



再生混凝土的配合比设计研究综述

张业盛, 金立兵, 段 杰, 王宇航, 刘 鹏

(河南工业大学 土木工程学院, 河南 郑州 450000)

摘要:混凝土是基础设施建设中使用最广泛的材料,从废弃混凝土中回收再生骨料制作混凝土,可以减少自然资源的消耗以及处理废弃混凝土带来的环境污染问题。本文阐述了再生混凝土配合比传统与人工智能设计方法的研究现状,对研究中使用的具有代表性的方法进行了整理归纳;针对两种方法的特点以及存在的问题进行总结,提出人工智能设计方法具有广阔的发展潜力与研究前景;同时,对基于人工智能的再生混凝土配合比设计方法进行了展望,可为进一步完善和发展再生混凝土配合比设计方法提供参考。

关键词:再生混凝土; 配合比; 强度; 耐久性; 人工智能

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)03-0001-05

doi:10.13402/j.gcjs.2024.03.028

Review on design research of mix proportion of recycled concrete

ZHANG Yesheng, JIN Libing, DUAN Jie, WANG Yuhang, LIU Peng

(School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: Concrete is the most widely used material in infrastructure construction, and recycling recycled aggregate from waste concrete to make concrete can reduce the consumption of natural resources and the environmental pollution caused by the disposal of waste concrete. The research status of both traditional and artificial intelligence design methods for recycled concrete mix is expounded, the representative methods used in the research are summarized, the characteristics and existing problems of the two methods are summarized, and it is proposed that the artificial intelligence design method has broad development potential and research prospects. At the same time, the design method of recycled concrete mix based on artificial intelligence is prospected, which can provide references for further improving and developing the design method of recycled concrete mix.

Key words: recycled concrete; mix proportion; strength; durability; artificial intelligence

再生混凝土(recycled aggregate concrete, RAC)是指从各种途径回收的废弃混凝土块经处理后,部分或全部替代天然砂石集料制作而成的新混凝土^[1]。早期对RAC的研究可以追溯到第二次世界大战时期,战争轰炸后留下的瓦砾被用于混凝土建筑重建^[2]。从20世纪70年代开始,一些发达国家开始在RAC领域研究,并将其应用到实际工程中^[3]。我国对于RAC的研究起步较晚,目前我国建筑固废回收率仅为10%左右^[4]。使用再生骨料可以实现资源的循环利用,避免大量建筑和拆除垃圾的填埋^[5]。

由于再生细骨料中含有大量水化水泥浆体和二水石膏,不宜再用于拌制混凝土^[6],因此RAC一般指再生粗骨料混凝土^[7]。目前,国内外许多从事混凝土研究的科研人员使用人工智能方法对RAC的性能优化、预测、配合比设计等问题进行了一系列研究,并取得了较好的成果^[8-10]。

本文重点对RAC的配合比设计方法进行综述,并对目前的研究方法进行了整理总结;针对RAC配合比设计中存在的问题进行了分析,并对人工智能方法的RAC配合比设计进行展望,以期

收稿日期: 2023-06-12

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(212102110191, 212102110200, 232102320014); 河南工业大学自科创新基金资助项目(2022ZKCJ06)

作者简介: 张业盛(1999—),男,硕士研究生,从事混凝土结构与材料方面的研究。

为从事相关领域的科研人员提供参考。

1 传统配合比设计方法及特点

1.1 再生骨料特点

再生骨料与天然骨料性质的较大差异,造成了再生骨料回收利用难的问题^[11]。废弃混凝土块回收时使用的破碎工艺会导致再生骨料产生大量微小裂缝,造成再生骨料压碎指标与吸水率增大^[12];同时,由于再生骨料携带大量的旧砂浆^[13],造成 RAC 产生多且复杂的界面过渡区^[14]。研究表明,用再生骨料代替天然粗骨料会导致混凝土抗压强度、抗拉强度等力学性能的降低^[15-16]。目前还没有 RAC 的标准设计方法,也没有预测其性质的广义模型^[17],不少学者仍使用传统的混凝土设计方法对 RAC 性能与各组分之间的关系进行研究。

1.2 传统配合比设计方法

对于 RAC 的配合比设计,科研人员更倾向于在普通混凝土设计基础上进行改进。这种方法需要通过大量的试验调整配合比中各个组分的质量分数,以获得一种相对合理且满足实际工程需要的混凝土拌合物。传统 RAC 配合比设计方法有保罗米公式法、单位体积用水量法、嵌挤骨架密实法、两步混合法和等量砂浆法等。

