

引入集成学习的土木工程混凝土徐变研究

周 静

天水市交通建设投资集团有限公司 甘肃天水 741000

【摘要】本文旨在利用集成学习方法，特别是基于决策树的随机森林模型，对土木工程中混凝土的徐变行为进行深入研究。本文采用了新的混凝土收缩徐变数据库，涵盖了丰富的实验数据，以此建立预测模型并验证其性能。在训练模型后，对其性能进行了全面的评价。在影响参数的选择方面，精心挑选了12个关键参数，涵盖了混凝土制备、环境条件和试验参数等方面的因素，其中既包括了内部影响因素也包括了外部影响因素，以全面考虑混凝土徐变的各种影响因素。通过对这些参数进行机器学习模型的训练，发现持荷时间、28天抗压强度和环境温度是对混凝土徐变影响最为显著的因素。本文不仅对混凝土徐变行为进行了深入的探究，还为土木工程实践提供了重要的指导和决策支持。

【关键词】集成学习方法；随机森林模型；混凝土徐变；参数选择；性能评价

1 引言

混凝土作为土木工程中最为常见的建筑材料之一，在工程结构的设计和施工中发挥着至关重要的作用^[1]。然而，随着结构承载荷载的变化和时间的推移，混凝土徐变现象成为了一个不可忽视的挑战。徐变是指在外部载荷作用下，混凝土逐渐发生形变和变形的过程，这可能导致结构的变形、裂缝甚至破坏，从而影响到工程结构的安全性和稳定性^[2]。对混凝土徐变行为的深入研究对于理解和预测结构在使用过程中的变形和性能退化具有重要意义。首先，了解混凝土徐变的机理和规律有助于优化工程设计和施工方案，从而减少结构在使用过程中的变形和损伤^[3]。其次，通过建立准确的混凝土徐变模型，可以对结构的使用寿命和安全性进行评估和预测，为工程结构的维护和管理提供科学依据^[4-6]。此外，针对混凝土徐变行为的研究还可以为新材料的开发和工程技术的创新提供重要参考，推动土木工程领域的发展和进步。

随着计算机科学和机器学习技术的迅速发展，集成学习方法已经成为研究混凝土徐变行为不可或缺的重要工具。这些方法通过整合多个基础学习器的结果，旨在提升模型的预测能力和泛化能力，使其更适用于处理复杂的实际工程问题。在众多集成学习方法中，基于决策树的随机森林模型因其独特的优势备受瞩目。这一模型能够有效地处理混凝土徐变所涉及的复杂数据关系和多变环境条件，为深入研究混凝土徐变行为提供了强大的工具支持。其在

结合多个决策树的同时，减少了过拟合的风险，并且具有较好的解释性和稳定性，因此在工程实践中具有广泛的应用前景。

2 研究方法

2.1 集成学习

集成学习是一种机器学习方法，通过整合多个基础学习器的预测结果，以达到更好的整体预测性能和泛化能力。在混凝土徐变研究中，集成学习可以有效地综合考虑各种影响因素，并提高模型的预测精度。针对上述提到的单一的基学习器存在的不足，为了更进一步地增强模型的预测效果及泛化能力，学者们通过将多个相互独立的基学习器的偏置或者方差进行整合，形成一种集成模型进行学习或预测。

2.2 随机森林的基本结构

随机森林(Random Forest, RF)是一种集成学习方法，其结构是由若干个决策树组成的“森林”。每棵决策树都是通过随机选择样本和随机选择特征来构建的，这种随机性使得随机森林具有较高的鲁棒性和泛化能力。

随机森林的结构包括以下几个关键点：(1)决策树集成：随机森林由多棵决策树组成，每棵决策树都是一个分类或回归模型。这些决策树相互独立地进行训练，最终的预测结果是基于所有决策树的投票或平均值得到的。(2)随机选择样本：在构建每棵决策树时，随机森林会从原始数据集中随机选择一部分样本进行训练，这种有放回的采样

方式被称为Bootstrap采样。通过Bootstrap采样，每棵决策树都使用了不同的样本子集，增加了模型的多样性。(3)随机选择特征：在每棵决策树的节点划分过程中，随机森林会从所有特征中随机选择一部分特征进行考虑。这样做可以减少决策树之间的相关性，增加了模型的多样性，同时降低了过拟合的风险。(4)多数投票或平均值：对于分类问题，随机森林会将每棵决策树的预测结果进行投票，最终选择得票最多的类别作为最终预测结果；

