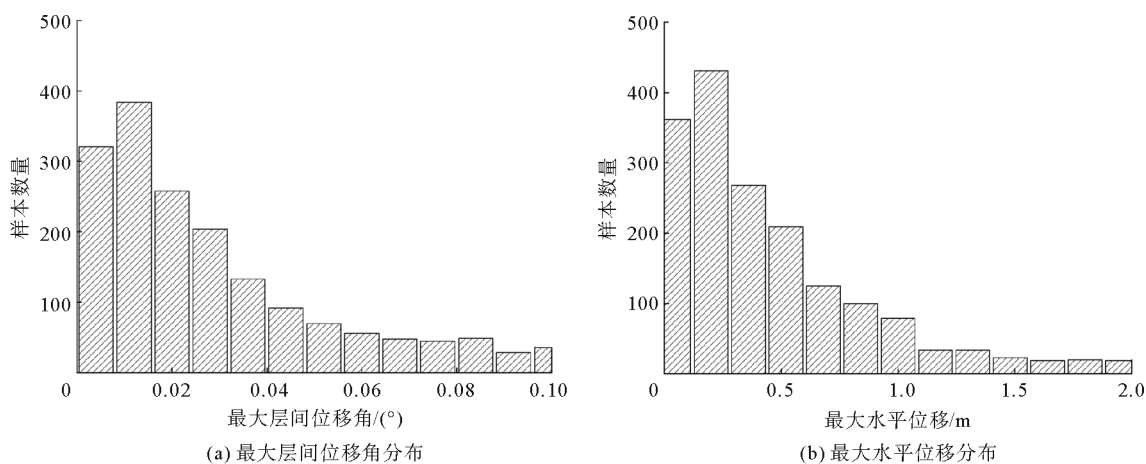


图7 结构响应数据分布统计结果

3 基于集成学习的结构响应预测

RC 框架结构的地震响应预测属于回归问题,通常单个模型的性能有很大的不稳定性,而引入集成学习的思想,集合多个学习器,以表征性能为指标对各个子模型进行筛选组合,最终会使模型的预测精度显著提高^[13]。本文选择了新型 XGBoost 和经典 GBRT 2 种集成学习算法进行预测研究。

3.1 模型参数选择

模型特征参数选择结构总高、柱尺寸、柱配筋率和梁高等结构信息,同时选择在结构抗震方向较常用的峰值地震加速度 PGA、峰值地震速度 PGV、峰值地震位移 PGD 和一阶周期谱加速度 $S_a(T_1)$ 等地震动强度信息,进一步选择具有很好的充分性及有效性的 I_a ^[9] 和 $AvgS_a$ ^[10] 等地震动强度信息;输出参数选择弹塑性时程分析使用的最大层间位移角和最大水平位移。基于上文 IDA 数据结果,搭建样本数据库用于后续模型的训练。

3.2 模型结构设计

使用 Python 中的 Sklearn 库对模型进行设计。首先将样本数据随机等分为 10 个子集,9 个子集作为训练数据集,1 个子集作为测试数据集。XGBoost 模型和 GBRT 模型的典型超参数有:学习率 learning_rate、树棵数 n_estimators 和最大树深度 max_depth 等。在这基础上,XGBoost 模型还具有更多额外的超参数,因此该模型准确度更易受超参数的影响。为获得最优超参数组合,采用 GridSearchCV 方法设计 2 个模型。GridSearchCV 称为网格搜索交叉验证调参法,它通过交叉验证的方式,获取所有参数组合下的得分,以此为评价指标选取最优超参数。最终 XGBoost 和 GBRT 模型的参数取值如表 1 和表 2 所示。

3.3 模型测试结果分析

以表 1、表 2 的参数取值训练模型后,使用测试数据集对 XGBoost 和 GBRT 模型的泛化能力进行评估对比,测试结果如图 8 和图 9 所示,其中,目标值为前文 IDA 计算输出的结构响应,由有限元模拟得出。所得结果表明,XGBoost 模型预测最大层间位移角和最大水平位移的决定系数 R^2 均高于 GBRT 模型,表明 IDA 结果与 XGBoost 输出结果之间具有更强的相关性。XGBoost 模型能更好地建立输入参数与输出参数之间的复杂关系,其对测试集的预测结果与 IDA 计算结果基本相同,说明 XGBoost 模型与 GBRT 模型相比在解决回归问题时泛化能力更强,性能更好。究其原因,相较于传统 GBRT 模型,XGBoost 在使用 CART 学习器时,添加了正则项函数来控制模型的复杂度,可有效减少过拟合现象的发生,提高了整体模型的泛化能力。通过对测试结果的分析,最终选择泛化能力更强的 XGBoost 模型作为预测结构响应的最优集成学习算法。

