

再生混凝土梁剪切性能研究*

Study on the Shear Behavior of Recycled Concrete Beams

王 凯, 范路生, 孙 畅, 刘 琼

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘 要: 基于决策树和随机森林两种机器学习算法分别建立再生混凝土梁抗剪承载力预测模型, 将大量随机配合比输入再生混凝土梁抗剪承载力预测模型中, 确定获得最大抗剪承载力时, 各配合比因素的最佳范围。结果表明: 随机森林算法对于再生混凝土梁抗剪承载力的预测精度优于决策树算法; 随机森林算法模型的均方根误差为 0.338、平均绝对误差为 0.253、平均绝对百分比误差为 11.57、拟合优度为 0.913; 为获得最大抗剪承载力, 再生混凝土梁的最佳再生粗骨料取代率为 50%, 最佳横向钢筋配筋率为 0.2%, 最佳纵向钢筋配筋率为 2.5%, 最佳剪跨比范围为 0.8~1.1, 最佳混凝土抗压强度为 55 MPa。

关键词: 再生混凝土梁; 抗剪承载力; 决策树; 随机森林; 预测

中图分类号: TU528.59

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 04-0006-09

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.04.002

WANG Kai, FAN Lusheng, SUN Chang, LIU Qiong

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The prediction models of recycled concrete beam shear capacity are established based on decision tree and random forest machine learning algorithms. By inputting a large number of random mix proportions into the shear bearing capacity prediction model of recycled concrete beams, the optimal range of mix proportion factors is determined to obtain the maximum shear bearing capacity. The results show that the prediction accuracy of the random forest algorithm for the shear capacity of recycled concrete beams is better than that of the decision tree algorithm. The root mean square error of the random forest algorithm model is 0.338, the mean absolute error is 0.253, the mean absolute percentage error is 11.57, and the coefficient of determination is 0.913; In order to obtain the maximum shear bearing capacity, the optimal recycled coarse aggregate replacement ratio of recycled concrete beams is 50%, the optimal transverse reinforcement ratio is 0.2%, the optimal longitudinal reinforcement ratio is 2.5%, the optimal shear span ratio is 0.8~1.1, and the optimal concrete compressive strength is 55 MPa.

Keywords: recycled concrete beam; shear capacity; decision tree; random forest; prediction

0 引言

建筑行业快速发展产生了大量的建筑固废, 对资源可持续发展和自然环境产生了不利的影响^[1-2]。再生骨料混凝土 (Recycled aggregate concrete, RAC) 是通过再利用混凝土废物, 经过破碎、清洗、分级后, 按一定的比例与级配混合, 部分或全部代替砂、石等天然集料, 不但解决了建筑固废的堆放问题,

* 基金项目: 上海市科技创新行动计划启明星项目 (22QC1400900)。

作者简介: 王 凯 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为混凝土材料。

通信作者: 孙 畅 (1987—), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 再生混凝土结构研究。

收稿日期: 2023-10-07

还带来了经济和环保上的收益^[3-5]。

对再生混凝土材料性能的研究已经取得了一定的成果^[6-8],研究发现,再生混凝土的工作性能低于普通混凝土^[9],当再生粗骨料(Recycled Coarse Aggregate, RCA)取代率不高时,再生混凝土的抗压强度和抗拉强度不会明显降低甚至会有所提高^[10-14]。近年来,对再生混凝土结构构件的研究越来越多^[15-18],剪切破坏是混凝土结构构件最危险的破坏模式之一,构件的抗剪强度是结构设计中的一个重要依据。然而,剪切破坏影响因素众多,剪力传递机理复杂,目前还没有系统的再生混凝土剪切传递理论,严重影响了再生混凝土作为混凝土结构建筑材料的广泛使用。

将机器学习和人工智能算法应用于土木工程领域已经成为当下研究热点。在建筑材料方面,学者们^[19-20]利用机器学习算法来预测混凝土的抗压强度,在结构分析和设计中机器学习也被广泛应用^[21-22]。对于梁的抗剪承载力研究,Goh^[23]通过机器学习中的神经网络模型对其进行了预测,Sanad等^[24]将人工神经网络模型运用于预测梁抗剪强度。以上研究表明,机器学习是一种有效预测钢筋混凝土梁抗剪承载力的方法。

鉴于此,通过决策树和随机森林两种机器学习算法,建立再生混凝土梁抗剪承载力预测模型,基于前人的试验数据验证该模型的可靠性,借助该模型研究再生混凝土梁配合比因素的最佳取值范围,可为再生混凝土梁的配合比设计和优化提供指导。

1 再生混凝土梁抗剪承载力影响因素

1.1 再生粗骨料取代率的影响

学者们^[25-36]研究了再生粗骨料取代率对再生混凝土梁抗剪承载力的影响。由图1可以发现,再生混凝土梁抗剪承载力与普通混凝土梁抗剪承载力的比值在0.61~1.12,随着再生粗骨料取代率的提高,再生混凝土梁抗剪承载力出现略微下降。邓志恒等^[26]、Choi等^[27]发现,当再生粗骨料取代率为100%时,再生混凝土梁相较于普通混凝土梁,抗剪承载力分别下降了25%、39%。这是由于再生粗骨料压碎指标低,存在初始微裂缝等特征,在梁受力过程中,其对裂缝开展具有促进作用,从而降低

再生混凝土梁的抗剪承载力^[37-38]。Ignjatović等^[30]、Kannck等^[39]发现再生混凝土梁与普通混凝土梁剪切性能和抗剪强度非常相似,再生粗骨料取代率的增加,导致再生混凝土梁抗弯刚度的下降,但对梁抗剪强度影响较小。

