

绿色再生骨料混凝土性能检测方法研究

杨金

山东省建筑工程质量检验检测中心有限公司黄岛分公司, 山东 青岛 266500

DOI:10.61369/ETQM.2026030022

摘 要： 在建筑资源紧缺与环境压力加剧的双重背景下，绿色再生骨料混凝土作为建筑废弃物资源化利用的核心载体，其工程应用价值与推广潜力取决于力学性能与耐久性的稳定性。本文系统研究绿色再生骨料混凝土的力学性能（抗压强度、抗拉强度、弹性模量等）及耐久性（抗冻性、抗渗性、抗碳化性等）核心检测指标，梳理国内外相关检测标准与技术方法，分析再生骨料取代率、处理工艺等因素对检测结果的影响机制。通过整合试验数据与工程实践案例，探讨现有检测方法的适用性与优化路径，为提升绿色再生骨料混凝土质量控制水平、推动其在绿色建筑中的规模化应用提供理论支撑与技术参考。

关 键 词： 绿色再生骨料混凝土；力学性能；耐久性；检测方法；取代率

Study on the Performance Testing Method of Green Recycled Aggregate Concrete

Yang Jin

Huangdao Branch of Shandong Construction Engineering Quality Inspection and Testing Center Co., LTD. Qingdao, Shandong 266500

Abstract： Against the dual backdrop of scarce construction resources and escalating environmental pressures, green recycled aggregate concrete (GRC) emerges as the cornerstone for resource utilization of construction waste. Its engineering value and promotion potential hinge on the stability of mechanical properties and durability. This study systematically investigates core testing parameters for GRC, including mechanical properties (compressive strength, tensile strength, elastic modulus) and durability (freeze resistance, permeability resistance, carbonation resistance). By synthesizing domestic and international testing standards and methodologies, we analyze the impact mechanisms of factors such as recycled aggregate substitution rates and processing techniques on test results. Through integration of experimental data and engineering case studies, we evaluate the applicability of existing testing methods and propose optimization pathways. These findings provide theoretical support and technical references for enhancing quality control of GRC and promoting its large-scale application in green buildings.

Keywords： green recycled aggregate concrete; mechanical properties; durability; testing methods; substitution rate

引言

（一）研究背景与意义

随着全球城市化进程的加速，建筑行业对天然骨料的需求持续攀升，而天然骨料的过度开采已引发资源枯竭、生态破坏等系列问题。与此同时，城市更新与建筑拆除产生的建筑垃圾数量激增，其中废混凝土占比超60%，传统填埋处理方式不仅占用大量土地，还会造成环境污染。在此背景下，将废混凝土加工为再生骨料并制备绿色再生骨料混凝土（Recycled Aggregate Concrete, RAC），实现建筑废弃物资源化循环利用，成为践行绿色建筑理念、推动建筑业可持续发展的必然选择。

（二）研究内容与技术路线

本文的主要研究内容包括：一是梳理绿色再生骨料混凝土力学性能（抗压强度、抗拉强度、弹性模量等）的核心检测指标与相关标准，分析不同检测方法的原理与适用范围；二是研究 RAC 耐久性关键检测指标（抗冻性、抗渗性、抗碳化性、抗氯离子侵蚀性等）的检测技术，探讨环境因素对检测结果的影响；三是结合试验数据，分析再生骨料取代率、处理工艺等因素对力学性能与耐久性检测指标的影响规律；四是提出现有检测方法的优化建议，构建适配 RAC 特性的检测方法体系。

技术路线：首先通过文献调研梳理国内外相关检测标准与研究成果；其次明确 RAC 力学性能与耐久性核心检测指标，阐述各指标检测原理与操作流程；然后结合试验案例分析影响检测结果的关键因素；最后提出检测方法优化路径，总结研究结论并展望未来研究方向。

一、绿色再生骨料混凝土力学性能检测方法

（一）核心检测指标与检测标准

绿色再生骨料混凝土的力学性能检测指标主要包括抗压强度、抗拉强度（劈裂抗拉强度、轴向抗拉强度）、抗折强度、弹性模量等，这些指标直接反映混凝土的承载能力、抗裂性能与变形特性。目前国内外相关检测标准已较为完善，国内主要依据 GB/T 50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》、JGJ 55-2011《普通混凝土配合比设计规程》等规范开展检测工作；国际上则遵循 ISO 1920 系列标准，对检测试件制备、养护条件、试验流程等进行了统一规定。

