

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202404022024081989

文章编号: 1674-599X(2024)04-0011-10

引用格式: 喻奇洋. 蛋壳粉泡沫混凝土性能分析及预测[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(4): 11-20.

Citation: YU Qiyang. Eggshell powder foam concrete performance analysis and prediction[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(4): 11-20.

蛋壳粉泡沫混凝土性能分析及预测

喻奇洋

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610047)

摘要: 为了探究蛋壳粉部分替代水泥制备绿色低碳型泡沫混凝土的可行性, 提出一种预测蛋壳粉泡沫混凝土性能的方法。首先通过室内试验测试, 分析蛋壳粉替代率对泡沫混凝土吸水率、力学强度以及孔隙结构的影响, 然后基于试验数据采用机器学习方法建立模型, 预测蛋壳粉泡沫混凝土的性能。研究结果表明: 掺入蛋壳粉会降低泡沫混凝土试样的初始表面吸收率、吸水率; 掺入蛋壳粉有助于提升泡沫混凝土的抗压、抗折强度, 蛋壳粉替代率为15%的泡沫混凝土强度最高; 泡沫体积的增大使孔隙尺寸扩大, 大孔隙体积占比增加; 蛋壳粉填充效果较好, 掺加15%蛋壳粉致使泡沫混凝土中小孔隙体积占比增大而大孔隙体积占比减小; 所建立的机器学习模型可有效预测蛋壳粉泡沫混凝土的性能; 与决策树模型相比, 随机森林模型预测结果的精确度更高。

关键词: 蛋壳粉; 泡沫混凝土; 绿色材料; 性能预测; 机器学习

中图分类号: U444

文献标志码: A

Eggshell powder foam concrete performance analysis and prediction

YU Qiyang

(Sichuan Transportation Construction Group Co., Ltd., Chengdu 610047, China)

Abstract: The aim of this study is to investigate the feasibility of partially replacing cement with eggshell powder to prepare green and low-carbon foam concrete, and to propose a method to predict the performance of eggshell powder foam concrete. In this study, the laboratory experiments were first conducted to analyze the influences of eggshell powder content on water absorption, mechanical strength, and pore structure of foam concrete. Subsequently, based on the experimental results, a model to predict the performance of eggshell powder foam concrete was proposed using the machine learning approach. Results indicate that foam concrete specimens mixed with eggshell powder exhibit reduced initial surface absorption rate and water absorption rate. Additionally, the addition of eggshell powder can improve the compressive and flexural strength of foam concrete, with the highest strength observed at a 15% substitution rate. Furthermore, the increase in foam volume leads to pore size expansion, with large pores accounting for a greater proportion of the foam volume as a result of eggshell powder addition. Notably, the filler effect of eggshell powder is more pronounced, with an addition of 15% eggshell powder leading to an increase in the proportion of small and large pores in the foam concrete. The machine learning model developed in this study demonstrates its effectiveness in predicting the performance of foam concrete containing eggshell powder. When compared with the decision tree model, the prediction results of the random forest model exhibit higher accuracy.

Key words: eggshell powder; foamed concrete; green material; performance prediction; machine learning

收稿日期: 2024-04-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978579)

通信作者: 喻奇洋(1989—), 男, 工程师, 主要从事交通道路与桥梁方面的研究工作。E-mail: yuqiyang20242024@163.com

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

新材料的合成和表征是一个非常重要的课题,涉及多个应用领域^[1]。另一方面,基于可持续发展原则,对固体废料的合理使用在各个领域都受到了广泛的关注^[2]。而由于建筑行业自身的特点,其在过去的几十年里产生了大量污染物,对环境造成了严重破坏^[3]。我国年均产生的蛋壳约有400万t,主要处置方式是将其堆置在垃圾场,但这样会对生态环境造成破坏甚至危害人体健康。 CaCO_3 是蛋壳的主要成分,对水泥基复合材料中C-S-H凝胶的生长至关重要^[4]。将蛋壳作为胶凝材料的替代品,既可减少对自然资源的开采,又能解决蛋壳的处置问题。因此,通过将蛋壳粉作为水泥替代品来改善水泥基材料的性能具有巨大的潜力^[5],有助于制备绿色混凝土,也符合可持续发展理念和“碳达峰、碳中和”的目标。

已有部分学者开展了在普通混凝土中掺加蛋壳粉的研究^[6],但对于蛋壳粉泡沫混凝土却鲜有研究。泡沫混凝土是一种主要由普通硅酸盐水泥、细骨料、水和泡沫混合而成的混凝土,具有独特的孔隙结构,具备良好的隔热、隔音、耐火等性能^[7-8],常被用在隔热保温建筑、声学工程以及地下工程等结构中。泡沫混凝土的耐久性与其孔隙结构特点密切相关,而孔隙结构特点是以渗透性来衡量的。混凝土的孔隙越大,材料就越容易受到渗透性物质的不利影响^[9]。吸水率是指非饱和多孔混凝土在毛细管吸力主导的表面张力作用下的进水量,是多孔混凝土孔隙结构的函数,现在常被用作混凝土耐久性能的预测指标。有研究表明,吸水率测试结果能够显示混凝土中不同尺寸孔隙的数量分布,孔隙率和渗透率低的混凝土通常能更好地抵御不良影响^[10-11]。部分学者致力于建立混凝土材料与其性能之间的预测模型^[12-13],从而节省时间和成本。王里等^[14]基于沙胶比建立模型预测3D打印风积沙混凝土的碳化深度;IZHAR等^[15]利用多重表达式编程来模拟废弃甘蔗渣灰混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度。目前最为前沿的混凝土性能预测模型是基于机器学习等人工智能技术建立的^[16-17]。其中,决策树和随机森林预测模型与其他深度学习模型相比,具有拟合性好、预测精度高、解释性强及适用于大规模数据等优点,并且在模型预测精度和计算速度方面效果较好^[18],因而在混凝土强度预测领域应用广泛。然而,大多数机器学习预测模型研究都集中于评估传统水泥基复合材料的强度,对蛋

