工程科学与实践
Evidence in Engineering Science and Practice

研究论文

DOI: 10.63221/eesp.v2i04.49-54

亮点:

- 系统揭示 RAPC 有效孔隙率、透水系数与抗压强度的协同演变规律
- 采用图像分析法量化平面孔隙率、等效孔径、周长、比表面积、形状因子等孔隙特征。
- 提出复合孔隙特征参数 R，透水系数与其呈二次多项式关系，优于单一参数线性拟合。

***通讯作者邮箱:**

man200177@163.com

英文引用: Yang Qing et al., 2026. Study on Permeability and Pore Characteristics of Recycled Aggregate Pervious Concrete under Different Design Porosities. Evidence in Engineering Science and Practice, 2 (04), 49-54.

中文引用: 杨晴等., 2026. 不同设计孔隙率下再生骨料透水混凝土透水性能及孔隙特征研究. 工程科学与实践, 2 (04), 49-54.

稿件处理节点:

接收	2026 年 11 月 9 日
修订	2026 年 11 月 13 日
接受	2026 年 11 月 13 日
发表	2026 年 11 月 15 日

基金资助:

河南省自然科学基金(262102320132)

版权:

本作品原创内容可依据《知识共享署名 4.0 国际许可协议》条款使用。任何对本作品的后续分发须标明原作者及作品标题、期刊引用及 DOI 信息。

不同设计孔隙率下再生骨料透水混凝土透水性能及孔隙特征研究

杨晴 [1], 冯东阁 [2], 陈守开 [3,*], 汤培康 [3]

[1] 河南省中工设计研究院集团股份有限公司，郑州 450052

[2] 中国电建集团贵州工程有限公司，贵阳 550002

[3] 华北水利水电大学，郑州 450046

摘要 本文以再生骨料透水混凝土（RAPC）为研究对象，探究设计孔隙率为 20%、25%和 30%时其透水性能、抗压强度及孔隙结构的演变规律。采用排水法测定有效孔隙率，采用自制常水头装置测定透水系数，并测试 28d 抗压强度；借助图像分析法和 Image Pro Plus 软件量化平面孔隙特征参数。通过线性回归、多元线性回归和二次多项式拟合，分析设计孔隙率与有效孔隙率、透水系数、抗压强度及孔隙结构参数之间的关系。结果表明：有效孔隙率随设计孔隙率增大由 19.27%增至 30.36%；透水系数随有效孔隙率增加呈指数增长；随设计孔隙率增大，平面孔隙率、平均等效孔径、周长和分形维数呈增大趋势，孔数、比表面积和平均形状因子呈减小趋势；抗压强度随平面孔隙率和周长增大而降低，随比表面积和形状因子增大而提高，透水性能规律与之相反；透水系数与单一平面孔隙特征参数呈不同程度线性相关（相关系数 0.8~0.9，分形维数相关性较差），与复合孔隙特征参数 R 满足二次多项式关系，含分形维数的多元回归模型 R^2=0.948。研究结果可为 RAPC 透水性能表征与优化设计提供依据。

关键词： 再生骨料透水混凝土；设计孔隙率；透水系数；孔隙结构；图像分析法

Study on Permeability and Pore Characteristics of Recycled Aggregate Pervious Concrete under Different Design Porosities

Yang Qing [1], Feng Dongge [2], Chen Shoukai [3,*], Tang Peikang [3]

[1] Henan Zhonggong Design & Research Group Co., Ltd., Zhengzhou 450052

[2] Power China Guizhou Engineering Co., Ltd., Guiyang 550002

[3] North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046

Abstract This study investigates recycled aggregate pervious concrete (RAPC) to explore the evolution laws of its permeability performance, compressive strength, and pore structure under designed porosities of 20%, 25%, and 30%. The effective porosity was measured by the drainage method, the permeability coefficient was determined using a self-made constant-head apparatus, and the 28d compressive strength was tested. Planar pore characteristic parameters were quantified by image analysis and Image Pro Plus software. Linear regression, multiple linear regression, and quadratic polynomial fitting were used to analyze the relationships between the designed porosity and the effective porosity, permeability coefficient, compressive strength, and pore structure parameters. The results show that the effective porosity increased from 19.27% to 30.36% with increasing designed porosity; the permeability coefficient increased exponentially with increasing effective porosity; with increasing designed porosity, the planar porosity, average equivalent pore diameter, perimeter, and fractal dimension showed increasing trends, while the number of pores, specific surface area, and average shape factor showed decreasing trends; the compressive

