

# Research Progress on Intelligent Design of High-Performance Concrete Mix Proportions

Yang Zhou<sup>1,2</sup> Jiliang Wang<sup>1,2\*</sup>

1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei, 056038, China

2. Highway Science Research Institute of the Ministry of Transport, Beijing, 100088, China

## Abstract

This paper expounds various mix proportion design techniques established based on different concrete theoretical models, deeply analyzes the characteristic differences of various mix proportion design schemes, and points out that different mix proportion design systems all have their specific applicable fields. In practical engineering applications, the most suitable mix proportion scheme should be selected in combination with specific working conditions. Under the background of the cross-development of computer science and materials engineering, concrete proportioning technology is undergoing a transformation process from experience-driven to theoretical guidance and from qualitative analysis to quantitative research. In recent years, many researchers have begun to attempt to introduce intelligent computing methods such as genetic algorithms and neural networks into the field of concrete mix proportion optimization, and have achieved remarkable research progress in this direction.

## Keywords

High-performance mix ratio; Mix proportion design; Intelligentization; Research Progress at Home and Abroad

# 水泥混凝土配合比智能化设计研究进展

周杨<sup>1,2</sup> 王稷良<sup>1,2\*</sup>

1. 河北工程大学土木工程学院, 中国·河北 邯郸 056038

2. 交通运输部公路科学研究院, 中国·北京 100088

## 摘要

本文阐述了多种依据不同混凝土理论模型所建立的配合比设计技术, 深入剖析了各类配合比设计方案的特性差异, 并指出不同配合比设计体系均存在其特定的适用领域, 在实际工程应用中需结合具体工况条件选取最适宜的配合比方案。在计算机科学与材料工程交叉发展的背景下, 混凝土配比技术正经历着由经验主导向理论指导、定性分析向定量研究的转型过程。近年来, 众多研究者开始尝试将遗传算法和神经网络等智能计算方法引入混凝土配比优化领域, 并在此方向上获得了显著的研究进展。

## 关键词

水泥混凝土; 配合比设计; 智能化; 国内外研究进展

## 1 引言

传统配合比设计采用试配算法, 其核心思路遵循逐级填充原则: 首先由水与水泥形成水泥浆体, 随后用该浆体填充砂粒间隙形成砂浆, 最后用砂浆填充粗骨料空隙形成混凝土。这种计算方式精度有限, 所得配比数据往往难以满足实际工程需求。传统配合比设计方法本质上属于经验性半定量设计体系, 需通过反复试配验证, 根据初步计算结果制备试件进行强度检测, 若达标则采用该配比, 否则需持续调整

直至符合性能指标。这种依赖经验的设计模式在现代混凝土工程应用中显现出明显局限性, 特别是在配制高性能及特种混凝土时面临诸多技术瓶颈。

为突破传统方法的局限, 研究人员正积极探索新型设计理论体系, 推动配合比设计从经验主导转向理论指导。

近年来, 在物理学、化学以及计算机技术等前沿科技领域取得突破性进展的背景下, 混凝土配比方案的智能化调控与优化设计方法实现了显著提升。混凝土领域的科研工作者广泛采用计算机技术进行混凝土配合比优化设计, 并已获得显著成效<sup>[1]</sup>。计算机系统能够模拟人类的学习、推理和决策等功能, 同时基于大数据对工程难题进行深度分析, 进而实现智能推理和规划。当前主要研究方向包括全计算理论体系、模糊逻辑、基于专家系统、人工神经网络以及基因表达式编程等技术<sup>[2]</sup>。在这些创新方法中, 智能优化设计方法

【作者简介】周杨(1999—), 女, 中国河北廊坊人, 硕士, 从事混凝土配合比设计研究。

【通讯作者】王稷良(1978—), 男, 中国河北香河人, 博士, 研究员, 从事道路工程材料研究。

正日益成为学术焦点，其凭借超越传统配比设计方案的显著优势，获得了科研工作者的广泛关注。

## 2 水泥混凝土配合比的传统设计

### 2.1 基于经验的配合比设计方法

法国科学家 Feret 通过系列实验验证了混凝土强度与水泥体积分数、水体积分数以及孔隙率之间存在关联性，并在此基础上构建了混凝土强度的理论计算模型<sup>[1]</sup>，即公式。

$$f_c = k \left( \frac{c}{c+v+a} \right)$$

式中： $f_c$  代表混凝土的抗压强度； $c$ 、 $v$  和  $a$  分别代表混凝土混合物中水泥的体积、水的体积和空气的体积； $k$  为常数。

美国研究人员 Abrams 首次提出的水灰比定律，即公式。指出在原材料固定的情况下，混凝土的抗压强度仅与水灰比值存在直接关联。随后，瑞士科学家 Bolomy 在 Abrams 的研究基础上，进一步推导出了著名的 Bolomy 计算公式。