壳粉泡沫混凝土性能的预测却鲜见。

因此,本研究旨在探究蛋壳粉部分替代水泥制备绿色低碳型泡沫混凝土的可行性,通过室内试验与机器学习建模的方法,分析不同蛋壳粉替代率对泡沫混凝土吸水率、力学性能以及孔隙结构的影响,并利用试验数据结合决策树模型和随机森林模型提出一种蛋壳粉泡沫混凝土的性能预测方法。该研究结果有望通过将蛋壳作为建筑材料,在一定程度上解决蛋壳的处置问题,同时降低建筑行业对沙子、水泥的需求,为蛋壳粉绿色低碳型泡沫混凝土的应用提供理论基础。

1 材料与试验

1.1 原材料选取

试验所用原材料主要包括水泥、河沙、发泡剂、减水剂、水及蛋壳粉。试验中水泥选用P·O 42.5普通硅酸盐水泥,其基本成本及基本物理参数见表1~2;试验所用细集料为成都地区的河沙,细度模数为2.7;试验用水为日常饮用水;试验所用发泡剂为动物蛋白发泡剂,将其与水按照1:30的质量比进行稀释,发泡倍数为16;减水剂为高效聚羧酸减水剂;所用蛋壳粉原材料来自某高校餐厨垃圾,经过表面清洗、烘干、初步粉碎、高温煅烧、研磨、筛分等多个处理工序后(图1),最终得到符合本试验要求的蛋壳粉,其基本成分见表1。

表1 试验用水泥、蛋壳粉基本成分及其质量分数

Table 1 Basic components and their mass fractions of cement and eggshell powder used in the experiment %

| 材料 | w (SiO_2) | w (Al_2O_3) | w (Fe_2O_3) | w (CaO) | w (MgO) | w (SO_3) | w (烧失量) |
|-----|---------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------|
| 水泥 | 21.86 | 5.63 | 3.50 | 63.08 | 2.37 | 2.51 | 2.88 |
| 蛋壳粉 | 0.01 | — | — | 97.61 | 0.49 | 0.30 | 1.08 |

表2 试验用水泥基本物理参数

Table 2 Basic physical parameters of cement used in the experiment

| 密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$) | 凝结时间/ min | | 抗压强度/ MPa | | 抗折强度/ MPa | |
|------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------|-----|--------------|------|--------------|------|
| | | 初凝 | 终凝 | 3 d | 28 d | 3 d | 28 d |
| 3.12 | 350 | 128 | 180 | 24.7 | 51.2 | 4.9 | 8.1 |



图1 试验所用蛋壳粉获取流程

Fig. 1 Process of obtaining eggshell powder for experiment

1.2 泡沫混凝土配合比设计

本研究制备了 600、1 200 kg/m³ 两种不同密度的试样,以增强本研究的适用性和有效性。此外,为探究不同蛋壳粉替代率对泡沫混凝土物理力学性能的影响,从而确定最佳配合比,本研究设计了 0%、5%、10%、15%、20% 五种不同的替代率(蛋壳粉质量与胶凝材料的质量比),其中蛋壳粉替代率 0% 的试样为对照组。不同泡沫混凝土的配合比见表 3,表中 D x - y 表示泡沫混凝土密度为 x kg/m³、蛋壳粉替代率为 y %。用 D600、D1200 分别代表密度为 600、1 200 kg/m³ 的蛋壳粉泡沫混凝土试样。

表3 材料及其配合比

| Table 3 Materials and their proportions | | | | | kg/m ³ |
|-----------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-------------------|
| 试样编号 | 水泥 | 沙子 | 水 | 蛋壳粉 | 发泡剂 |
| D600-0 | 225 | 335 | 110 | 0 | 45 |
| D600-5 | 213 | 335 | 110 | 10 | 45 |
| D600-10 | 201 | 335 | 110 | 22 | 45 |
| D600-15 | 195 | 335 | 110 | 33 | 45 |
| D600-20 | 178 | 335 | 110 | 45 | 45 |
| D1200-0 | 450 | 650 | 222 | 0 | 22 |
| D1200-5 | 420 | 650 | 222 | 22 | 22 |
| D1200-10 | 398 | 650 | 222 | 45 | 22 |
| D1200-15 | 375 | 650 | 222 | 65 | 22 |
| D1200-20 | 350 | 650 | 222 | 90 | 22 |

1.3 试样制备及测试

首先,在混凝土搅拌机内将河沙与 10% 左右的自来水混合并搅拌 5 min,以确保混合料均质;随后,继续缓慢加入剩余的水,直至沙浆达到预定稠度;之后,将干泡沫与沙浆充分混合,并将新拌轻质泡沫混凝土的密度控制在预定目标密度范围内;紧接着,将拌合完毕的轻质泡沫混凝土倒入相应模具中,立方体模具尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm,圆

柱体模具尺寸为 $\varnothing 150$ mm×150 mm。24 h 后脱模,接着在 25 ~ 30 °C 的温度下进行水固化。依照标准《蒸压加气混凝土性能试验方法》(GB/T 11969—2020)测定 90 d 龄期泡沫混凝土初始表面吸收率及吸水率。抗压、抗折强度依照《泡沫混凝土》(JG/T 266—2011)采用电液伺服万能试验机进行测试。孔隙率采用核磁共振仪进行测试。

1.4 预测模型的构建

本研究将水泥、沙子、水、高效减水剂、蛋壳粉等的参数作为机器学习方法的输入参数来预测混凝土的性能,研究策略流程如图 2 所示。用 R^2 来衡量预测结果与试验结果的差异程度,用 K 折交叉验证来检验模型的性能。决策树是一种用于分类和回归分析的常见预测模型^[19],具有可以容纳定量和定性数据的优点。随机森林是由多个决策树组成的集成学习模型^[20],用于分类和回归任务,其通过构建多个决策树来进行预测,并在构建每棵树时引入了随机性。因其偏差极小、变化极大,该模型很容易出现过拟合,而通过使用 K 折交叉验证可以防止随机森林的过拟合。吸水率误差分析的指标有平均绝对误差 e_{MAE} 、均方根误差 e_{RMSE} 及平均绝对百分比误差 e_{MAPE} ^[21-22],其计算式为:

$$e_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - E_i| \quad (1)$$

$$e_{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - E_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$e_{MAPE} = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - E_i|}{E_i} \quad (3)$$