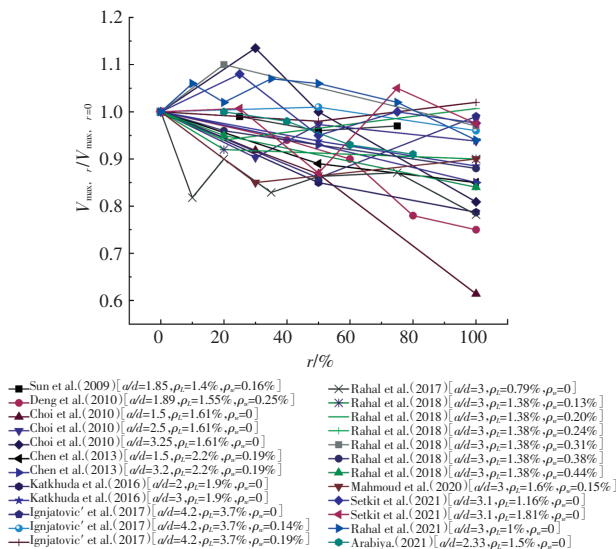


图1 再生粗骨料取代率对再生混凝土梁抗剪承载力的影响
Fig.1 Effect of recycled coarse aggregate replacement rate on shear capacity of recycled concrete beams

1.2 剪跨比的影响

学者们^[27,29,40-42]研究了剪跨比对再生混凝土梁抗剪承载力的影响。由图2可以发现,随着剪跨比的增加,再生混凝土梁抗剪承载力下降幅度为19%~65%。Choi^[27]以剪跨比为变量,研究了当剪跨比分别为1.75、2.50、3.25时再生混凝土梁的抗剪承载力,研究结果表明,相比于剪跨比为1.75时,梁极限抗剪承载力分别下降了43%、53%。这是由于当剪跨比较大时,梁最大弯矩区的弯曲裂缝随着荷载的增加开始出现倾斜剪切裂纹,并向加载点扩展,从而加速了梁整体剪切破坏的进程。

1.3 配箍率的影响

学者们^[30-31,43-45]研究了配箍率对再生混凝土梁抗剪承载力的影响。由图3可以发现,随着配箍率的增加,再生混凝土梁的抗剪承载力增长幅度为20%~220%。Rahal等^[31]研究发现,在无腹筋梁中,再生粗骨料削弱了骨料咬合作用和其他部分混凝土对剪切强度的贡献;而在用纵向钢筋和横向钢筋加固的再生混凝土梁中,再生粗骨料取代率对销栓作用影响较小,箍筋贡献了大部分抗剪强度。抗剪钢筋为

材料科学

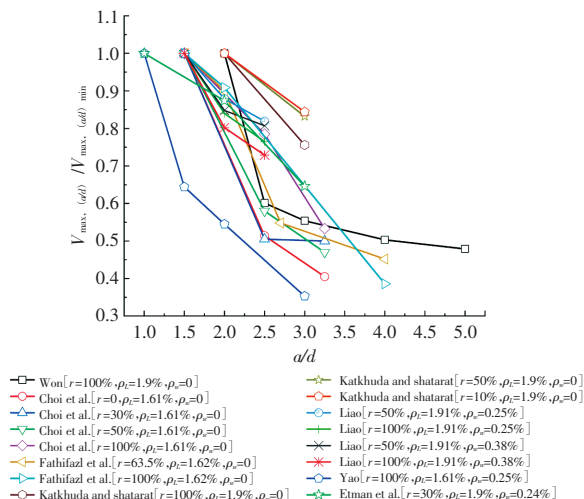


图2 剪跨比对再生混凝土梁抗剪承载力的影响

Fig. 2 Effect of shear span ratio on shear capacity of recycled concrete beams

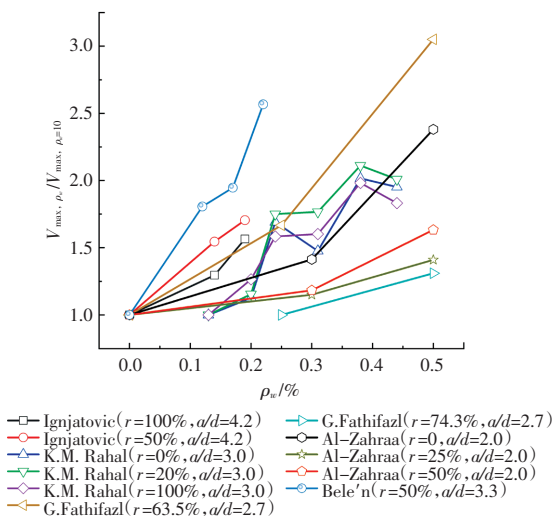


图3 配箍率对再生混凝土梁抗剪承载力的影响

Fig. 3 Effect of stirrup ratio on shear capacity of recycled concrete beams

纵向受拉钢筋提供支撑,提高了销栓作用的贡献并且提高了梁的延性^[34],因此,在有腹筋梁中使用再生粗骨料危害性更小。Ignjatović 等^[30]以 0、0.14% 和 0.19% 的配箍率为变量对再生混凝土梁剪切性能进行了研究,发现再生混凝土有腹筋梁随着配箍率的增加抗剪承载力显著提高,破坏模式与再生粗骨料取代率无关;在无腹筋梁中,再生混凝土与天然混凝土开裂角度有一定的差异。Zahraa 等^[44]以 0、0.3%、0.5% 的配箍率为变量,对梁进行了剪切性能研究,研究发现提高配箍率可以改善梁的延性,防止梁突然破坏,从而提高了梁的抗剪承载力。