与 NAC 相比，RAC 的力学性能检测在标准框架上基本一致，但需重点关注再生骨料特性带来的检测细节调整。例如，由于 RAC 吸水率高，在试件制备过程中需合理控制骨料预湿程度，避免因自由水被过度吸收导致混凝土拌合物和易性下降，进而影响检测结果的准确性。

（二）主要力学性能检测方法

1. 抗拉强度检测

RAC 的抗拉强度较低，且易发生脆性断裂，其检测主要包括劈裂抗拉试验和轴向抗拉试验两种方法，其中劈裂抗拉试验因操作简便、适用性强，在工程检测中应用更为广泛。

劈裂抗拉强度检测原理：利用立方体试件在劈裂力作用下，在竖向平面内产生均匀布拉应力，直至试件劈裂破坏，通过破坏荷载计算劈裂抗拉强度。检测流程：试件制备与养护同抗压强度检测；试验加载时，在试件上下表面放置垫条，确保荷载作用线通过试件中心，加载速度控制在 0.05~0.10MPa/s，记录劈裂破坏荷载；劈裂抗拉强度 $f = 2F/(\pi A)$ 。轴向抗拉强度检测则采用棱柱体试件，直接施加轴向拉力，测量试件破坏时的拉力值计算强度，但该方法对试验设备精度要求较高，且试件制备难度大，实际应用较少。

数据显示，当再生骨料取代率达到 60% 以上时，RAC 的劈裂抗拉强度下降可达 25%，主要原因是再生骨料之间的粘结力弱于天然骨料，界面过渡区易成为受力薄弱环节。在检测过程中，需严格控制试件的平整度与加载偏心，避免因附加应力导致检测结果失真。

2. 弹性模量检测

弹性模量反映 RAC 在弹性阶段抵抗变形的能力，是结构变形计算的重要参数。检测方法主要采用静态弹性模量测定法，依据 GB/T 50081-2019 规范执行。

检测原理：对棱柱体试件施加分级轴向压力，测量试件在弹性阶段的轴向应变与横向应变，根据应力-应变关系计算弹性模量。检测流程：制备 150mm×150mm×300mm 的棱柱体试件，标准养护 28 天后，在试件两端粘贴应变片，放置于压力试验机上；先施加 0.5MPa 的初始压力，消除试件间隙，然后分级加载至轴心抗压强度的 40%，记录每级荷载下的轴向应变值；弹性模量 $E = (\sigma - \sigma_0) / (\varepsilon - \varepsilon_0)$ ，其中 σ_0 、 σ 为初始应力与终止应力， ε_0 、 ε 为对应应力下的轴向应变。

RAC 的弹性模量明显低于同强度等级的 NAC，通常下降范围在 20% 以内。以 C30 混凝土为例，普通 NAC 的弹性模量约为 30GPa，而 RAC 一般为 24~26GPa，这与再生骨料本身弹性模量

较低及界面弱化有关。在检测过程中，需精准控制加载速率与分级荷载，确保试件处于弹性变形阶段，避免因荷载过大导致塑性变形影响检测结果。

二、绿色再生骨料混凝土耐久性检测方法

（一）耐久性检测的核心意义与指标体系

耐久性是指绿色再生骨料混凝土在服役环境中抵抗风化、侵蚀、冻融等破坏作用，保持其原有性能的能力，直接决定混凝土结构的服役寿命。由于再生骨料孔隙率高、界面过渡区存在微裂缝，RAC 的耐久性普遍低于 NAC，尤其在寒冷、沿海、高盐等恶劣环境下，易发生冻融破坏、氯离子侵蚀、碳化等病害。因此，建立科学的耐久性检测指标体系，对保障 RAC 结构安全具有重要意义。

RAC 耐久性检测指标主要包括抗冻性、抗渗性、抗碳化性、抗氯离子侵蚀性、抗硫酸盐侵蚀性等，各指标分别对应不同的破坏机制。国内相关检测标准主要依据 GB/T 50082-2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》，国际上则参考 ASTM C1202、ASTM C1012 等标准，对检测方法 with 评价指标进行了规范。