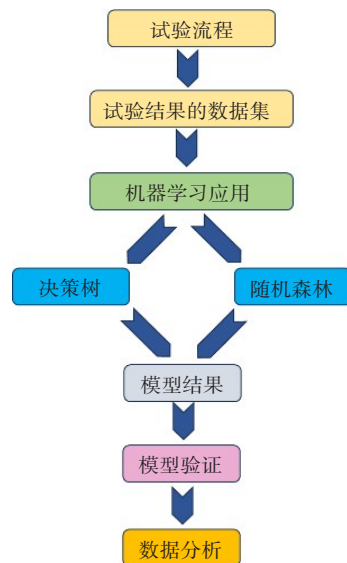


图2 研究策略流程图

Fig. 2 Flow diagram of research strategy

式中: n 为数据点数; P_i 为预测吸水率; E_i 为实测吸水率。

2 试验结果与分析

2.1 吸附特性

2.1.1 初始表面吸收率

图3所示为加入蛋壳粉对90 d龄期泡沫混凝土试样初始表面吸收率的影响。由图3可知,对于密度为 600 kg/m^3 ,蛋壳粉替代率分别为0%、5%、10%、15%、20%的试样,在浸水10 min后,其初始表面吸收率分别为3.1、3.0、2.8、2.3、1.1 $\text{mL}/(\text{s}^2\cdot\text{m})$;在浸水120 min后,其初始表面吸收率分别为0.64、0.56、0.52、0.39、0.34 $\text{mL}/(\text{s}^2\cdot\text{m})$ 。由此可知,相同浸水时长下试样的初始表面吸收率随着蛋壳粉替代率的增加而减小。与对照组相比,掺入蛋壳粉导致试样

初始表面吸收率减小。原因可能是大部分毛细孔被蛋壳粉颗粒切断、分割,仅有小部分毛细孔通道是连通的。

2.1.2 吸水率

图4为在90 d养护龄期之后,不同密度泡沫混凝土试样的吸水率与浸水时长平方根的拟合曲线。由图4可知,在90 d养护龄期后,当密度从 $1\,200\text{ kg/m}^3$ 下降到 600 kg/m^3 时,相同蛋壳粉替代率的泡沫混凝土在相同浸水时长下的吸水率有所提升。不同密度泡沫混凝土的吸水率与浸水时长平方根拟合曲线的 R^2 值均在0.9以上,表明不同密度泡沫混凝土的吸水率与浸水时长平方根之间具有较强的线性相关性。说明随着浸水时长的增加,蛋壳粉泡沫混凝土吸水率的变化具有明显的规律性,且这种规律性变化能够通过浸水时长的平方根来较好地描述和预测。

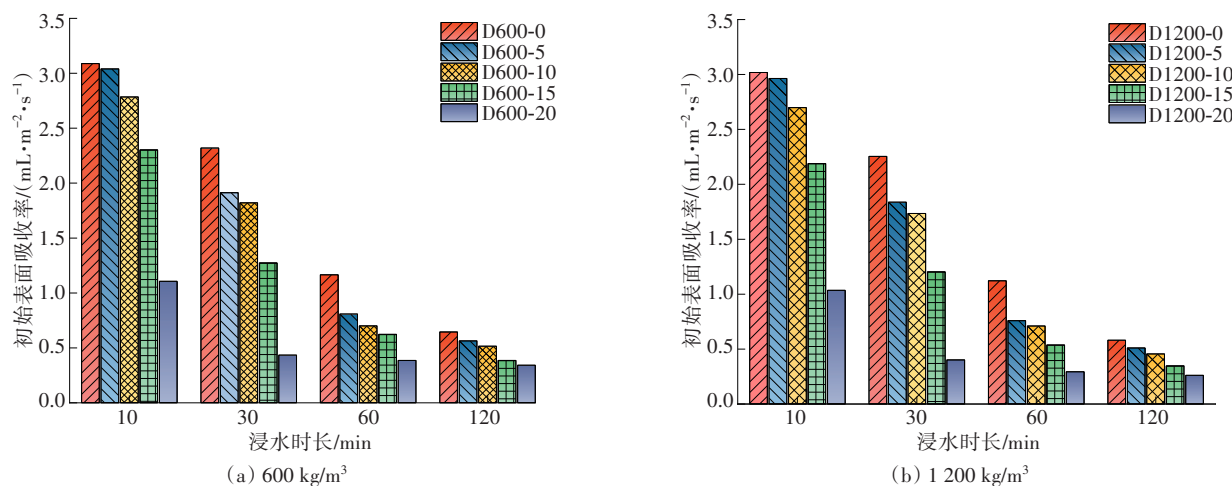


图3 不同密度蛋壳粉泡沫混凝土试样的初始表面吸收率

Fig. 3 Initial surface absorption of eggshell powder foam concrete specimens with different densities