1.4 混凝土强度的影响

学者们^[39,46-47]研究了混凝土强度对再生混凝土梁抗剪承载力的影响。由图 4 可以发现,随着混凝土强度的增加,再生混凝土梁的抗剪承载力增长幅度为 6%~95%。张闻^[46]研究了 C20~C50 强度下再生混凝土梁极限抗剪承载力,相比于 C20 混凝土, C30、C40、C50 再生混凝土梁极限抗剪承载力分别增长了 21%、44%、69%。这是由于随着混凝土强度等级的提高,箍筋和混凝土间的黏结强度也随之提高,在梁受力过程中,斜裂缝的开展会受到箍筋的约束作用,当梁剪压区的主应力超过混凝土的抗压强度时,再生混凝土梁发生破坏。

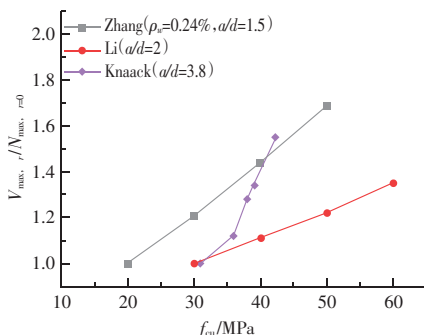


图4 混凝土强度对再生混凝土梁抗剪承载力的影响

Fig. 4 Effect of concrete strength on shear capacity of recycled concrete beams

2 再生混凝土抗剪承载力预测模型的建立

2.1 决策树

决策树的目标是在预测器中创建分区,并在每个分区中拟合一个简单的决策树模型,每个区域的输出被平均以获得最终输出,以便可以基于输入变量之间的分区来预测目标变量。决策树算法的计算过程是递归地构建二叉决策树,每棵树包含内部节点、叶子节点和有向边三部分^[21],在每次分割中,通过选择分割点和变量获得最佳拟合,决策树回归结果表示为

$$f(x) = \sum_{m=1}^M C_m I \quad x \in R_m, m = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

式中: $f(x)$ 为决策树预测结果; R_m 为输入空间划分的第 m 个区域; C_m 为区域 R_m 上的决策树输出; I 为指示函数,表示数据 x 是否属于 R_m ,当 $x \in R_m$ 时 $I=1$,否则 $I=0$ 。

2.2 随机森林

随机森林算法是一种构建决策树集合的方法，在训练过程中随机选择特征属性作为候选分割属性，生成许多相关的决策树。结合随机子空间和 Bagging 理论，以决策树为基础学习器，从同一源数据集采样的许多相似数据集构建决策树集合。使用 Bagging 方法组合所有决策树，从而构建一个森林以减少单棵决策树的波动，随机森林回归结果表示为：

$$\overline{H}(x) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (h_i(x, \theta_k))$$

(2)

式中： $\overline{H}(x)$ 为随机森林预测结果； h_i 为单棵决策树； θ_k 为决定单棵决策树生长过程的独立分布随机变量； K 为决策树个数。

2.3 数据样本

从国内外再生混凝土梁剪切性能试验中共收集到

300 条再生混凝土梁抗剪承载力试验数据^[48-80]。试验数据显示，再生粗骨料取代率的分布范围为 0~100%，横向钢筋配筋率的分布范围为 0~0.44%，纵向钢筋配筋率的分布范围为 0.53%~3.20%，剪跨比的分布范围为 0.7~5.0，混凝土抗压强度的分布范围为 21~60 MPa，抗剪承载力的分布范围为 0.71~5.79 MPa。

图 5 显示了所收集到数据的再生混凝土梁抗剪承载力和各因素之间的相关性及其统计分布。从图中可以看出，配筋率、混凝土强度和再生混凝土梁抗剪承载力之间存在着一定的正相关关系，剪跨比和再生混凝土梁抗剪承载力之间存在着一定的负相关关系，而再生粗骨料取代率与再生混凝土梁抗剪承载力之间未呈现出明显的相关性趋势，且各因素基本上都呈现出正态分布的规律。