表 1 XGBoost 模型参数

参数名称	参数含义	参数值
learning rate	学习率	0.2
n_estimators	树棵数	300
max_depth	最大树深度	10
Subsample	子采样	0.8
Booster	弱学习器类型	gbtree
Gamma	节点分支损失减少值	0
min_child_weight	节点最小样本权重和	1
colsample_bytree	特征随机采样比例	1
reg_alpha	L1 正则化权重项	0
reg_lambda	L2 正则化权重项	0.0001

表 2 GBRT 模型参数

参数名称	参数含义	参数值
learning_rate	学习率	0.1
n_estimators	树棵数	300
max_depth	最大树深度	7
Subsample	子采样	0.7
max_features	最佳分割特征数量	None

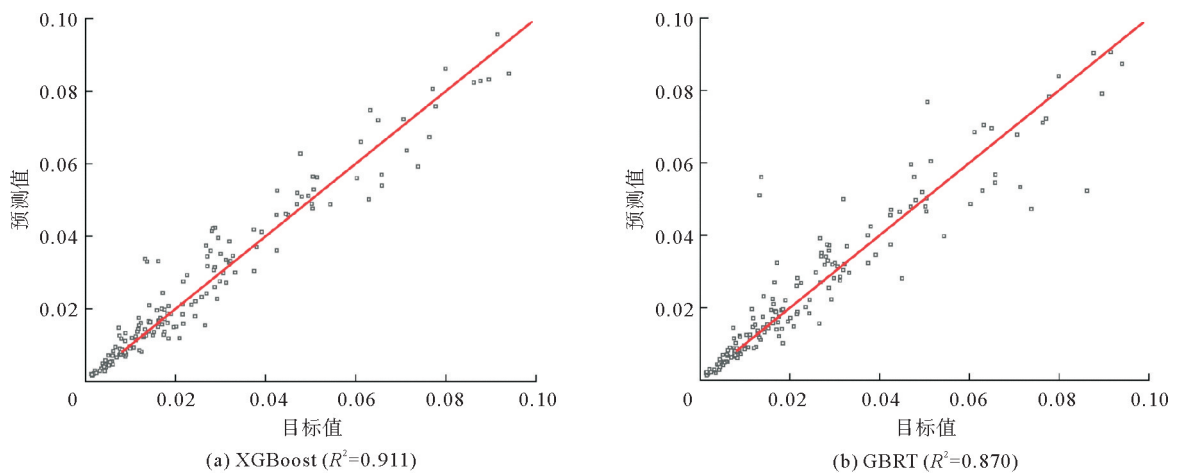


图 8 最大层间位移角的模型回归结果

◻ 模型输出值; — 预测值=目标值

4 模型特征重要性分析

为深入理解模型的特征参数与输出参数之间的内在关系,采用 XGBoost 中的 plot_importance 函数取得各个特征参数对输出参数的相对重要性得分(F 得分),从而获取地震动强度信息和结构信息对不同结构响应指标的贡献大小。

分别计算 10 个特征参数的相对重要性得分,各个特征参数对于最大层间位移角和最大水平位移的 F 值分别如图 10 和图 11 所示。由于最大层间位移角与最大水平位移是类似的响应指标,故地震动强度信

息对这2个结构响应指标的贡献均较大,而结构信息的贡献普遍偏小。这是因为RC框架结构产生塑性变化的主要原因是地震动强度的增加,当结构发展为塑性后,地震动强度的少量增加就可能使结构出现严重的损伤。由图10和图11可知,针对2个结构响应指标贡献最大的特征参数均为 $AvgS_a$,其为 $0.2T_1$ 至 $1.5T_1$ 范围内10个加速度反应谱的几何平均值,此周期范围基本包含了结构从弹性状态到塑性状态再到接近倒塌的整个过程,是比 $S_a(T_1)$ 更高阶的地震动强度指标。特征重要性分析为特征参数的筛选提供了依据,重点考虑贡献度较大的地震动强度信息,可以提高XGBoost模型的数据利用率。