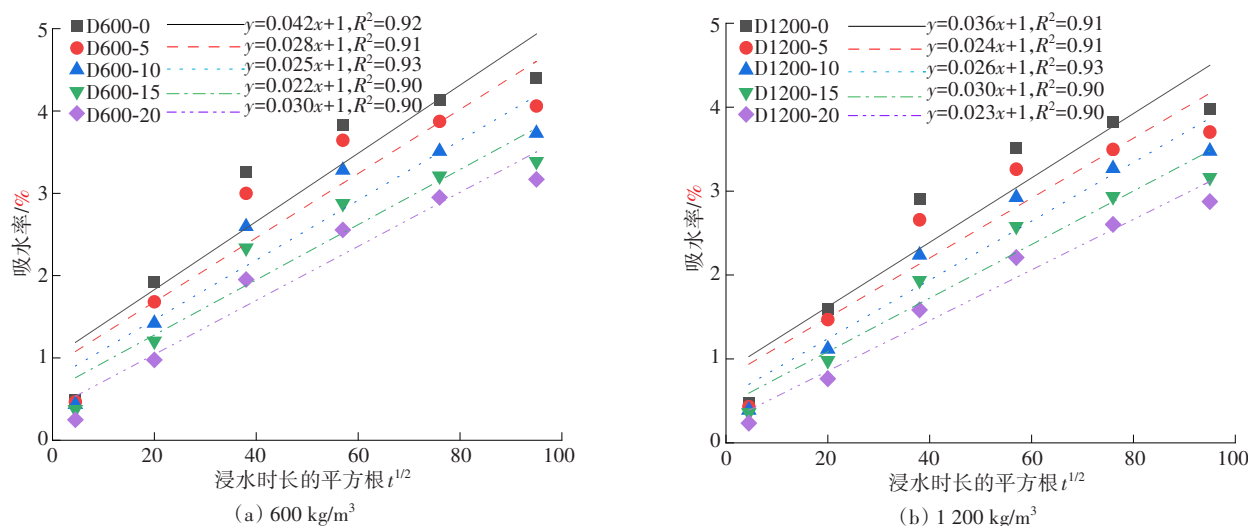


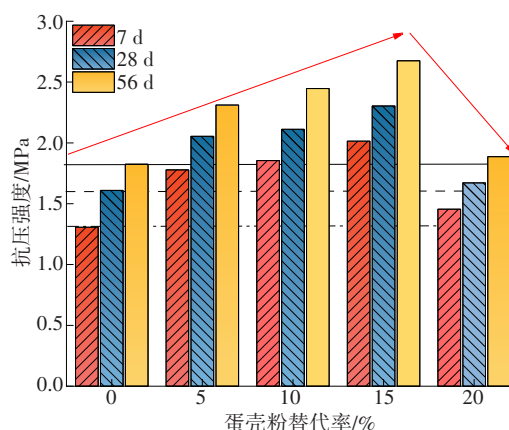
图4 不同密度蛋壳粉泡沫混凝土试样的吸水率拟合曲线

Fig. 4 Water absorption fitting curves for eggshell powder foam concrete specimens with different densities

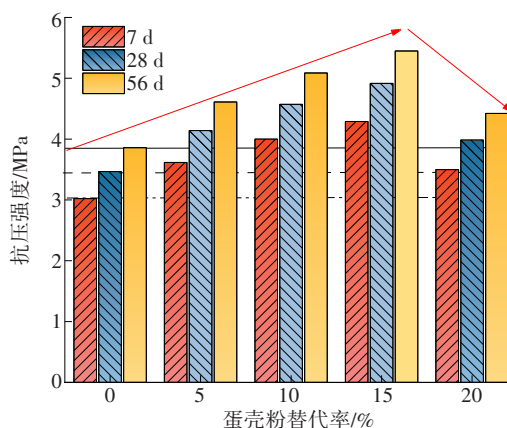
2.2 力学性能

2.2.1 抗压强度

抗压强度和抗折强度是评估泡沫混凝土力学性能的两个重要指标。本研究评估了不同蛋壳粉替代率对泡沫混凝土抗压强度的影响,测试结果如图5所示。由图5可知,D600-0试样在养护7、28和56 d后的抗压强度分别为1.31、1.61、1.83 MPa,而D1200-0试样在相同养护龄期后的抗压强度分别为3.02、3.47、3.86 MPa。



(a) 600 kg/m³



(b) 1200 kg/m³

图5 不同密度蛋壳粉泡沫混凝土试样的抗压强度

Fig. 5 Compressive strength of eggshell powder foam concrete specimens with different densities

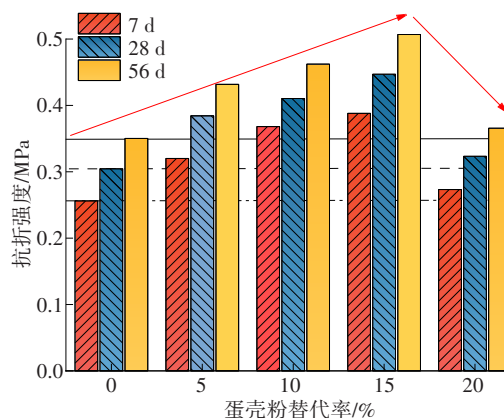
相较于未掺加蛋壳粉的D600-0试样,蛋壳粉替代率分别为5%、10%、15%和20%的D600试样在养护7 d后抗压强度分别提高了36.0%、41.0%、52.0%和8.0%;在养护28 d后抗压强度分别提高了28.0%、30.0%、42.0%和3.5%;在养护56 d后抗压强度分别提高了26.0%、30.0%、45.0%和6.0%。结果显示,在添加15%蛋壳粉的情况下,试样的抗压强度提升效果最为显著。这一现象可以归因于蛋壳粉富含钙,具有优良的填充效果,在部分取代水泥制备泡沫混

凝土时有助于提高混凝土的抗压强度。

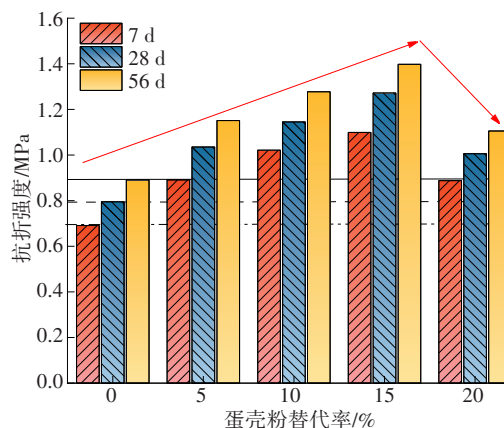
2.2.2 抗折强度

不同蛋壳粉替代率对泡沫混凝土抗折强度的测试结果如图6所示。从图6可以看出,在养护7、28和56 d后,D600-0的抗折强度分别为0.25、0.30、0.35 MPa, D1200-0的抗折强度分别为0.69、0.79、0.89 MPa。相较于未掺加蛋壳粉的D600-0试样,蛋壳粉替代率分别为5%、10%、15%和20%的D600试样在养护7 d后抗折强度分别增加了29.0%、42.0%、51.0%、9.0%;在养护28 d后抗折强度分别增加了24.0%、29.0%、40.0%、1.4%;在养护56 d后抗折强度分别增加了24.0%、31.0%、43.0%、5.0%。

D1200-5、D1200-10、D1200-15和D1200-20试样的抗折强度测试结果展现出了与抗压强度测试结果相似的变化趋势。可见,添加蛋壳粉可以显著提升泡沫混凝土的抗折强度,其中蛋壳粉替代率为15%时提升效果最为显著。这是因为蛋壳粉中富含氧化钙,其与水反应生成水化硅酸盐,有助于减



(a) 600 kg/m³



(b) 1200 kg/m³

图6 不同密度蛋壳粉泡沫混凝土试样的抗折强度

Fig. 6 Flexural strength of eggshell powder foam concrete specimens with different densities