(1) 保罗米公式法是普通混凝土设计中使用最为广泛的计算方法。邓寿昌等^[18]认为 RAC 混合料设计仍服从保罗米公式,并通过试验修正了公式中的回归系数;高丹盈等^[19]在修正保罗米公式的基础上,结合再生骨料的特性,通过试验和理论分析,将 RAC 的水灰比、单方用水量和砂率纳入回归公式。此类方法可行性与可操作性较高,但未能全面考虑再生骨料的各项参数;同时,这类方法需要通过试验进行试错,会消耗大量资源。

(2) 部分学者进行 RAC 配合比设计时从再生骨料高吸水率的特点入手。王国林等^[20]以保证坍落度为目标,参考普通混凝土的配合比,根据和易性以及坍落度来调整 RAC 的用水量;张学兵等^[21-22]认为 RAC 的用水量为按照普通混凝土设计方法计算的单位用水量加上考虑再生骨料吸水率而额外增加的用水量,并通过试验提出了计算再生粗骨料吸水量的计算公式;郭远新等^[23]发现,当考虑 RAC 额外用水量

时,再生粗骨料混凝土的用水量与再生粗骨料的品质与取代率均呈较好的线性关系,混凝土的强度与灰水比也呈线性关系,并基于有效用水量原则和绝对水胶质量比,提出了一种 RAC 配合比的简易设计方法。针对此类方法,再生骨料需要一定时间达到饱水状态,所以难以保证吸水后的骨料为面干状态,在实际工程应用中,难以把握具体用水量。

(3) 部分学者认为再生骨料中的微小裂缝和残余砂浆的孔隙有害于混凝土。彭小芹等^[24]采用嵌挤骨架密实法对再生混凝土配合比设计方法进行研究;TAM 等^[25]通过两步混合法,使用水泥浆填补再生骨料孔隙和裂缝,提供更强的界面过渡区;DUY 等^[26]使用密实配合比设计方法,以飞灰作为填充材料,增加了混凝土混合物中骨料基质的密度,减少了再生骨料对于混凝土的负面影响,提高了 RAC 试件的强度和耐久性;刘鹏宇^[27]认为混凝土的主要强度由骨料提供,胶凝材料只起到黏结作用,并提出了一种使 RAC 中再生骨料与砂浆质量分数与普通混凝土相同的设计方法。

1.3 传统设计方法特点

目前,传统 RAC 配合比设计方法存在以下几个问题。

(1) RAC 组分复杂、离散性大。当前用于 RAC 配合比设计的各种方法大都参考了普通混凝土的设计方法,或者使用了其稍加改变的形式,难以体现 RAC 配合比设计的各项特点。

(2) 人力、物力资源消耗较大。试验产生的废弃混凝土量较大,易造成资源浪费;对于混凝土配合比设计过程中 28 d 抗压强度测试需要花费时间较长。

(3) 过于依赖经验。虽然根据规范和基于性能的设计方法均可制定出可接受的设计解决方案,但这些方案并非性能最佳解决方案,仅得到了性能良好的混凝土混合物比例。

(4) 缺少 RAC 配合比设计的统一方法。由于再生骨料的复杂特性,RAC 配合比设计目前没有统一的标准,且泛化能力较差,多数停留在试验研究阶段,难以在实际工程中应用。

2 基于人工智能的配合比设计方法及特点

2.1 基于人工智能的再生混凝土配合比研究方法

当前,人工智能(artificial intelligence, AI)技

术被广泛应用于各个领域。愈来愈多的研究人员也开始探索 AI 在 RAC 配合比设计中的应用^[28]。与传统方法相比, AI 模型具有在未知任何固定关系或函数的情况下学习隐藏关系的能力^[29]。

(1) 部分学者使用了一系列机器学习算法对 RAC 的性能进行了预测。人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 是混凝土配合比研究中使用最多, 也被认为是最有潜力的一种 AI 算法。已有研究表明, ANN 可以模拟影响混凝土抗压强度参数间的复杂非线性关系^[30-31]。DANTAS 等^[32]使用 ANN 方法预测 RAC 的强度; DUAN 等^[33]使用 ANN 预测 RAC 的弹性模量; SHAO 等^[34]使用 ANN 预测 RAC 的坍落度; LIU 等^[35]使用 ANN 预测混凝土中氯化物的扩散率。上述模型均取得了良好的预测精度。