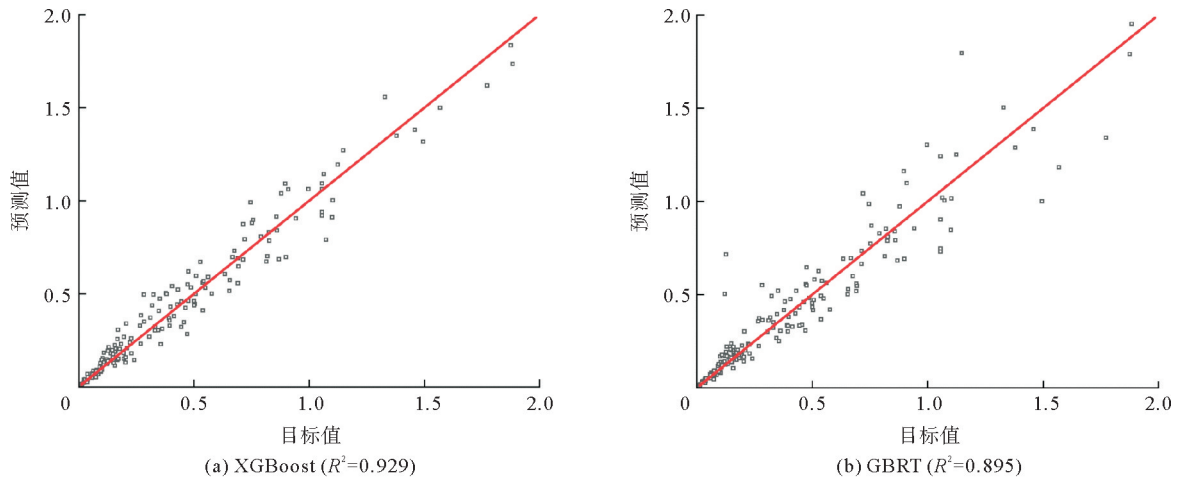


图9 最大水平位移的模型回归结果

□ 模型输出值; — 预测值=目标值

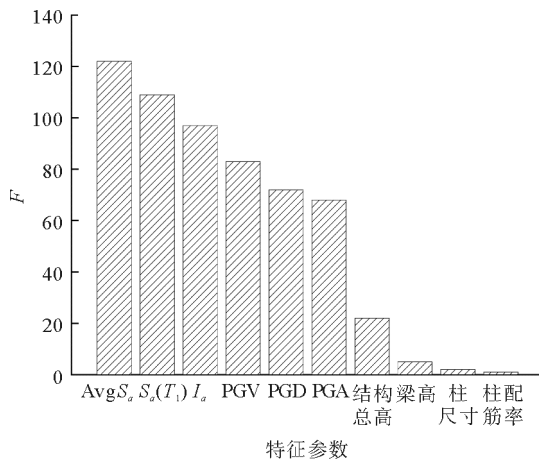


图10 最大层间位移角的特征重要性分析

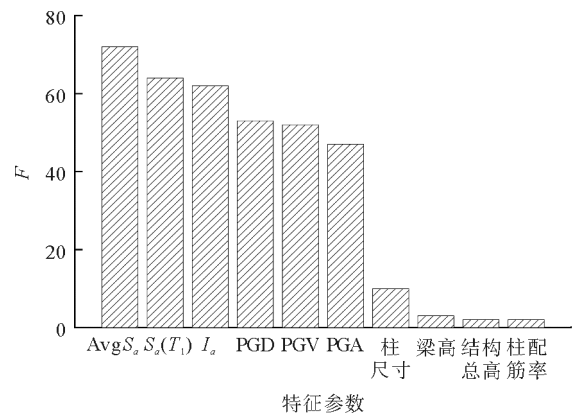


图11 最大水平位移的特征重要性分析

5 结论

1) 以3个RC框架结构为研究算例,提出了基于集成学习的RC框架结构地震响应预测方法,该方法综合考虑了地震动的不确定性以及多种特征参数的影响。

2) XGBoost相较于GBRT建立了特征参数与输出参数之间更为合理的数学关系,采用网格搜索交叉验证调参法设计的XGBoost模型在回归分析中表现良好,与传统GBRT模型相比在测试阶段体现了更好的泛化性能,更能实现RC框架结构地震响应的合理预测。

3) 特征重要性分析揭示了XGBoost模型的内在数据关系,获取了各个特征参数对输出参数的贡献大小,使模型更易于理解。地震动强度信息相较于结构信息对结构响应预测的贡献更大,且综合考虑结构动力特性的平均谱加速度 $AvgS_a$ 指标对于结构位移响应指标均有最高的 F 值,重点考虑贡献度较大的地