（二）主要耐久性检测方法

1. 抗冻性检测

抗冻性是衡量 RAC 在寒冷地区适用性的关键指标，反映混凝土抵抗冻融循环破坏的能力。检测方法主要采用快速冻融试验法，通过模拟冻融循环环境，评估混凝土的质量损失率与相对动弹性模量变化。

检测原理：混凝土内部孔隙中的水分在冻融循环过程中发生膨胀与收缩，产生内应力，导致微裂缝扩展，最终引发混凝土破坏。通过测定不同冻融循环次数后混凝土的质量与动弹性模量，量化其抗冻性能。检测流程：制备 100mm×100mm×400mm 的棱柱体试件，标准养护 28 天后，测量初始质量 m 与初始动弹性模量 E ；将试件放入冻融试验箱，按照“-20℃冻结 4h→20℃融化 4h”为一个循环周期，进行连续冻融循环；每完成 50 次循环，测量试件的质量 m 与动弹性模量 E ；计算质量损失率 $\Delta m = (m - m_0) / m_0 \times 100\%$ ，相对动弹性模量 $E = E_0 / E \times 100\%$ 。

根据 GB/T 50082-2009 标准，当相对动弹性模量下降至 60% 以下或质量损失率超过 5% 时，认为混凝土抗冻性能失效。试验表明，当再生骨料取代率为 50% 时，RAC 经过 300 次冻融循环后，质量损失率超过 3%，而 NAC 仅为 1.5% 左右，说明再生骨料的掺入显著降低了混凝土的抗冻性能。采用 Weibull 分布对试件退化过程进行建模，发现质量损失率较动弹性模量对冻融破坏更为敏感，可作为抗冻性能评价的优先指标。

2. 抗渗性与抗氯离子侵蚀性检测

RAC 孔隙连通率较高，抗渗性能普遍较差，易导致氯离子、水分等有害介质渗入内部，引发钢筋锈蚀。抗渗性检测主要采用渗水高度法，抗氯离子侵蚀性检测则常用电通量法与 RCM 法（快速氯离子迁移法）。

渗水高度法检测原理：在一定水压力作用下，测量水在混凝土试件中渗透的高度，评估混凝土的抗渗等级。检测流程：制备 $\Phi 175\text{mm} \times 185\text{mm} \times 150\text{mm}$ 的圆台体试件，标准养护 28 天后，进行侧面密封处理；将试件安装于抗渗仪中，施加水压力，初始

压力为0.1MPa，每8小时增加0.1MPa，直至试件端面出现渗水现象，记录此时的水压力与承压时间，确定抗渗等级。

电通量法检测原理：利用氯离子的导电特性，通过测定混凝土试件在电场作用下的电通量，评估氯离子渗透能力。检测流程：制备 $\Phi 100\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的圆柱体试件，养护28天后，将试件浸泡于氯化钠溶液中饱和；将试件安装于电通量测试装置，施加60V直流电压，测量6小时内通过试件的总电通量。根据电通量值可将混凝土抗氯离子渗透性分为五个等级，电通量越小，抗氯离子侵蚀性能越强。

试验数据显示，RAC的氯离子扩散系数一般高于NAC约30%~50%，抗渗等级较NAC降低1~2级。在配合比中掺入15%~20%的粉煤灰或矿粉，可通过二次水化反应填补微细孔隙，显著降低渗透系数，提升抗渗与抗氯离子侵蚀性能。

3. 抗碳化性检测

混凝土碳化是指空气中的二氧化碳与混凝土内部的氢氧化钙发生化学反应，导致混凝土碱性降低，破坏钢筋钝化膜，引发钢筋锈蚀。抗碳化性检测主要采用快速碳化试验法，通过模拟加速碳化环境，测量碳化深度评估混凝土的抗碳化能力。

检测原理：在人工控制的二氧化碳浓度、温度与湿度环境下，加速混凝土碳化过程，通过酚酞指示剂显色反应，测定不同碳化时间后的碳化深度。检测流程：制备 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的立方体试件，标准养护28天后，将试件侧面密封，仅保留两个相对表面作为碳化面；将试件放入碳化试验箱，设定二氧化碳浓度为 $20 \pm 3\%$ 、温度 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 、湿度 $70 \pm 5\%$ ；分别在碳化3天、7天、14天、28天后取出试件，沿横断面劈开，在劈开面喷洒酚酞指示剂，测量碳化深度（未变色区域为未碳化部分，变色区域为碳化部分）。