FAEZE 等^[36]采用 ANN、自适应神经模糊推理系统和多元线性回归 3 种数据驱动模型对 RAC 的 28 d 抗压强度进行了预测, 发现 ANN 预测进度最高, 多元线性回归的精度相对较差。这是因为混凝土抗压强度之间存在高度非线性关系, 而多元线性回归可以建立一个易于使用的单一方程。ANN 则表现为黑盒, 无法表现为具体的函数表达式。

NASER 等^[37]将多元自适应回归样条方法与支持向量机算法和随机森林算法进行对比, 发现该方法优于其他两种方法; 与多元线性回归方法相比, 发现预测准确度得到提升, 说明对于 RAC 的高度非线性关系, 非线性的机器学习方法要优于线性的方法。

KAIHUA 等^[38]采用 ANN、高斯过程回归和多元自适应样条 3 种软计算方法, 基于霜冻因子值对 RAC 霜冻耐久性进行建模, 发现具有多项式核函数的高斯过程回归模型性能最佳。

(2) 近年来, 以机器学习算法为基础的深度学习算法得到了迅速的发展。DENG 等^[39]针对使用传统神经网络结构预测混凝土性能中存在的收敛速度慢、学习过度、局部优化等缺点, 使用了基于经典神经网络发展而来的卷积神经网络, 通过与试验数据进行对比, 发现卷积神经网络的预测模型具有更高的预测精度和更强的泛化能力。

(3) 部分学者通过将人工智能算法与寻优算法相结合, 以提高模型的预测精度。尽管使用 AI 方法进行 RAC 配合比设计和预测混凝土抗压强度有效,

然而没有一种单一算法被证明是一贯优越的。NUNEZ 等^[40]使用多种算法验证了 AI 算法对数据分析的鲁棒性, 并利用统计指标对各类模型的性能进行比较, 发现梯度增强回归树和循环神经网络模型的预测性能优于高斯过程回归模型; 同时, 使用粒子群算法将成本考虑进优化问题, 以实现可再生骨料含量最佳、成本最低、环境足迹最小的可持续混凝土。

TRAN 等^[41]使用 721 组试验数据, 基于粒子群算法对梯度提升、极值梯度提升、支持向量机 3 种算法中的参数进行迭代优化, 通过优化前后的模型对比, 发现耦合算法的预测精度优于单一算法的精度。

2.2 人工智能研究方法特点

基于 AI 的 RAC 配合比设计方法相比于传统的设计方法具有的优势如下。

(1) 便于应用, 鲁棒性强。AI 算法能避免试配的繁琐试验, 缩短 RAC 的设计周期, 减少资源的消耗, 提高混凝土设计的经济性^[42]。

(2) 考虑全面。通过挖掘数据深度特征, 能够更为全面地考虑混凝土配合比设计中各项参数以及多方面的性能。

由于使用 AI 方法进行 RAC 配合比设计仍处于研究阶段, 现存在以下两点问题。

(1) 神经网络^[43]被应用于预测混凝土性能之初就取得了良好的精度, 但 DEROUSSEAU 等^[44]认为当前研究所使用的数据集多为实验室数据集, 未能捕捉到现场混凝土浇筑和养护的许多复杂因素。

(2) 部分 AI 算法为黑盒模型, 无法对输入和输出变量之间的关系给出解释。因此需要进一步, 对 AI 的预测结果进行解释, 以及通过 AI 模型对各变量之间的关系进行分析。

3 研究展望

(1) 多参数 RAC 数据库的建立。当前, 大多数研究都采用了小数据集, 不仅损害了这类模型的训练, 同时也不利于提升模型的泛化能力。未来需要通过使用动态范围更广、涵盖范围更大的数据集, 提高模型的泛化能力, 以推动 AI 在混凝土配合比设计领域的广泛应用。

(2) 由确定性设计向不确定性设计设计方法的转变。RAC 相较于普通混凝土具有更大的不确定性。

在实际工程中,混凝土的各项性能受人和环境等多方面因素的影响。因此,通过使用贝叶斯理论,为每个预测值生成置信区间,并给出估计值和可能值的范围,为 RAC 配合比设计引入可靠度设计方法。

(3) 新 AI 算法的探索。近年来,具有自主学习能力的深度学习理论取得了显著进展,相较于经典的机器学习算法,该算法具有更强大的学习分析与泛化能力,显著提高精度和鲁棒性。因此,使用深度学习的方法对 RAC 进行配合比优化设计,具有广阔的研究前景。