2.3 混凝土徐变影响因素

混凝土徐变影响因素的重要性及贡献度可以通过随机森林模型中的特征重要性来评估。在随机森林模型中，特征重要性可以通过以下方式进行评估：(1)平均不纯度减少(Mean Decrease Impurity, MDI)：在训练随机森林时，每次划分节点时都会计算特征的不纯度减少量。特征的重要性可以通过对所有节点的不纯度减少量进行加权平均得。(2)平均信息增益(Mean Decrease Accuracy, MDA)：类似于不纯度减少，但是使用的是节点的准确度(accuracy)来衡量不纯度的减少。这种方法同样可以用来评估特征的重要性。

在混凝土徐变的情境下，影响因素的重要性和贡献度可能会对混凝土的性能产生显著影响。这些因素包括：(1)持荷时间：持荷时间是指混凝土承受外部荷载的时间长短。长时间的持荷会导致混凝土内部结构发生变化，进而影响其徐变行为。(2)28天抗压强度：混凝土的抗压强度是指在28天龄期下的最大抗压能力，它直接影响混凝土的稳定性和耐久性。(3)环境温度：环境温度对混凝土的硬化速度和水化反应起着重要作用。较高的温度通常会促进水化反应，而较低的温度可能会延缓混凝土的硬化过程。(4)水灰比：水灰比是混凝土中水和水泥的比例，直接影响混凝土的流动性和致密性。较低的水灰比通常会导致混凝土较高的强度，但也可能增加其徐变率。(5)环境相对湿度：环境相对湿度影响混凝土中水分的含量，进而影响其水化反应和强度发展。高湿度环境可能会导致混凝土吸湿，从而影响其性能。(6)弹性模量：弹性模量是混凝土在受力后恢复原状的能力，直接反映了其刚度和强度。较高的弹性模量通常表示混凝土具有较好的抗变形能力。(7)加载龄期：加载龄期是指混凝土龄期开始加载的时间点，对混凝土的徐

变行为有一定影响。不同加载龄期可能导致混凝土的应力-应变特性不同。(8)体表比：体表比是指混凝土表面积与体积的比值，影响混凝土的蒸发速率和养护效果。适当的体表比能够确保混凝土充分保水和养护。(9)试件高度：混凝土试件的高度直接影响其受力情况和内部应力分布，从而影响其徐变行为。(10)骨料占比：骨料占比指混凝土中骨料的比例，直接影响混凝土的密实性和强度特性。(11)水泥含量：混凝土中水泥的含量决定了其水化反应的程度和强度发展的速率。较高的水泥含量通常会导致较高的混凝土强度。(12)预处理温度：预处理温度是指混凝土在养护和早期龄期时所处的温度条件，对混凝土的水化反应和强度发展至关重要。

3 实验结果与验证

本文选用NU-ITI (Northwestern University-Infrastructure Technology Institute)最新混凝土收缩徐变数据库(Bazant-Li-2015)的所有数据进行回归统计分析，取得基于大数据分析的预测效果。数据集按照7:3的比例分成训练集和测试集。

选择了2.3节中的12类影响参数作为机器学习训练混凝土徐变值的输入参数。将混凝土徐变柔量值(J)作为机器学习训练的输出参数。这些参数的选择是为了全面考虑混凝土徐变的各种影响因素，以确保模型的预测能力和准确性。

3.1 GA-RF混凝土徐变预测模型训练结果

在训练过程中，获得了不同数据集下的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)、平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)、决定系数 R^2 值。

本文GA-RF模型在测试集、训练集和全集上的统计值评价。每个指标代表了模型在不同数据集上的性能表现。 R^2 值用于衡量模型对数据方差的解释程度，在这里，测试集的 R^2 为0.87，训练集的 R^2 为0.95，全集的 R^2 为0.92。这说明GA-RF模型在所有数据集上都有较好的拟合效果，尤其是在训练集上表现最佳。RMSE是衡量模型预测值与真实值之间的误差的标准差。在这里，测试集的RMSE为22.11，训练集的RMSE为12.23，全集的RMSE为15.32。可以看出，训练集上的RMSE最小，而测试集上的RMSE最大，但整体来看，模型的预测误差都在一个较小的范围内。MAE是模型预测值与真

实值之间的平均绝对误差,在这里,测试集的MAE为7.65,训练集的MAE为4.35,全集的MAE为4.56。与RMSE类似,训练集上的MAE最小,而测试集上的MAE最大,但整体上,模型的预测误差都相对较小。