小混凝土的孔隙率,从而提高混凝土的抗折强度。

2.3 孔隙分布

泡沫混凝土的孔隙分布能够提供关于其密度、强度、导热性能、吸水性能和声学性能等方面的重要信息。本研究测试了不同蛋壳粉替代率下不同密度泡沫混凝土试样的孔隙分布,结果见表 4~5。由表 4~5 可知,D600 蛋壳粉泡沫混凝土试样中大孔径孔隙的体积占比要比 D1200 蛋壳粉泡沫混凝土试样中的大,表明在泡沫体积占比较大的蛋壳粉泡沫混凝土试样中,大孔隙的体积占比也较大。

表 4 D600 蛋壳粉泡沫混凝土试样中不同孔径孔隙的体积占比

Table 4 Proportion of pore volume with different pore sizes in D600 eggshell powder foam concrete specimens

| 孔径/ μm | 不同试样中各孔径孔隙的体积占比/% | | | | |
|-------------------|-------------------|--------|---------|---------|---------|
| | D600-0 | D600-5 | D600-10 | D600-15 | D600-20 |
| 100 | 1.84 | 3.63 | 6.84 | 9.88 | 0.00 |
| 200 | 7.06 | 5.98 | 11.40 | 13.93 | 8.27 |
| 300 | 11.16 | 14.53 | 12.66 | 9.98 | 11.69 |
| 400 | 13.10 | 20.94 | 15.96 | 17.89 | 15.21 |
| 500 | 11.05 | 15.49 | 18.24 | 10.97 | 16.32 |
| 600 | 10.13 | 6.84 | 11.40 | 8.00 | 7.28 |
| 700 | 5.94 | 4.49 | 5.59 | 5.04 | 9.59 |
| 800 | 6.96 | 5.77 | 4.10 | 8.10 | 4.96 |
| 900 | 7.88 | 6.84 | 3.08 | 5.04 | 6.39 |
| 1 000 | 10.95 | 7.80 | 4.10 | 6.13 | 9.59 |
| >1 000 | 13.92 | 7.69 | 6.61 | 5.04 | 10.69 |

表 5 D1200 蛋壳粉泡沫混凝土试样中不同孔径孔隙的体积占比

Table 5 Proportion of pore volume with different pore sizes in D1200 eggshell powder foam concrete specimens

| 孔径/ μm | 不同试样中各孔径孔隙的体积占比/% | | | | |
|-------------------|-------------------|---------|----------|----------|----------|
| | D1200-0 | D1200-5 | D1200-10 | D1200-15 | D1200-20 |
| 100 | 19.17 | 28.72 | 29.08 | 34.96 | 25.83 |
| 200 | 18.15 | 15.08 | 22.91 | 17.87 | 19.37 |
| 300 | 21.30 | 19.38 | 14.94 | 16.09 | 14.53 |
| 400 | 10.95 | 18.15 | 11.16 | 12.91 | 11.78 |
| 500 | 4.06 | 3.79 | 5.88 | 4.07 | 4.27 |
| 600 | 7.00 | 4.62 | 3.98 | 3.08 | 2.47 |
| 700 | 4.87 | 2.87 | 1.00 | 1.99 | 6.27 |
| 800 | 3.96 | 0.82 | 3.09 | 4.07 | 4.27 |
| 900 | 2.94 | 1.74 | 3.98 | 1.99 | 3.42 |
| 1 000 | 2.74 | 3.08 | 1.99 | 1.89 | 3.42 |
| >1 000 | 4.87 | 1.74 | 1.99 | 1.09 | 4.37 |

此外,减小泡沫体积降低了蛋壳粉泡沫混凝土试样中孔径 $>300\ \mu\text{m}$ 的孔隙体积占比,增大了孔径 $\leq 300\ \mu\text{m}$ 的孔隙体积占比。相较于 D600 泡沫混凝土,加入蛋壳粉导致 D600 泡沫混凝土试样中,孔径 $\geq 700\ \mu\text{m}$ 的孔隙体积占比减小,孔径 $<700\ \mu\text{m}$ 的孔隙体积占比增大;相较于 D1200 泡沫混凝土,加入蛋壳粉导致 D1200 泡沫混凝土试样中,孔径 $\leq 300\ \mu\text{m}$ 的孔隙体积占比增大,孔径 $>300\ \mu\text{m}$ 的孔隙体积占比减小。

2.4 模型预测

本研究的模型训练数据集来自室内试验测试结果。首先,根据混凝土配合比,选取影响混凝土强度的多个因素作为自变量,例如水泥、沙子、水的用量等,以养护 90 d 龄期的混凝土吸水率作为评价指标。然后,以训练数据集中约 60% 的数据作为预测模型训练集,其余约 40% 的数据作为测试集。随机森林模型以 Bootstrap 重抽样的方式从训练数据集中随机提取 k 个训练样本集,并分别构建回归决策树,未被提取的数据划分到袋外数据集中。随机森林模型主要涉及回归树的棵数 ntree 和随机特征数目 mtry 两个参数,对 mtry 进行逐一尝试,将 mtry 默认设置为模型特征个数的 1/3。之后通过十折交叉验证法,将袋外数据的决定系数作为评价指标,在保证袋外数据误差平稳的前提下获取回归树的棵数(ntree)。

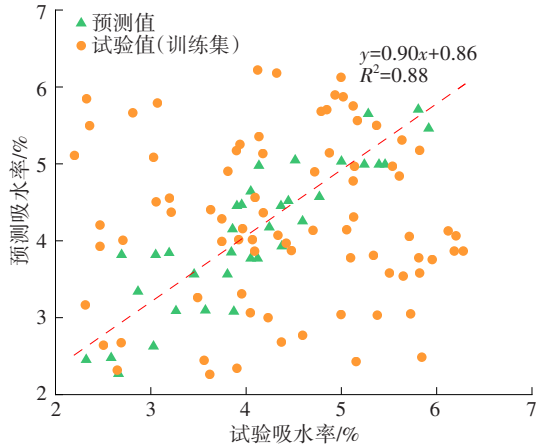
2.4.1 决策树模型

密度为 $1\ 200\ \text{kg/m}^3$ 的蛋壳粉泡沫混凝土试样的试验吸水率与预测吸水率的相关性如图 7(a)所示。由图 7(a)可知,拟合曲线的 R^2 值为 0.88,表明试验结果与预测结果之间具有较强的相关性和一致性,决策树模型可以精准预测蛋壳粉泡沫混凝土的吸水率。决策树模型预测值的误差分布如图 7(b)所示,其数值为相对误差的绝对值(以下简称为误差)。由图 7(b)可知,决策树模型的误差均值为 0.37%,最大误差为 1.19%。数据集中有 10 个数据样本的误差小于 0.40%,17 个数据样本的误差为 0.40%~0.80%,9 个数据样本的误差在 0.80% 以上。