(4) 基于性能的 RAC 多目标的优化。目前,混凝土配合比设计多从 RAC 的单一性能指标进行考虑。为满足实际工程应用的需求,除安全应用外,还应充分考虑其经济性,耐久性等指标,提高在生命周期内的经济效益。

4 结 语

文章总结与对比了针对 RAC 的传统配合比设计方法以及人工智能的设计方法的研究现状,重点介绍了使用 AI 的 RAC 配合比研究进展。当今时代信息技术的迅速发展,为基于大数据的 AI 研究方法奠定了基础,使用 AI 算法对 RAC 进行配合比设计,不仅可以减少运算量,还可以提高预测的准确性。同时,人工智能技术在土木工程领域的应用才刚刚起步,相信未来在各种类型的混凝土配合比设计,建造,以及维护阶段都将得到广泛的应用。

参考文献:

- [1] 李月霞,田国宾.再生混凝土的冲击力学特性及本构模型研究[J].混凝土,2023(1):183-187;192.
- [2] Buck A D. recycled concrete as a source of aggregate[J]. Journal Proceedings,1976,5(1):212-219.
- [3] 刘锟,陈宣东,黄达.再生混凝土的研究现状及未来研究趋势分析[J].混凝土,2020(10):47-50.
- [4] ZHANG Y J,YA J,WILLIE T,et al. Demolition waste recycling in China:New evidence from a demolition project for highway development[J]. Waste Management&Research,2020,38(6):696-702.
- [5] 章玉容,徐雅琴,姚泽阳,等.配合比设计方法对再生混凝土生命周期评价的影响[J].浙江工业大学学报,2020,48(6):648-653.
- [6] 王建刚,曾波,唐飞,等.不同类型再生细骨料混凝土力学性能对比研究[J].混凝土,2022(4):81-85.
- [7] 肖建庄,马旭伟,刘琼,等.全再生混凝土概念的衍化与研究进展[J].建筑科学与工程学报,2021,38(2):1-15.
- [8] HAN T H,SIDDIQUE A,KHAYAT K,et al. An ensemble machine learning approach for prediction and optimization of modulus of elasticity of recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials,2020(244):118271.
- [9] FENG J P,ZHANG H W,GAO K,et al. Efficient creep prediction of recycled aggregate concrete via machine learning algorithms[J]. Construction and Building Materials,2022,360(19):129497.
- [10] HOSEIN N,AMIR H R,POUYAN F. Compressive strength prediction of environmentally friendly concrete using artificial neural networks[J]. Journal of Building Engineering,2018(16):213-219.
- [11] WANG B,YAN L B,FU Q N,et al. A Comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete[J]. Conservation and Recycling,2021(171):105565.
- [12] 赵海霞,解雅军.再生粗骨料不同取代率对混凝土工作性能及物理性能的影响[J].混凝土,2020(11):72-74.
- [13] 王俊辉,黄悦,杨国涛,等.再生混凝土抗压性能研究进展[J].材料导报,2022,36(S1):278-286.
- [14] 王二成,于莲皓,姜新佩,等.化学溶液预处理再生粗骨料对再生混凝土改性的影响[J].硅酸盐通报,2022,41(12):4310-4317.
- [15] 熊孜,印长俊,陈铖.再生粗骨料混凝土梁受扭的力学性能试验研究[J].建筑结构,2023,53(S1):1640-1649.
- [16] SHI C,LI Y,ZHANG J,et al. Performance enhancement of recycled concrete aggregate[J]. Journal of Cleaner Production,2016,112(1):466-472.
- [17] CREE D,GREEN M. Residual strength of concrete containing recycled materials after exposure to fire[J]. Construction and Building Materials,2013(45):208-223.
- [18] 邓寿昌,张学兵.再生混凝土强度计算 Bolomey 公式回归系数 $\alpha\alpha'$ 、 $\alpha b'$ 的试验研究[J].混凝土,2012(8):24-26;30.
- [19] 高丹盈,张丽娟,芦静云.再生骨料混凝土配合比设计参数研究[J].建筑科学与工程学报,2016,33(1):8-14.
- [20] 王国林,祁尚远,李聚义.再生粗骨料混凝土力学性能试验研究[J].混凝土,2020(3):168-171;176.
- [21] 张学兵,邓寿昌,黄继承.再生混凝土单位体积用水量的计算[J].中南林学院学报,2005(5):105-107.
- [22] 张学兵,邓寿昌.再生混凝土单位体积用水量的实验