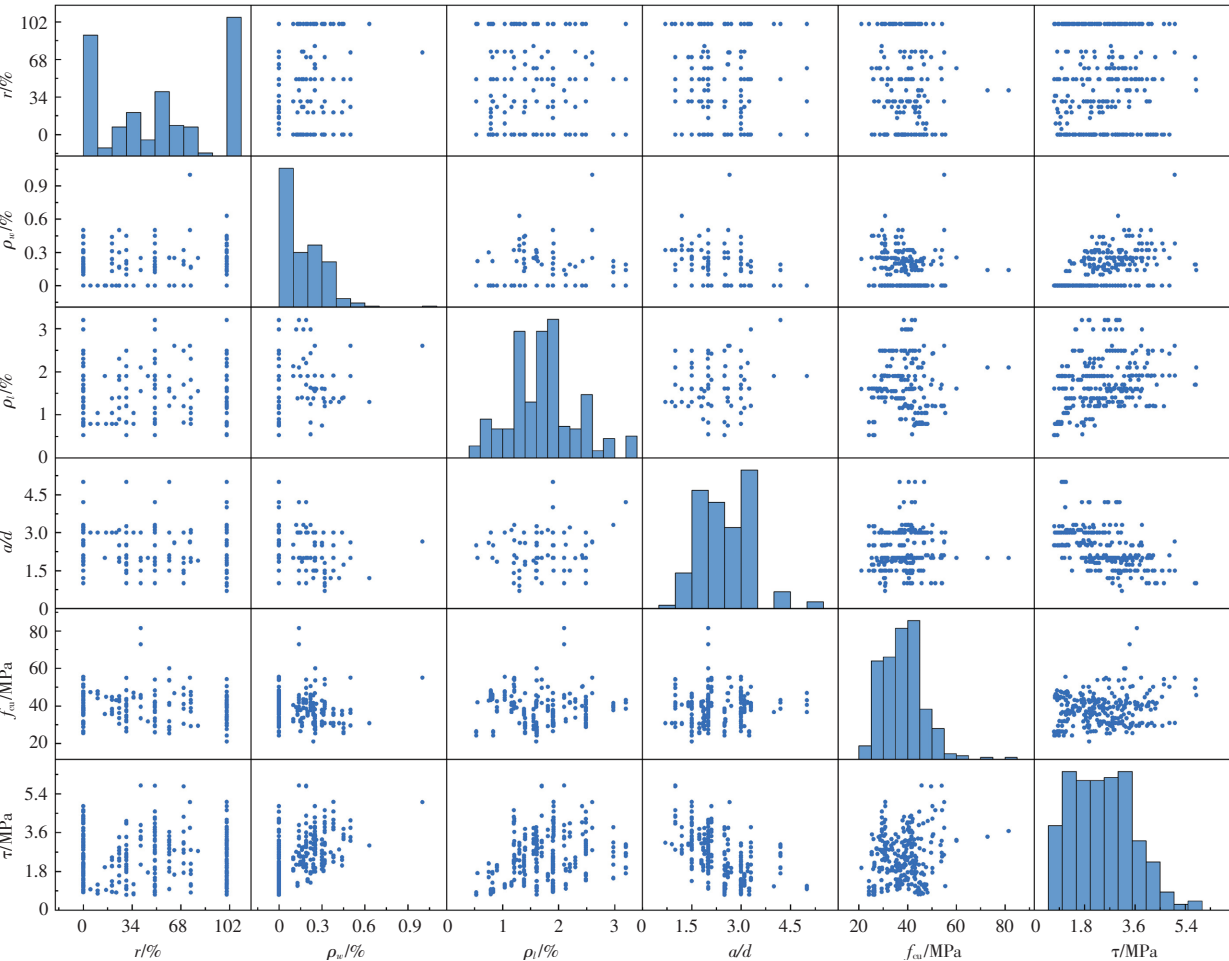


图 5 再生混凝土梁抗剪承载力数据分布图
Fig. 5 Distribution of shear capacity data of recycled concrete beam

材料科学

2.4 结果与讨论

在构建完再生混凝土梁抗剪承载力数据集后,按照 8:2 的比例随机将数据集划分为训练集和测试集两部分,将再生粗骨料取代率、横向钢筋配筋率、纵向钢筋配筋率、剪跨比、混凝土抗压强度作为模型输入参数,再生混凝土梁抗剪承载力作为模型输出参数。通过模型性能评价指标来评估再生混凝土梁抗剪承载力预测模型性能,这些指标不仅可以量化单个模型的预测精度,还可以比较不同模型的性能,确定对特定数据库具有最高适用性的模型,其定义如下:

均方根误差 (RMSE):

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

平均绝对误差 (MAE):

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

平均绝对百分比误差 (MAPE):

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

拟合优度 (R^2):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}$$
 (6)

式中: y_i 为实际值; $\hat{y}_i$ 为预测值; $\bar{y}_i$ 为实际值的平均值; n 为测试数据样本的数量。 $RMSE$ 反映预测值和实际值之间的偏差, MAE 反映预测误差的实际情况, $MAPE$ 反映预测误差与实际值的比率, R^2 显示预测值和实际值之间的线性相关程度。 $RMSE$ 、 MAE 、 $MAPE$ 越小, 并且 R^2 越接近 1, 则预测模型性能越好。

表 1 为决策树和随机森林算法用于再生混凝土梁抗剪承载力预测的性能结果。可以发现, 决策树和随机森林算法均达到了较为满意的预测效果, 且随机森林算法的预测精度更高。

表 1 决策树和随机森林算法预测性能结果

Table 1 Prediction performance results of decision tree and random forest algorithms

算法	RMSE	MAE	MAPE	R^2
决策树	0.364	0.277	12.81	0.899
随机森林	0.338	0.253	11.57	0.913

图 6 为基于决策树和随机森林算法下再生混凝土梁抗剪承载力预测值和实际值之间的关系。图中 45° 线表示预测值和实际值的接近程度, 点距离直线越近, 表示预测值越接近实际值, 模型预测的准确率越高, 点距离直线越远, 表示预测值越偏离实际值, 模型预测的准确率越低。从图中同样可以看出, 决策树和随机森林算法均达到了较为满意的预测效果, 但随机森林模型算法的预测值与实际值更加接近。因此, 随机森林算法更适用于预测再生混凝土梁的抗剪承载力。