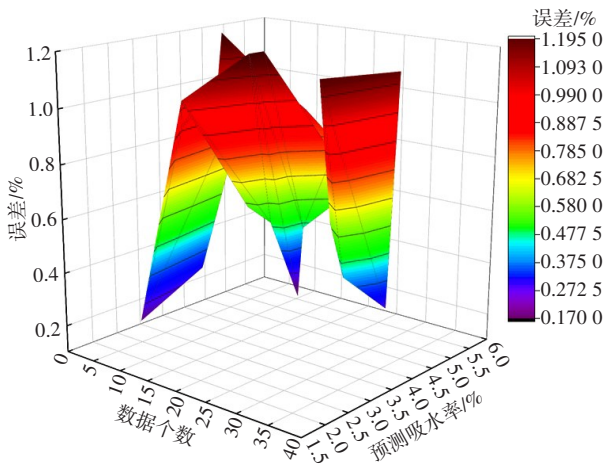
2.4.2 随机森林模型

图 8(a)展示了试验吸水率与随机森林模型所预测的吸水率的相关性。由图 8(a)可知,相较于决策树模型,随机森林模型的预测结果更为准确,其 R^2 值为 0.90,表明试验值与预测值之间的差异极小。随机森林模型预测值的误差分布如图 8(b)所示。

根据预测结果,最大误差和平均误差分别为1.09%、0.31%。数据集中有14个样本的误差低于0.20%,17个样本的误差为0.20%~0.40%,仅有5个样本的误差高于0.40%,这进一步证明了随机森林模型在误差分散性方面比决策树模型的好。



(a) 试验吸水率与预测吸水率的相关性



(b) 预测吸水率的误差

图7 决策树模型预测结果与试验值的相关性及误差

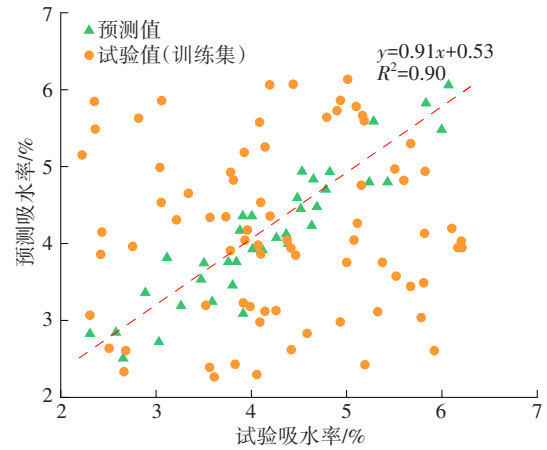
Fig. 7 Correlation and error between predicted and test values of decision tree model

2.4.3 模型验证

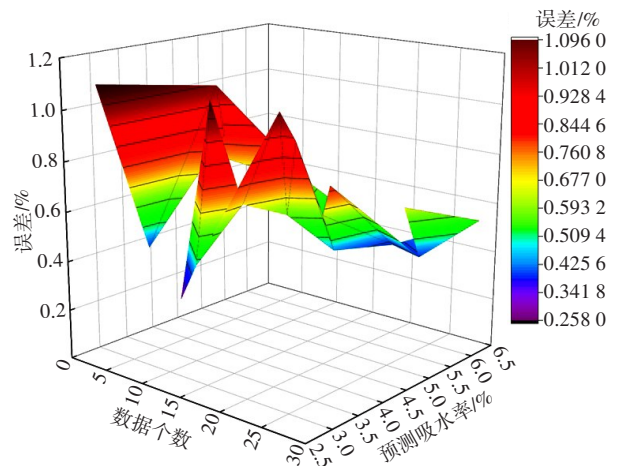
图9为决策树和随机森林模型的K折交叉验证结果。由图9可知,在K折交叉验证中,决策树模型的平均 e_{MAE} 为0.54,在0.37至0.91之间,随机森林模型的平均 e_{MAE} 为0.44,在0.27至0.66之间。在K折交叉验证中,决策树和随机森林模型的平均 e_{RMSE} 分别为0.80和0.67,平均 R^2 值分别为0.61和0.68。因随机森林模型的误差较小, R^2 值较高,故随机森林模型可作为预测蛋壳粉泡沫混凝土性能的最佳模型。

表6为预测模型的统计检验结果。由表6可知,由决策树和随机森林模型得到的吸水率平均绝

对误差(e_{MAE})分别为0.365%和0.268%,平均绝对百分比误差(e_{MAPE})分别为7.60%、5.50%,均方根误差(e_{RMSE})分别为0.462和0.338,表明随机森林模型的预测精度比决策树模型的高。



(a) 试验吸水率与预测吸水率的相关性



(b) 预测吸水率的误差

图8 随机森林模型预测结果与试验值的相关性及误差

Fig. 8 Correlation and error between predicted and test values of random forest model

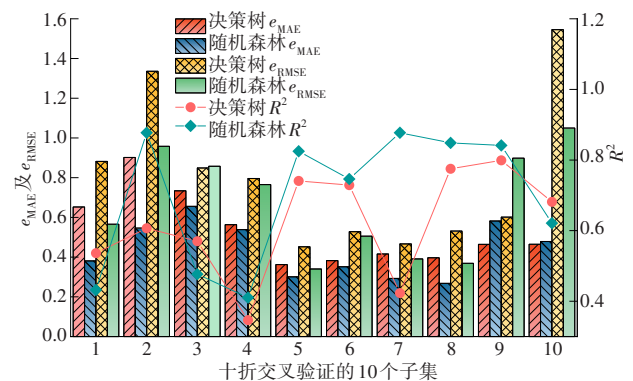


图9 决策树和随机森林模型的K折交叉验证结果

Fig. 9 K-fold cross-validation results for decision tree model and random forest model