RAC的碳化深度大于NAC，尤其在干湿循环环境下更为显著。当再生骨料取代率为100%时，RAC的28天碳化深度较NAC增加40%以上。采用硅灰、粉煤灰等活性矿物掺合料，可提高混凝土碱性保持能力，减少碳化深度；表面涂刷氟硅涂料等防护层，也能有效阻挡二氧化碳侵入，提升抗碳化性能。

三、工程实践案例分析

（一）案例概况

以上海市市政道路基层工程为例，该工程采用绿色再生骨料

混凝土铺设路面基层，再生骨料来源于当地建筑拆除产生的废混凝土，经机械破碎、高压水洗、筛分处理后，再生粗骨料取代率控制在40%，配合比中掺入18%的粉煤灰和聚羧酸减水剂。为保障工程质量，对RAC的力学性能与耐久性进行了系统检测，检测依据GB/T 50081-2019、GB/T 50082-2009等标准执行。

（二）检测结果与分析

力学性能检测结果显示，该RAC的28天抗压强度为32.5MPa，达到C30强度等级要求，较同配合比NAC降低8%；劈裂抗拉强度为2.8MPa，较NAC降低12%；弹性模量为25.6GPa，较NAC降低14.7%，检测结果符合JGJ/T 443-2018规范对非结构部位的性能要求。

耐久性检测结果表明，经过300次冻融循环后，该RAC的质量损失率为2.3%，相对动弹性模量为72.5%，均满足抗冻性能要求；28天碳化深度为6.2mm，较同强度等级NAC增加35%，通过表面涂刷氟硅涂料进行防护处理后，碳化深度降至3.1mm；电通量检测值为1200C，抗氯离子渗透性等级为Ⅲ级，满足市政道路基层使用环境要求。

工程服役5年后的现场监测数据显示，该道路基层未出现明显裂缝、剥落等耐久性病害，RAC性能保持稳定，说明在合理控制再生骨料取代率、优化配合比与施工工艺的前提下，通过科学的检测方法控制质量，RAC可满足市政基础设施工程的使用要求。

四、结论与展望

（一）研究结论

本文系统研究了绿色再生骨料混凝土力学性能与耐久性检测方法，得出以下主要结论：

1. 绿色再生骨料混凝土力学性能核心检测指标包括抗压强度、抗拉强度、弹性模量等，现有检测方法以GB/T 50081-2019、ISO 1920系列标准为依据，需通过增加试件数量、优化骨料预湿工艺、采用超声-回弹综合法等措施，提升检测结果的准确性与针对性，适配RAC性能离散性大的特点。

2. 耐久性检测指标主要涵盖抗冻性、抗渗性、抗碳化性、抗氯离子侵蚀性等，快速冻融试验、电通量法、快速碳化试验等是常用检测方法。开发加速老化检测技术、完善微观结构辅助检测手段、建立多因素耦合检测体系，是提升耐久性检测效率与适用性的关键方向。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家标准. GB/T 50081-2019 混凝土物理力学性能试验方法标准 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2019.
- [2] 中华人民共和国国家标准. GB/T 50082-2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2009.
- [3] 肖建庄. 再生混凝土结构技术标准 JGJ/T 443-2018 解读 [J]. 建筑结构学报，2020，41(12): 1-8.
- [4] 王军. 再生骨料混凝土在绿色建筑中的力学性能与耐久性分析 [J]. 新型建筑材料，2025，52(10): 45-50.
- [5] 北京中科光析科学技术研究所. 再生骨料替代率分析报告 [R]. 北京：2025.
- [6] Li J, Zhang Y. Exploring mechanical characteristics of recycled concrete aggregates from demolition waste: advancements, challenges, and future directions[J]. Sustainable Construction Materials, 2025, 18: 100-115.
- [7] 张明. 再生骨料混凝土试验研究及可靠性分析 [D]. 西安：西安建筑科技大学，2025.
- [8] 卢凤军. 再生骨料混凝土力学性能与耐久性检测方法优化分析 [J]. 工程与建设，2025，39(2): 458-460.
- [9] 刘凯华，陈细渊，邹超英，等. 再生粗骨料强化工艺对再生混凝土力学性能及耐久性能的影响 [J]. 混凝土，2024(6): 134-137.
- [10] 张宇. 再生骨料混凝土试验研究及可靠性分析 [D]. 西安：西安建筑科技大学，2025.