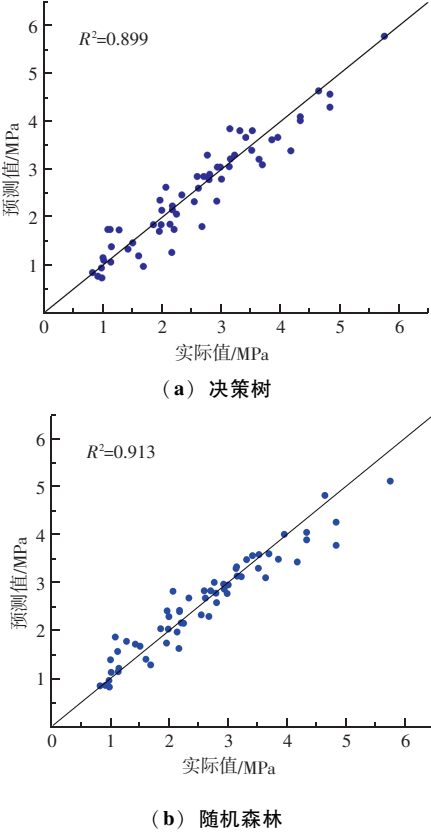


图 6 决策树和随机森林算法预测结果图

Fig. 6 Prediction results of decision tree and random forest algorithm

3 再生混凝土梁配合比最佳范围

建立的随机森林算法模型具有较高的可靠度, 可以用于再生混凝土梁抗剪承载力的预测。将一定范围内生成大量随机配合比输入到随机森林算法模型中, 可以输出对应配合比的再生混凝土梁抗剪承载力的预测值。通过分析得到的预测值中抗剪承载力高的配合比因素分布, 可以确定为获得最大抗剪承载力时, 再生混凝土梁各配合比因素的最佳范围,

从而更好地指导再生混凝土梁配合比设计。

为了确定再生混凝土梁配合比因素的最佳范围，需要对每种配合比因素范围施加一定的约束。结合收集的数据范围及实际工程需求，取再生粗骨料取代率的约束范围为 0~100%，横向钢筋配筋率的约束范围为 0~0.5%，纵向钢筋配筋率的约束范围为 0~4%，剪跨比的约束范围为 0.7~5.0，混凝土抗压强度的约束范围为 30~60 MPa。

在限定的配合比因素取值范围内，随机生成 5000 条配合比，将随机生成的配合比输入到再生混凝土梁抗剪承载力预测模型中，其预测结果分布如图 7 所示。可以看到，抗剪承载力呈现出正态分布规律，其分布范围为 0.80~5.42 MPa，主要集中在 3 MPa 附近。

将 5000 条配合比根据抗剪承载力从大到小进行排序，排名前 50 名的配合比各因素分布如图 8 所示。可以发现各配合比因素基本上都呈现出正态分布规律，再生粗骨料取代率的分布范围为 5%~100%，主要集中在 50% 附近；横向钢筋配筋率的分布范围为

0.14%~0.50%，主要集中在 0.20% 附近；纵向钢筋配筋率的分布范围为 1.6%~4.0%，主要集中在 2.5% 附近；剪跨比集中在 0.8~1.1；混凝土抗压强度的分布范围为 47~60 MPa，主要集中在 55 MPa 附近。

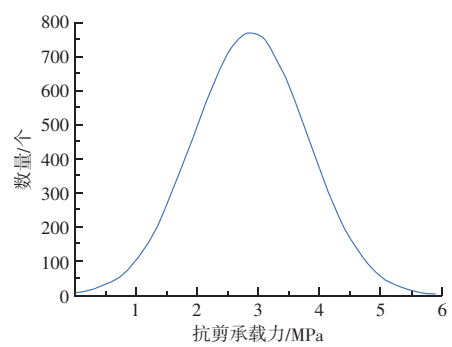


图 7 再生混凝土梁抗剪承载力预测结果分布图
Fig. 7 Distribution of prediction results of shear capacity of recycled concrete beams

因此，从排名前 50 名的配合比各因素分布结果来看，为获得最大抗剪承载力，再生混凝土梁的最佳再生粗骨料取代率为 50%，最佳横向钢筋配筋率为 0.2%，最佳纵向钢筋配筋率为 2.5%，最佳剪跨比范围为 0.8~1.1，最佳混凝土抗压强度为 55 MPa。