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{w/c}}$$

式中： $f_c$  代表混凝土抗压强度； $K_1$ 、 $K_2$  为经验常数、由混凝土种类决定的常数；

$W/C$  代表水和水泥的质量比。

$$f_{cu, p} = Af_{ce} \left( \frac{C}{W} - B \right)$$

式中： $f_{cu, p}$  代表混凝土抗压强度； $f_{ce}$  代表水泥强度； $C/W$  代表灰水比、 $A$ 、 $B$  为回归系数。

美国混凝土协会 ACICommittee211<sup>[6]</sup> 研发了一套针对粉煤灰增强型高强混凝土的配比设计优化方案。该技术方案主要面向抗压强度值在 41~83MPa 的常规密度非引气混凝土，其核心在于通过调整多种胶凝材料的配比参数进行系统试验，最终确定最优化的材料组合方案。

美国学者 Mehta 与 Aitcin 基于高强高性能混凝土的工程实践，创新性地提出了一种分阶段混合配比技术。两位学者研究发现，当选用级配优良的粗细骨料组合时，将水泥浆体与骨料的体积配比维持在 35:65 区间，能够显著提升高性能混凝土的耐久性能、施工和易性以及尺寸稳定性。清华大学韩建国借鉴 Mehta 和 Aitcin 的研究成果，针对高性能混凝土的配比设计问题进行了深入探索。研究探讨了混凝土性能参数间的相互作用机制，重点解析了有效水胶比、粗骨料松散堆积密度和粉煤灰活性指数三者对混凝土强度的影响规律。

混凝土配合比设计通常采用绝对体积算法，该方法的基本假设是各组分材料的实际体积之和等于拌合物的总体积。我国著名材料学家吴中伟在 20 世纪 50 年代中期就创新性地提出了基于最大密度或紧密堆积理论的配合比设计思路：将混凝土原材料划分为骨料系统和胶凝材料系统两个

部分，在具体设计过程中，首先通过测定粗细骨料混合后的孔隙率来确定最优级配比例，随后运用绝对体积法则结合试验搅拌来确定水泥浆体的富余系数，最终完成混凝土的配制工作。李克非依据紧密堆积原理提出的混凝土配合比方案存在施工和易性欠佳的问题，这将对材料长期性能产生不利影响，为此他在传统体积法基础上发展出以耐久性为核心的设计思路。

### 2.2 基于数学解析的配合比设计方法

随着混凝土使用范围的扩大，其配合比方法逐渐由经验主导转向理论指导。

陈建奎在 2000 年开发了一套完整的计算方法体系，该体系构建了具有广泛适用性的混凝土体积计算模型。Ve- 浆体体积 (L)；Ves- 干砂浆体积 (L)；Vw- 用水量 (L 或 kg/m<sup>3</sup>)；Vc, Vf, Va, Vs, Vg 分别为水泥、细掺料 (如 FA)、空气、砂子和石子的体积用量 (L)。并推导出高性能混凝土单位体积用水量及砂率的具体数学表达式，这两个数学关系式揭示了混凝土原材料组分间存在的本质性关联和固有规律，为高性能混凝土的精确配合比设计提供了理论依据。该方法实现了高性能混凝土配合比设计由经验估算向精确计算的转变，在混凝土配合比设计领域具有显著的突破性意义。

浆骨比对混凝土性能具有关键性影响，无论是新拌状态还是硬化阶段。师海霞教授的研究表明，浆骨比作为关键变量直接影响混凝土的力学性能表现。其研究主张运用等浆体体积法来优化配比方案，从而维持浆骨比例的稳定性。

叶显探索了运用紧密堆积理论进行混凝土配比优化的新途径。采用改进 Andreasen 模型对颗粒级配进行优化后，分别对配比优化后的湿堆积密度进行测试，通过测试可以筛选在加水搅拌的湿堆积体系中，用水量最少且能满足一定工作性能的基本配比。结合最紧密堆积理论和最大固相含量法进行超高性能配比设计，可以克服材料局限性，得到水泥用量较少并且性能更优的超高性能配比。

李玉龙创新性地构建了骨料混合体系的理论模型，通过该模型精确计算出两种骨料达到最密实堆积状态时的质量配比关系。基于这一研究成果，他开创性地提出了两种新型混凝土配比设计方法：浆体调控法和体积控制法。这两种配比设计理念均以骨料的最优堆积密度为核心依据，旨在实现混凝土内部孔隙率的最小化。该设计思路与现代混凝土工程的技术规范高度契合，能够有效提升混凝土制品的综合性能指标。

张万国基于颗粒堆积的物理模型，研究了混凝土配合比设计中致密堆积系数的物理本质，阐述了该系数确定方法的理论依据。通过实验室测试和现场取样，制备了具有不同空隙率的材料样本，测量了各类样本的致密堆积系数，构建了颗粒材料空隙率与致密堆积系数之间的数学关联，优化了系数测定流程。进一步探讨了普通混凝土与轻质骨料混凝土

的配比设计方法。

Pui-LamNg 等一直在发展混凝土材料的堆积和膜厚理论,以便根据混凝土中的水膜厚度(WFT)、浆膜厚度(PFT)和砂浆膜厚度(MFT)来修改高性能混凝土的配合比设计理念,如图2所示。推荐了WFT、PFT和MFT的合适范围,建立了HPC三阶段配合比设计的新体系。