表 6 预测模型的统计检验结果

Table 6 Statistical test results of prediction models

| 模型 | $e_{MAE}/\%$ | $e_{MAPE}/\%$ | e_{RMSE} |
|------|--------------|---------------|------------|
| 决策树 | 0.365 | 7.60 | 0.462 |
| 随机森林 | 0.268 | 5.50 | 0.338 |

3 讨论

泡沫混凝土作为建筑领域最为重要的建筑材料之一,应用极其广泛,但其大量使用会消耗自然资源且产生二氧化碳。在建筑材料中使用废弃蛋壳作为水泥的部分替代品是一种可行的方法,可通过减少废物堆放、保护天然原材料、降低二氧化碳排放量来减少对环境的影响,是一种生态友好型策略。本研究通过开展室内试验以及建立机器学习模型,旨在提升蛋壳粉泡沫混凝土的性能及探讨其工程应用的可能性。试验结果表明,泡沫混凝土的吸水率随着蛋壳粉替代率的增加而下降,填料效应使基体更加致密,蛋壳粉中丰富的氧化钙改善了水泥的水化过程,增强了水化作用,最终提高了混凝土的抗吸水能力^[23]。替代率为 15% 的蛋壳粉显著提升了混凝土的抗压、抗折强度,原因在于蛋壳粉中钙的含量较高及蛋壳粉良好的填充效果。相比于对照试样,蛋壳粉泡沫混凝土试样中孔径为 700 ~ 1 000 μm 的孔隙数量较少,原因是蛋壳粉泡沫混凝土中大孔隙或长毛细管的尺寸变小了。此外,外加剂颗粒具有良好的填充作用和较大的比表面积,填充了孔隙并降低了整体孔隙率^[24]。

为了预测含有蛋壳粉的泡沫混凝土的性能,本研究使用决策树和随机森林两种机器学习模型,并对这两种模型的准确性进行了分析,以找出最适合蛋壳粉泡沫混凝土性能的预测方法。通过比较这两种模型的 R^2 值、试验吸水率与预测吸水率之间的误差后发现,随机森林模型比决策树模型的预测结果更准确,且随机森林模型的预测结果与试验结果具有良好的相关性。与单一机器学习方法不同的是,集成机器学习方法通过生成多个子模型在数据样本上训练并调整 R^2 值,因此其输出结果比单个机器学习模型的更准确^[25]。

4 结论

本研究通过室内试验与机器学习方法,分析了不同蛋壳粉替代率泡沫混凝土的可加工性、物理特

性、力学性能及孔隙结构,并利用试验数据对泡沫混凝土的性能进行了预测。研究结果表明:

1) 将蛋壳粉掺入泡沫混凝土中作为部分水泥替代材料后,泡沫混凝土的初始表面吸收率、吸水率均有所下降。

2) 蛋壳粉的掺入有助于提升泡沫混凝土的抗压强度和抗折强度;蛋壳粉的最佳替代率为 15%,此时泡沫混凝土的抗压强度和抗折强度均最大。

3) 泡沫体积的增大使孔隙尺寸增大,大孔隙的体积占比增加;蛋壳粉填充效果较好,当蛋壳粉的替代率为 15% 时,泡沫混凝土中的小孔隙体积占比增大而大孔隙体积占比减小。

4) 所建立的机器学习模型的预测结果与试验结果吻合较好。与决策树模型相比,随机森林模型预测结果的精度更高,因此随机森林模型能够用来预测蛋壳粉泡沫混凝土的性能。

参考文献(References):

- [1] AL-BURIAHI M S, HESSIEN M, ALRESHEEDI F, et al. ZnO-Bi₂O₃ nanopowders: fabrication, structural, optical, and radiation shielding properties [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(3): 3464-3472. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.10.124.
- [2] KATUBI K M, KURTULUS R, ALROWAILI Z A, et al. Optical properties, elastic moduli, and radiation shielding performance of some waste glass systems treated by bismuth oxide [J]. *Optik*, 2022, 266: 169567. DOI: 10.1016/j.ijleo.2022.169567.
- [3] 刘鹏飞, 张玲芳, 王杰. 低碳理念下生鲜品多温共配路径优化研究 [J]. *交通科学与工程*, 2023, 39(5): 149-158. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202212152023101971.
LIU Pengfei, ZHANG Lingfang, WANG Jie. Research on optimization of multi-temperature distribution routing of fresh products under the concept of low-carbon emissions [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2023, 39(5): 149-158. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202212152023101971.
- [4] 赵正峰, 王国栋, 王笑风, 等. 掺加黏土的固废基泡沫轻质土强度和耐久性研究 [J]. *交通科学与工程*, 2024, 40(1): 45-51, 59. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022112324021977.
ZHAO Zhengfeng, WANG Guodong, WANG Xiaofeng, et al. Preparation and properties of solid waste foam lightweight soil containing clay [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2024, 40(1): 45-51, 59. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022112324021977.
- [5] KHAN K, AHMAD W, AMIN M N, et al. Investigating