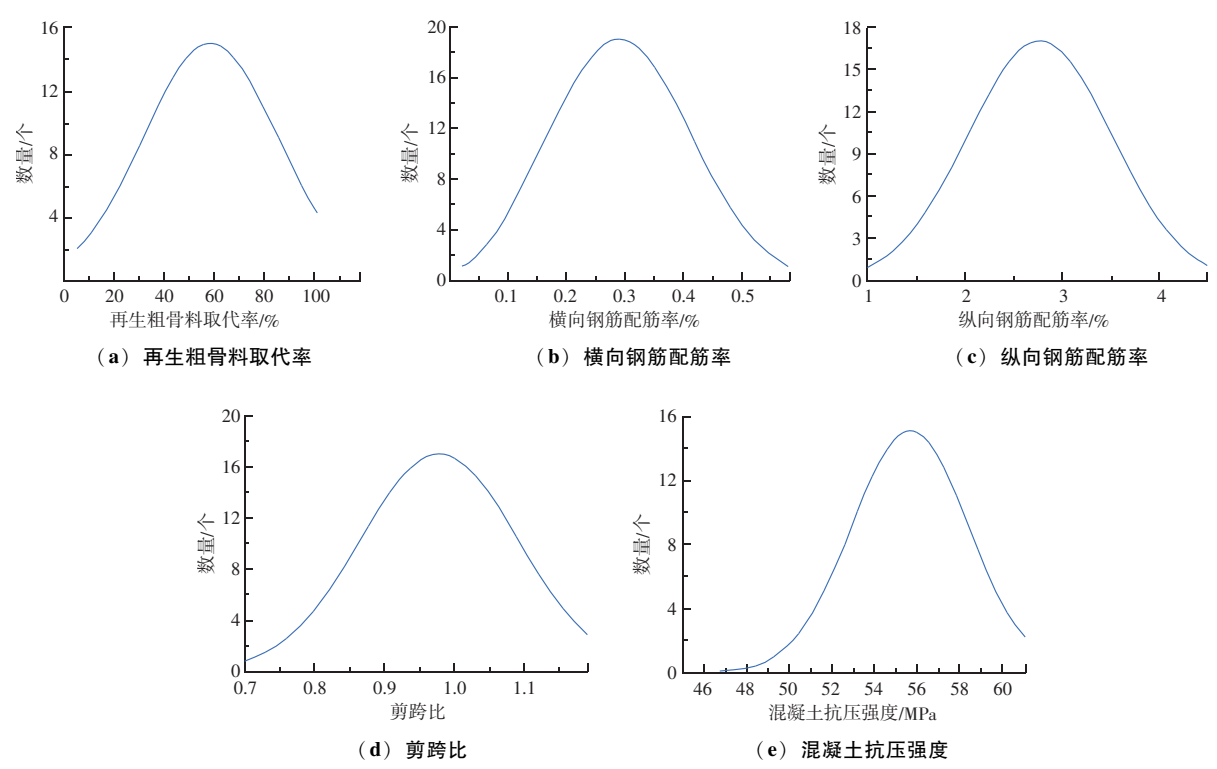


图 8 再生混凝土梁抗剪承载力前 50 名配合比各因素分布图
Fig. 8 Distribution of factors in the top 50 mix proportions of recycled concrete beam shear capacity

材料科学

4 结论

(1) 再生混凝土梁的抗剪承载力主要受再生粗骨料取代率、剪跨比、梁配箍率及混凝土强度等因素影响, 其中, 再生粗骨料取代率对抗剪承载力影响相对较小。

(2) 再生混凝土梁抗剪承载力与普通混凝土梁抗剪承载力的比值在 0.61~1.12 范围内, 随着剪跨比的增加, 再生混凝土梁抗剪承载力下降幅度为 19%~65%; 随着配箍率的增加, 再生混凝土梁的抗剪承载力增长幅度为 20%~220%; 随着混凝土强度的增加, 再生混凝土梁抗剪承载力增长幅度为 6%~95%。

(3) 决策树和随机森林算法对再生混凝土梁抗剪承载力的预测均达到了较为满意的预测效果, 其中决策树算法预测模型的 $RMSE = 0.364$ 、 $MAE = 0.277$ 、 $MAPE = 12.81$ 、 $R^2 = 0.899$, 随机森林算法预测模型的 $RMSE = 0.338$ 、 $MAE = 0.253$ 、 $MAPE = 11.57$ 、 $R^2 = 0.913$, 随机森林算法的预测精度更高。

(4) 通过随机森林算法预测再生混凝土梁抗剪承载力, 分析预测值中抗剪承载力高的配合比因素分布后发现, 为获得最大抗剪承载力, 再生混凝土梁的最佳再生粗骨料取代率为 50%, 最佳横向钢筋配筋率为 0.2%, 最佳纵向钢筋配筋率为 2.5%, 最佳剪跨比范围为 0.8~1.1, 最佳混凝土抗压强度为 55 MPa。

参考文献

[1] 李文贵, 龙初, 罗智予, 等. 再生骨料混凝土破坏机理与改性研究综述 [J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33 (6): 60-72.

[2] 甘福, 周脉席, 濮琦. 再生粗骨料及再生混凝土性能研究进展 [J]. 混凝土与水泥制品, 2018 (9): 102-107.

[3] 邓寿昌, 张学兵, 罗迎社. 废弃混凝土再生利用的现状分析与研究展望 [J]. 混凝土, 2006 (11): 20-24.

[4] 成全, LING T C, 李波. 再生混凝土多次搅拌工艺综述 [J]. 混凝土, 2019 (7): 140-144.

[5] 肖建庄. 再生混凝土 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

[6] POON C S, SHUI Z H, LAM L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2004, 18 (6): 461-468.

[7] SILVA R V, DE B J, DHIR R K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for

concrete production [J]. Construction and Building Materials, 2014, 65: 201-217.

[8] TAM V W Y, SOOMRO M, EVANGELISTA A C J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000-2017) [J]. Construction and Building Materials, 2018, 172: 272-292.

[9] MEFTEH H, KEBAILI O, OUCIEF H, et al. Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete [J]. Journal of cleaner production, 2013, 54: 282-288.

[10] 李秋义, 全洪珠, 秦原. 混凝土再生骨料 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

[11] PENG Q, WANG L, LU Q. Influence of recycled coarse aggregate replacement percentage on fatigue performance of recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 169: 347-353.

[12] ANDREU G, MIREN E. Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014, 52: 227-235.

[13] XIAO J, LI J, ZHANG C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35 (6): 1187-1194.

[14] RYU J S. Improvement on strength and impermeability of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate [J]. Materials Science Letters, 2002, 21 (20): 1565-1567.

[15] HE A, CAI J, CHEN Q J, et al. Axial compressive behaviour of steel-jacket retrofitted RC columns with recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2017, 141: 501-516.

[16] PACHECO J, DE B J, CHASTRE C, et al. Uncertainty models of reinforced concrete beams in bending: Code comparison and recycled aggregate incorporation [J]. Journal of Structural Engineering, 2019, 145 (4): 04019013.

[17] WANG X, LIU B, ZHANG C. Cyclic torsion performance of recycled aggregate concrete beams with or without fly ash [J]. Construction and Building Materials, 2017, 132: 529-542.

[18] LI Z, JIN Z, FANG G. Comparative analysis of flexural performance of recycled concrete two-way composite slab and ordinary concrete two-way slab [C] //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021, 687 (1): 012146.

[19] DAO D V, LY H B, TRINH S H, et al. Artificial intelligence approaches for prediction of compressive strength of geopolymer concrete [J]. Materials, 2019, 12 (6): 983.