欧阳东在探索混凝土配比优化过程中,首次将矿物掺合料视为第六种核心材料要素。该研究系统阐述了掺合料对力学性能的作用机理,进而推导出能够准确预测六组分混凝土抗压强度的数学表达式。

传统配合比设计方法打破了仅凭经验调配混凝土的固有模式,使混凝土配合比设计逐步转变为以科学理论为依据的准定量化过程。伴随着建筑工程技术的持续发展,混凝土配合比设计面临着更为严格的技术规范要求。

### 3 水泥混凝土配合比智能化系统

#### 3.1 人工智能方法

在我国计算机科技迅猛发展的背景下,为克服传统混凝土配比设计方法存在的试验周期长、误差偏大等问题,科研人员开始广泛运用计算机技术优化混凝土配比方案。

专家系统作为人工智能的重要分支,专注于特定专业领域内模拟人类专家的决策能力。这类系统通过整合领域专家的知识与实践经验,构建出能够处理复杂问题的智能化解决方案,其核心功能包括专业诊断、方案设计和咨询服务等。许丽萍团队开发了一套基于TURBO PROLOG语言的专家系统。整个系统架构包含三大核心功能模块:抗冻混凝土配方设计、抗碳化混凝土配方设计以及抗氯离子侵蚀混凝土配方设计。这三个功能模块不仅能精确计算出满足特定性能要求的混凝土材料配比,还可以预估混凝土的耐久性参数和服役年限。

人工智能的另一分支人工神经网络,近年来取得了突破性进展。这种技术不仅在理论层面不断深化,其实际应用范围也持续扩展。特别是在建筑结构工程和新型建材研发等专业领域,该技术已展现出显著的应用价值。

R Parichatprecha 聚焦高性能混凝土耐久性研究,通过神经网络建立了原材料配比参数与耐久性能的关联模型,特别在氯离子渗透性预测方面取得了理想效果。张军研究团队创新性地将BP神经网络引入混凝土强度预测领域,构建了针对机制砂混凝土强度变化规律的神经网络分析模型。

在混凝土配比优化领域,遗传算法展现出显著的应用价值。该算法通过模拟自然选择机制,能够有效探索广阔的解决方案空间,逐步逼近最优配比方案。相较于传统经验性

方法,这种智能算法显著提升了配比优化的速度和精度,同时能处理多参数间的非线性关联。刘富玲构建了考虑粉煤灰掺量、胶凝材料总量和水胶比等因素的非线性优化强度预测模型。该非线性优化模型的计算结果与28天实测强度数据高度吻合,准确反映了各因素对强度发展的影响规律。

周明翔采用最少浆体理论和人工神经网络的遗传算法,建立并验证机制砂混凝土配合比参数与性能指标之间非线性映射模型。该方法考虑机制砂混凝土的坍落度、抗压强度、氯离子扩散系数和抗裂性,且能减少水泥用量和碳排放,降低成本,减少试配次数和时间,具有较好的经济及环保效益。

#### 3.2 人工智能耦合方法

在混凝土配合比设计领域,单纯依赖某一种人工智能技术往往难以取得理想效果。为此,科研人员在构建计算模型和优化算法时,普遍采用多种技术手段相结合的方式,以增强模型的稳定性和运算效率。

刘国华、陈斌等创新性地融合了BP神经网络与Monte-Carlo随机试验方法。该研究基于BP神经网络构建的混凝土性能-配比关联模型作为约束框架,将成本函数设定为目标优化条件,运用Monte-Carlo随机抽样技术构建了直接优化设计体系。

为了充分发挥BP神经网络的性能优势,余晗之研究团队利用实验数据对不同配比条件下的混凝土抗压强度进行了GA-BP神经网络的模拟训练,并据此开发了满足多种性能要求的配合比优化方案。实验结果表明,相较于传统BP神经网络,经遗传算法优化的神经网络在混凝土强度预测和配比设计方面展现出更优越的性能表现。

### 4 结语

智能算法借助计算机处理能力与海量数据资源,可自动化完成混凝土配比方案制定,有效降低人为干预和主观判断的干扰,显著提升设计过程的精确度与工作效率。其不足之处在于运算复杂度较高且易出现局部优化停滞现象,往往需要借助特定优化策略来改善计算收敛性能。总体而言,智能算法为混凝土配比设计提供了诸多便利,但在实际工程应用中仍需综合考虑其局限性,同时结合常规设计方法与前沿研究成果,方能取得理想的设计成效。

#### 参考文献

- [1] 余燕妮,焦楚杰,张文华.高性能混凝土配合比智能化系统研究进展[J].混凝土,2011,(07):99-100+111.
- [2] 金立兵,段杰,吴强,等.高性能混凝土的配合比设计研究综述[J].混凝土,2023,(05):168-174.
- [3] 王尚伟,朱海堂,王博,等.混凝土配合比优化设计的紧密堆积理论综述[J].材料导报,2021,35(03):3085-3091.