- 研究[J]. 混凝土,2004(10):38-40;64.
- [23] 郭远新,李秋义,单体庆. 再生粗骨料混凝土配合比简易设计方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(6):1029-1038.
- [24] 彭小芹,黄滔,王开宇. 再生混凝土配合比设计优化:嵌挤骨架密实法[J]. 土木建筑与环境工程,2009,31(3):124-129.
- [25] TAM V W Y, TAM C M. Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach[J]. Journal of Materials Science,2007(42):3592-3602.
- [26] DUY H V, MITIKU D Y, CHAO L H. Mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete produced from recycled and natural aggregate blended based on the densified mixture design algorithm method[J]. Journal of Building Engineering,2021(35):289-293.
- [27] 刘鹏宇. 等量砂浆法配制再生混凝土的力学性能和收缩及抗冻性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [28] 徐阳,金晓威,李惠. 土木工程智能科学与技术研究现状及展望[J]. 建筑结构学报,2022,43(9):23-35.
- [29] 樊健生,王琛,宋凌寒. 土木工程智能计算分析研究进展与应用[J]. 建筑结构学报,2022,43(9):1-22.
- [30] LEE J J, KIM D, CHANG S K, et al. An improved application technique of the adaptive probabilistic neural network for predicting concrete strength[J]. Computational Materials Science,2009,44(3):988-998.
- [31] SOBHANI J, NAJIMI M, POURKHORSHIDI A R, et al. Prediction of the compressive strength of no-slump concrete: a comparative study of regression, neural network and ANFIS models[J]. Construction and Building Materials,2010,24(5):709-718.
- [32] ADRIANA T, MONICA B. Prediction of compressive strength of concrete containing construction and demolition waste using artificial neural networks[J]. Construction and Building Materials,2013(38):717-722.
- [33] DUAN Z H, KOU S C, POON C S. Using artificial neural networks for predicting the elastic modulus of recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials,2013(44):524-532.
- [34] SHAO J, JI X, LI R. Application of BP neural network model in the recycled concrete performance prediction [C]//International Conference on Advances in Energy. Xi'an: Atlantis Press,2015,18(7):527-532.
- [35] LIU Q F, IQBAL M F, YANG J, et al. Prediction of chloride diffusivity in concrete using artificial neural network: Modelling and performance evaluation[J]. Construction and Building Materials,2021(268):121082.
- [36] KHADEMI F, MOHAMMADMEHDI S, DESHPANDE N, et al. Predicting strength of recycled aggregate concrete using artificial neural network, adaptive neuro-fuzzy inference system and multiple linear regression[J]. International Journal of Sustainable Built Environment,2016,5(2):355-369.
- [37] NASER A H, BADR A H, HENEDY S N, et al. Application of multivariate adaptive regression splines (MARS) approach in prediction of compressive strength of eco-friendly concrete[J]. Case Studies in Construction Materials,2022(17):1262.
- [38] LIU K H, ZOU C Y, ZHANG X C, et al. Innovative prediction models for the frost durability of recycled aggregate concrete using soft computing methods[J]. Journal of Building Engineering,2021(34):101822.
- [39] DENG F M, HE Y G, ZHOU S X, et al. Compressive strength prediction of recycled concrete based on deep learning[J]. Construction and Building Materials,2018,175(30):562-569.
- [40] NUNEZ I, MARANI A, NEHDI M L. Mixture optimization of recycled aggregate concrete using hybrid machine learning model[J]. Materials,2020,13(19):4331.
- [41] TRAN V Q, DANG V Q, HO L S. Evaluating compressive strength of concrete made with recycled concrete aggregates using machine learning approach[J]. Construction and Building Materials,2022(323):126578.
- [42] KHAN K, AHMAD W, AMIN M N, et al. A systematic review of the research development on the application of machine learning for concrete[J]. Materials,2022,15(13):4512.
- [43] YEH I C. Modeling of strength of high-performance concrete using artificial neural networks[J]. Cement and Concrete Research,1998,28(12):1797-1808.
- [44] DEROUSSEAU M A, LAFTCHIEV E, KASPRZYK J R, et al. A comparison of machine learning methods for predicting the compressive strength of field-placed concrete[J]. Construction and Building Materials,2019(228):116661.