[20] LY H B, PHAM B T, DAO D V, et al. Improvement of ANFIS model for prediction of compressive strength of manufactured sand concrete [J]. Applied Sciences, 2019, 9 (18): 38-41.

[21] NGUYEN Q H, LY H B, TRAN V Q, et al. A novel hybrid model based on a feedforward neural network and one step secant

- algorithm for prediction of load – bearing capacity of rectangular concrete – filled steel tube columns [J]. *Molecules*, 2020, 25 (15): 3486.
- [22] NGUYEN H Q, LY H B, TRAN V Q, et al. Optimization of artificial intelligence system by evolutionary algorithm for prediction of axial capacity of rectangular concrete filled steel tubes under compression [J]. *Materials*, 2020, 13 (5): 1205.
- [23] GOH A T C. Prediction of ultimate shear strength of deep beams using neural networks [J]. *Structural Journal*, 1995, 92 (1): 28–32.
- [24] SANAD A, SAKA M P. Prediction of ultimate shear strength of reinforced – concrete deep beams using neural networks [J]. *Journal of structural engineering*, 2001, 127 (7): 818–828.
- [25] 周彬彬, 孙伟民, 郭樟根, 等. 再生混凝土梁抗剪承载力试验研究 [J]. *四川建筑科学研究*, 2009, 35 (6): 16–18.
- [26] 邓志恒, 杨海峰, 罗延明, 等. 再生混凝土有腹筋简支梁斜截面抗剪试验研究 [J]. *工业建筑*, 2010, 40 (12): 47–50.
- [27] CHOI H B, YI C K, CHO H H, et al. Experimental study on the shear strength of recycled aggregate concrete beams [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2010, 62 (2): 103–114.
- [28] 陈宗平, 范杰, 叶培欢, 等. 钢筋再生混凝土梁受力性能试验研究 [J]. *建筑结构*, 2013, 43 (9): 92–95.
- [29] KATKHUHA H, SHATARAT N. Shear behavior of reinforced concrete beams using treated recycled concrete aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 125: 63–71.
- [30] IGNJATOVIĆ I S, MARINKOVIĆ S B, TOŠIĆ N. Shear behaviour of recycled aggregate concrete beams with and without shear reinforcement [J]. *Engineering Structures*, 2017, 141: 386–401.
- [31] RAHAL K N, ALREFAEI Y T. Shear strength of recycled aggregate concrete beams containing stirrups [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 191: 866–876.
- [32] RAHAL K N, ALREFAEI Y T. Shear strength of longitudinally reinforced recycled aggregate concrete beams [J]. *Engineering Structures*, 2017, 145: 273–282.
- [33] RAHAL K N, ELSAYED K. Shear strength of 50 MPa longitudinally reinforced concrete beams made with coarse aggregates from low strength recycled waste concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 286: 122835.
- [34] MAHMOUD F, BOISSIERE R, Mercier C, et al. Shear behavior of reinforced concrete beams made from recycled coarse and fine aggregates [C] // *Structures*. Elsevier, 2020, 25: 660–669.
- [35] SETKIT M, LEELATANON S, IMJAI T, et al. Prediction of shear strength of reinforced recycled aggregate concrete beams without stirrups [J]. *Buildings*, 2021, 11 (9): 402.
- [36] ARABIYAT S, KATKHUHA H, SHATARAT N. Influence of using two types of recycled aggregates on shear behavior of concrete beams [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 279: 122475.
- [37] FOLINO P, XARGAY H. Recycled aggregate concrete – mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 56: 21–31.
- [38] MATIAS D, DE B J, ROSA A, et al. Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – influence of the use of superplasticizers [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 44: 101–109.
- [39] KNAACK A M, KURAMA Y C. Behavior of reinforced concrete beams with recycled concrete coarse aggregates [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 141 (3): B4014009.
- [40] ELSANADEDY H M, ABBAS H, AL – SALLOUM Y A, et al. Shear strength prediction of HSC slender beams without web reinforcement [J]. *Materials and Structures*, 2016, 49 (9): 3749–3772.
- [41] CHOI W C, YUN H D. Shear strength of reinforced recycled aggregate concrete beams without shear reinforcements [J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2017, 23 (1): 76–84.
- [42] FATHIFAZL G, RAZAQPUR A G, ISGOR O B, et al. Shear strength of reinforced recycled concrete beams without stirrups [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2009, 61 (7): 477–490.
- [43] FATHIFAZL G, RAZAQPUR A G, BURKAN I O, et al. Shear capacity evaluation of steel reinforced recycled concrete (RRC) beams [J]. *Engineering Structures*, 2011, 33 (3): 1025–1033.
- [44] ZAHRAA F A, MIHILMY M T E, BAHAA T. Experimental investigation of shear strength of concrete beams with recycled concrete aggregates [J]. *International Journal of Materials and Structural Integrity*, 2011, 5 (4): 291–310.
- [45] GONZALEZ F B, MARTINEZ A F. Shear strength of recycled concrete beams [J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21 (4): 887–893.
- [46] 张闻. 再生粗骨料钢筋混凝土梁抗剪性能试验研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [47] LI C, LIANG N, ZHAO M, et al. Shear performance of reinforced concrete beams affected by satisfactory composite – recycled aggregates [J]. *Materials*, 2020, 13 (7): 1711.
- [48] PACHECO J N, DE B J, CHASTRE C, et al. Uncertainty of shear resistance models; Influence of recycled concrete aggregate on beams with and without shear reinforcement [J]. *Engineering Structures*, 2020, 204: 109905.
- [49] CARDOSO A C, LIMA I G, FERREIRA M P, et al. Influence of recycled concrete aggregates on the shear strength of reinforced concrete beams [J]. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 2021, 14 (1): e14109.
- [50] GONZALEZ F B, MARTINEZ A F. Shear strength of recycled concrete beams [J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21 (4): 887–893.