- the feasibility of using waste eggshells in cement-based materials for sustainable construction [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 23: 4059-4074. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.02.057.
- [6] HAMADA H M, TAYEH B A, AL-ATTAR A, et al. The present state of the use of eggshell powder in concrete: a review [J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 32: 101583. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101583.
- [7] 谭炯. 干湿循环作用下泡沫混凝土耐久性试验研究 [J]. *交通科学与工程*, 2020, 36 (3): 14-18. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.003.
- TAN Jiong. Study on durability test of foam concrete subjected to drying-wetting cycles [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2020, 36 (3): 14-18. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.003.
- [8] 夏英志. 泡沫混凝土的发展及应用现状综述 [J]. *科技创新与应用*, 2020(18): 178-180.
- XIA Yingzhi. Summary of development and application of foamed concrete [J]. *Technology Innovation and Application*, 2020(18): 178-180.
- [9] 袁志颖, 陈波, 陈家林, 等. 泡沫混凝土孔结构表征及其对力学性能的影响 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(7): 4117-4127. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20221014.001.
- YUAN Zhiying, CHEN Bo, CHEN Jialin, et al. Characterization of pore structure of foamed concrete and its influence on performance [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40 (7): 4117-4127. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20221014.001.
- [10] SHAN J S, ZHANG Y, WU S Y, et al. Pore characteristics of pervious concrete and their influence on permeability attributes [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 327: 126874. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126874.
- [11] ZHANG S R, CAO K L, WANG C, et al. Influence of the porosity and pore size on the compressive and splitting strengths of cellular concrete with millimeter-size pores [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 235: 117508. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117508.
- [12] BEN CHAABENE W, FLAH M, NEHDI M L. Machine learning prediction of mechanical properties of concrete: critical review [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 260: 119889. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119889.
- [13] 欧阳雪, 史才军, 史金华, 等. 超高性能混凝土受压力学性能及其弹性模量预测 [J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49 (2): 296-304. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.20200286.
- OUYANG Xue, SHI Caijun, SHI Jinhua, et al. Compressive mechanical properties and prediction for elastic modulus of ultra-high performance concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49 (2): 296-304. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.20200286.
- [14] 王里, 林文字, 姜海龙. 3D打印风积沙混凝土抗碳化性能试验研究 [J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 19 (4): 64-74. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.04.007.
- WANG Li, LIN Wenyu, JIANG Hailong. Experimental study on carbonation resistance of 3D printed concrete with aeolian sand [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2022, 19 (4): 64-74. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.04.007.
- [15] IZHAR S M, ALI M S, SOHAIB K N M, et al. Machine learning-based modeling with optimization algorithm for predicting mechanical properties of sustainable concrete [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 1-15. DOI: 10.1155/2021/6682283.
- [16] GUPTA T, PATEL K, SIDDIQUE S, et al. Prediction of mechanical properties of rubberised concrete exposed to elevated temperature using ANN [J]. *Measurement*, 2019, 147: 106870. DOI: 10.1016/J.MEASUREMENT.2019.106870.
- [17] NADERPOUR H, RAFIEAN A H, FAKHARIAN P. Compressive strength prediction of environmentally friendly concrete using artificial neural networks [J]. *Journal of Building Engineering*, 2018, 16: 213-219.
- [18] LI H, LIN J, LEI X, et al. Compressive strength prediction of basalt fiber reinforced concrete via random forest algorithm [J]. *Materials Today Communications*, 2022, 30: 103117. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.03117.
- [19] 邓兴升, 王清阳. 基于梯度提升决策树的植被高度模型研究 [J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 20 (1): 65-74. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20211130008.
- DENG Xingsheng, WANG Qingyang. Study on vegetation height model based on the gradient boosting decision tree [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2023, 20(1): 65-74. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20211130008.
- [20] PARMANAND S, GAUGHAN ANDREA E, STEVENS FORREST R, et al. Assessing the spatial sensitivity of a random forest model: application in gridded population modeling [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2019, 75: 132-145.
- [21] 程婉清, 袁定波, 熊鹏, 等. 基于多种机器学习算法的水质指数预测模型构建与评估 [J]. *环境科学学报*, 2023, 43 (11): 144-152. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2023.0182.
- CHENG Wanqing, YUAN Dingbo, XIONG Peng, et al. Construction and evaluation of city water quality index prediction model based on multiple machine learning algorithms [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43 (11): 144-152. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2023.0182.
- [22] HUANG J D, DUAN T H, ZHANG Y, et al. Predicting the permeability of pervious concrete based on the beetle

- antennae search algorithm and random forest model[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 1-11. DOI: 10.1155/2020/8863181.
- [23] STEFANIA G, TEOBALD K, ANDRZEJ K, et al. Characterization of eggshell as limestone replacement and its influence on properties of modified cement[J]. Construction and Building Materials, 2022, 319: 126006. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.006.
- [24] AADI AYAD S, HAMAH S N, ALI M A. The behavior of eco-friendly self-compacting concrete partially utilized ultra-fine eggshell powder waste[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1973 (1): 012143. DOI: 10.1088/1742-6596/1973/1/012143.
- [25] SPEISER J L, MILLER M E, TOOZE J, et al. A comparison of random forest variable selection methods for classification prediction modeling[J]. Expert Systems with Applications, 2019, 134: 93-101. DOI: 10.1016/j.eswa.2019.05.028.
- (责任编辑:石月珍;英文编辑:杜明瑞)

(上接第10页)

- mechanical properties of asphalt mixture affected by aggregate based on grey relational degree[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51 (3): 925-935. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20200350.
- [21] JIANG Q, LIU W, WU S P. Analysis on factors affecting moisture stability of steel slag asphalt concrete using grey correlation method[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 397: 136490. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136490.
- [22] LOTFI OMRAN N, RAJAEI K, MARANDI S M. Effect of temperature on permanent deformation of polymer-modified asphalt mixture[J]. Magazine of Civil Engineering, 2022, 11(113): 11309.
- [23] TAI NGUYEN H T, DO T T, TRAN V T, et al. Determination of creep compliance of asphalt mixtures at intermediate and high temperature using creep-recovery test[J]. Road Materials and Pavement Design, 2021, 22(sup 1): S514-S535. DOI: 10.1080/14680629.2021.1908407.
- [24] LORANDI N P, CIOFFI M O H, SHIGUE C, et al. On the creep behavior of carbon/epoxy non-crimp fabric composites[J]. Materials Research, 2018, 21 (3): 1-7. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2017-0768.
- [25] 王岚, 裴珂, 李超. 多聚磷酸-SBS复合改性沥青混合料低温流变特性及本构关系研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24 (4): 842-850. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.04.023.
- WANG Lan, PEI Ke, LI Chao. On rheological properties and constitutive relationship of polyphosphoric acid-SBS composite modified asphalt mixture at low temperature[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24 (4): 842-850. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.04.023.
- [26] LIU K F, LIU C L, LI Q, et al. Laboratory investigation of the low-temperature crack resistance of wood tar-based rejuvenated asphalt mixture based on the semi-circular bend and trabecular bending test[J]. Materials, 2022, 15(20): 7223. DOI: 10.3390/ma15207223.
- [27] MACKIEWICZ P, SZYDŁO A. Viscoelastic parameters of asphalt mixtures identified in static and dynamic tests[J]. Materials, 2019, 12 (13): 2084. DOI: 10.3390/ma12132084.
- (责任编辑:薛仪;英文编辑:陈成)