震动强度信息,可以提高 XGBoost 模型的数据利用率。

4) RC 框架结构的地震响应包含很多方面,本文关注的是以变形为主要指标的结构构件损伤,故本文提出的方法可以应用于以变形为评估指标的地震易损性分析中。鉴于部分非结构构件为加速度或速度敏感型,后续将进一步开展对加速度、速度等结构响应指标预测方法的相关研究。

参考文献(References):

- [1] YOSHIKAWA H,GODA K. Financial seismic risk analysis of building portfolios[J]. *Natural Hazards Review*,2014,15(2):112-120.
- [2] DOLCE M,PROTA A,BORZI B,et al. Seismic risk assessment of residential buildings in Italy[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*,2021,19(8):2999-3032.
- [3] CORNELL C A,KRAWINKLER H. Progress and challenges in seismic performance assessment[J]. *PEER Center News*,2000,5(2):1-3.
- [4] YEPES E C,SILVA V,ROSSETTO T,et al. The global earthquake model physical vulnerability database[J]. *Earthquake Spectra*,2016,32(4):2567-2585.
- [5] VAMVATSIKOS D,CORNELL C A. Incremental dynamic analysis[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*,2002,31(3):491-514.
- [6] JALAYER F,CORNELL C A. Alternative non-linear demand estimation methods for probability-based seismic assessments[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*,2009,38(8):951-972.
- [7] JALAYER F,DE R R,MANFREDI G. Bayesian cloud analysis:Efficient structural fragility assessment using linear regression[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*,2015,13(4):1183-1203.
- [8] BAKER J W,CORNELL C A. A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*,2005,34(10):1193-1217.
- [9] ARIAS A. A measure of earthquake intensity in seismic design for nuclear power plants[M]. Cambridge,MA. MIT Press,1970.
- [10] KOHRANGI M,BAZZURRO P,VAMVATSIKOS D. Vector and scalar IMs in structural response estimation,part I:Hazard analysis[J]. *Earthquake Spectra*,2016,32(3):1507-1524.
- [11] KOHRANGI M,VAMVATSIKOS D,BAZZURRO P. Implications of intensity measure selection for seismic loss assessment of 3-D buildings[J]. *Earthquake Spectra*,2016,32(4):2167-2189.
- [12] LU Pengzhen,CHEN Shengyong,ZHENG Yujun. Artificial intelligence in civil engineering[J]. *Mathematical Problems in Engineering*,2012,30(10):1-22.
- [13] 罗会兰,易慧. 基于迭代训练和集成学习的图像分类方法[J]. *计算机工程与设计*,2020,41(5):1301-1307.
LUO Huilan,YI Hui. Image classification method based on iterative training and ensemble learning[J]. *Computer Engineering and Design*,2020,41(5):1301-1307.
- [14] 吴双,石宇强. 基于 BP 网络与 XGBoost 的质量控制方法研究[J]. *制造业自动化*,2019,41(12):12-17.
WU Shuang,SHI Yuqiang. Research on quality control method based on BP network and XGBoost[J]. *Manufacturing Automation*,2019,41(12):12-17.
- [15] 张丹峰. 基于 LightGBM,XGBoost,ERT 混合模型的风机叶片结冰预测研究[D]. 上海:上海师范大学,2018.
ZHANG Danfeng. Research on icing prediction of wind turbine blades based on LightGBM,XGBoost and ERT hybrid model[D]. Shanghai:Shanghai Normal University,2018.
- [16] 刘涌泉,李巍,牛伟,等. 航空液压系统流量智能预测方法研究[J]. *科学技术与工程*,2022,22(28):12476-12483.
LIU Yongquan,LI Wei,NIU Wei,et al. Research on intelligent prediction method of aviation hydraulic system flow[J]. *Science Technology and Engineering*,2022,22(28):12476-12483.
- [17] GB 50011—2010,建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2010,Code for seismic design of buildings[S].
- [18] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010,Code for design of concrete structures[S].
- [19] JGJ 3—2010,高层建筑混凝土结构技术规程[S].
JGJ 3—2010,Technical specification for concrete structures of high-rise building[S].
- [20] 许卫晓,程扬,杨伟松,等. RC 框架-抗震墙并联结构体系拟静力试验[J]. *吉林大学学报(工学版)*,2021,51(1):268-277.
XU Weixiao,CHENG Yang,YANG Weisong,et al. Quasi-static test of RC frame-seismic wall dual structural system[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*,2021,51(1):268-277.