材料科学

- [51] 肖建庄, 朱永明, 王璞瑾, 等. 再生混凝土 U 型叠合梁抗剪性能 [J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29 (2): 1-6.
- [52] 廖一. 再生粗骨料混凝土抗剪强度及梁的抗剪性能试验研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2013.
- [53] 姚坤奇. 混合骨料钢筋混凝土梁抗剪性能试验研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018.
- [54] ETMAN E E, AFEFY H M, BARAGHITH A T, et al. Improving the shear performance of reinforced concrete beams made of recycled coarse aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2018, 185: 310-324.
- [55] GAMBAROVA P G, KARAKOÇ C. A new approach to the analysis of the confinement role in regularly cracked concrete elements [J]. 1983.
- [56] NBR A. Projeto de estruturas de concreto [J]. Rio de Janeiro, 2014.
- [57] TOŠIĆ N, MARINKOVIĆ S, IGNJATOVIĆ I. A database on flexural and shear strength of reinforced recycled aggregate concrete beams and comparison to Eurocode 2 predictions [J]. Construction and Building Materials, 2016, 127: 932-944.
- [58] 倪天宇, 孙伟民, 郭樟根, 等. 再生混凝土无腹筋梁抗剪承载力试验研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36 (1): 5-7.
- [59] 张雷顺. 再生混凝土无腹筋梁斜截面受力性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2007, 37 (9): 57-61.
- [60] 彭长岭, 刘华新, 陈明, 等. 再生粗骨料取代率对无腹筋 BFRP 筋再生混凝土梁抗剪性能的影响 [J]. 建筑结构, 2020, 50 (22): 89-92, 98.
- [61] SETKIT M, LEELATANON S, IMJAI T, et al. Prediction of shear strength of reinforced recycled aggregate concrete beams without stirrups [J]. Buildings, 2021, 11 (9): 402.
- [62] ETXEBERRIA M, VAZQUEZ E, MARI A. The role and influence of recycled aggregate concrete [C] // Proceedings of the international RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures. 2004: 612-622.
- [63] SOGO M, SOGABE T, MARUYAMA I, et al. Shear behavior of reinforced recycled concrete beams [C] // Proceedings of the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, Barcelona, Spain. 2004: 8-11.
- [64] 刘华新, 柳根金, 王学志, 等. BFRP 筋再生混凝土无腹筋深梁抗剪承载力 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2015, 47 (5): 17-22.
- [65] 韩定杰, 刘华新, 张志金, 等. 玄武岩纤维筋全再生混凝土无腹筋梁受剪性能试验研究 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2017 (8): 76-82.
- [66] LIU H X, YANG J W, WANG X Z, et al. Experimental study on shear behavior of BFRP-reinforced recycled aggregate concrete deep beams without stirrups [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21 (6): 2289.
- [67] SANTOS P M D, JULIO E N B S. A state-of-the-art review on shear-friction [J]. Engineering Structures, 2012, 45: 443-448.
- [68] RUIZ M F, MUTTONI A, SAGASETA J. Shear strength of concrete members without transverse reinforcement: A mechanical approach to consistently account for size and strain effects [J]. Engineering Structures, 2015, 99: 360-372.
- [69] HUBER T, HUBER P, KOLLEGGGER J. Influence of aggregate interlock on the shear resistance of reinforced concrete beams without stirrups [J]. Engineering Structures, 2019, 186: 26-42.
- [70] 赵靖芸, 杨秋伟, 张莹, 等. 再生混凝土无腹筋梁抗剪性能尺寸效应试验研究 [J]. 混凝土, 2018 (6): 39-42.
- [71] MATTOCK A H, HAWKINS N M. Shear transfer in reinforced concrete-recent research [J]. Pci Journal, 1972, 17 (2): 55-75.
- [72] WONG R C K, MA S K Y, WONG R H C, et al. Shear strength components of concrete under direct shearing [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37 (8): 1248-1256.
- [73] LIN F, LU H, DONG Y. Component model for shear transfer in reinforced concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2016, 68 (15): 755-767.
- [74] LIN F, GUO J. Shear transfer of concrete strengthened using bolted steel plates [J]. Construction and Building Materials, 2019, 212: 109-120.
- [75] WALRAVEN J C, REINHARDT H W. Theory and experiments on mechanical behaviour of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading [J], Heron, 1981, 26: 249-266.
- [76] 黄靓, 秦明珠, 邓鹏, 等. 基于试验数据的再生混凝土梁极限承载力计算方法及可靠度研究 [J]. 建筑结构, 2021, 51 (11): 73-81.
- [77] 白雅嘉, 刘华新, 李庆文, 等. 无腹筋玄武岩纤维筋再生混凝土梁抗剪性能 [J]. 工业建筑, 2020, 50 (4): 156-161, 137. DOI: 10.13204/j.gyjz.202004027.
- [78] YANG Q W, PENG X, SUN Y. Shear capacity evaluation of the recycled concrete beam [J]. Materials, 2022, 15 (10): 3693.
- [79] JULIANA T, SERGIO G, GABRIEL F. Experimental study of direct shear in concrete with recycled aggregate [J]. ACI Structural Journal, 2020, 117 (5): 233-243.
- [80] ATARIA R B, WANG Y C. Evaluating the interfacial shear strength and bonding properties of recycled aggregate concrete for two-layer beams application [J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2022, 7 (5): 1-9.