综上所述,GA-RF模型在测试集、训练集和全集上都取得了不错的预测表现,尤其在训练集上表现最佳,但仍需注意测试集上的性能,以确保模型的泛化能力。

3.2 混凝土徐变影响因素重要性

持荷时间具有最高的重要性评分,为0.2131。这表明持荷时间对混凝土徐变的影响最为显著,持荷时间是预测混凝土徐变的一个关键因素。28天抗压强度排名第二,重要性评分为0.1754,说明混凝土的抗压强度在徐变性能中也具有较高的重要性,其对徐变的影响程度较大。环境温度重要性评分为0.1203,表明环境温度对混凝土徐变的影响也是比较显著的,但相对于持荷时间和抗压强度来说略低。水灰比重要性评分为0.082,水灰比对混凝土徐变的影响相对较低。环境相对湿度重要性评分为0.0787。弹性模量、加载龄期、体表比、试件高度、骨料占比、水泥含量和预处理温度这些因素的重要性评分介于0.0179到0.0679之间,它们对混凝土徐变的影响相对较小。综合来看,持荷时间、28天抗压强度和环境温度是随机森林模型认为对混凝土徐变影响最为显著的因素。

3.3 混凝土徐变影响因素贡献度

以上数据展示了各个影响因素对混凝土徐变的贡献度评分,以百分比表示。持荷时间的贡献度评分为21.31%,28天抗压强度的贡献度评分为39.03%,环境温度的贡献度评分为51.07%,水灰比的贡献度评分为59.17%,环境相对湿度的贡献度评分为66.06%,弹性模量的贡献度评分为72.84%,加载龄期的贡献度评分为80.03%,体表比的贡献度评分为85.69%,试件高度的贡献度评分为90.65%,骨料占比的贡献度评分为94.64%,水泥含量的贡献度评分为98.2%,预处理温度的贡献度评分为100%。这些评分表示了各个因素对混凝土徐变的影响程度,其中预处理温度被认为是对于混凝土徐变影响最为显著的因素。

4 结论

本文利用集成学习方法,特别是基于决策树的随机森林模型,对土木工程中混凝土的徐变行为进行了深入研究。

通过对12个影响混凝土徐变的关键因素进行分析和评估,得到了它们在模型中的重要性评分和贡献度评分,进一步揭示了各因素对混凝土徐变的影响程度。首先,持荷时间被认为是对混凝土徐变影响最为显著的因素之一,其重要性评分为0.2131,显示了其在徐变行为中的关键作用。28天抗压强度排名第二,重要性评分为0.1754,说明混凝土的抗压强度在徐变性能中也具有较高的重要性,其对徐变的影响程度较大。环境温度重要性评分为0.1203,表明环境温度对混凝土徐变的影响也是比较显著的,但相对于持荷时间和抗压强度来说略低。综上所述,持荷时间、28天抗压强度和环境温度是对混凝土徐变影响最为显著的因素。这强调了在土木工程中控制预处理温度的重要性,以提高混凝土的徐变性能。综上所述,通过集成学习方法对混凝土徐变行为进行研究,不仅能够全面了解各因素对徐变的影响程度,还可以为土木工程实践提供重要的指导和决策支持。未来的研究可以进一步探索影响混凝土徐变的其他因素,并结合更多的数据和模型来提高预测的准确性和可靠性,以满足工程实践的需求。

参考文献:

- [1] Hong S H, Choi J S, Yuan T F, et al. A review on concrete creep characteristics and its evaluation on high-strength lightweight concrete[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 22(2): 230-251.
- [2] Li K, Long Y, Wang H, et al. Modeling and sensitivity analysis of concrete creep with machine learning methods[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, 33(8): 04021206.
- [3] 王浩. 基于集成学习和LSTM人工智能算法的混凝土徐变研究[D]. 北京交通大学, 2020.
- [4] Tošić N, Aidarov S, de la Fuente A. Systematic review on the creep of fiber-reinforced concrete[J]. *Materials*, 2020, 13(22): 5098.
- [5] 汪洋, 李华, 王育江, 等. 钢管混凝土徐变特性研究[J]. *混凝土*, 2022, (08): 170-173+178.
- [6] 陈梦成, 杨超, 方苇, 等. 混凝土徐变的Gamma模型参数估计研究[J]. *铁道学报*, 2021, 43(05): 204-212.