strength decreased with increasing planar porosity and perimeter, and increased with increasing specific surface area and shape factor, while the variation trend of permeability performance was opposite; the permeability coefficient exhibited varying degrees of linear correlation with individual planar pore characteristic parameters (correlation coefficients of 0.8–0.9, while the fractal dimension showed poor correlation), and had a quadratic polynomial relationship with the composite pore characteristic parameter R; the multiple regression model incorporating the fractal dimension yielded R^2 = 0.948. The results can provide a basis for characterizing and optimizing the permeability performance of RAPC.

Keywords: Recycled aggregate pervious concrete; Designed Porosity; Permeability coefficient; Planar pore characteristics

1. 引言

随着城市化进程的加速，我国城市建筑垃圾年产量已达到 20 亿吨，约占城市固体废物总量的 40%[1]。传统建筑垃圾的处置方式主要是露天堆放或简单填埋，这种处置方式不仅会造成巨大的资源浪费，而且污染了土壤、大气、地下水，使得环境问题更为突出[2-3]。目前，对建筑垃圾进行建材化利用是城市建筑垃圾资源化利用的主要方式，建材化利用产品主要包括再生混凝土、再生砖块等，其实现方式主要是将建筑垃圾加工为再生骨料、水泥、再生微粉等原料，用于生产相关制品[4]。然而，传统透水混凝土多依赖天然骨料，其资源消耗与开采带来的环境负担逐渐引发关注。再生骨料透水混凝土（Recycled Aggregate Pervious Concrete, RAPC）通过回收建筑废弃混凝土制备骨料，不仅减少了资源浪费，还契合循环经济理念，近年来成为绿色建材领域的研究热点。

透水混凝土的性能与其内部孔隙结构密切相关。孔隙率、孔径分布、连通性等孔隙特征参数将直接影响其渗透性能、力学性能及耐久性。现有研究表明，设计孔隙率是调控透水混凝土性能的关键因素之一，但再生骨料的引入会改变孔隙结构的复杂性，可能导致孔隙分布不均、连通性降低，进而影响透水性能与力学性能的平衡。El-Hassan 等[5]实验得出在透水混凝土加入再生骨料，可增大孔隙率和渗透系数，降低坍落度和硬化密度，由于骨料-砂浆界面较弱，其力学性能和耐磨性会受到不利影响。Zaetang 等[6]研究测得，不同替代水平下，再生透水混凝土孔隙率范围是 23%~25%，天然透水混凝土孔隙率为 25%，并得出替代率对再生透水混凝土的孔隙率影响很小的结果。陈守开等[7]研究得出再生粗骨料掺量与孔隙率变化无明显的规律关系，透水系数随孔隙率增加而增大规律明显。此外，双粒级再生粗骨料会提高再生透水混凝土的抗压强度，但同时会降低其孔隙率及透水性。孔隙率和力学性能互为矛盾，孔隙率越高，RAPC 强度越低[8]。

目前，针对 RAPC 的研究多聚焦于单一性能指标（如透水系数或抗压强度）的优化，而对不同设计孔隙率下孔隙结构的系统性演变规律及其与宏观性能的定量关联机制仍缺乏深入探讨。基于此，本研究以RAPC为研究对象，通过三种设计孔隙率为20%、25%、30%试件，结合图像分析法量化平面孔隙特征参数（如等效孔径、周长、形状因子、分形维数等），并采用韦伯分布、对数正态分布等统计模型及灰色关联理论，系统探究设计孔隙率对 RAPC 透水性能与孔隙结构的影响规律，为 RAPC 的优化设计与工程应用提供理论支撑。

2. 试验材料及方法

2.1. 原材料及配合比设计

再生骨料是将混凝土路面破碎和筛分后得到，其粒径为 4.75-19mm。水泥为 P·O 42.5 型普通硅酸盐水泥。

透水混凝土配合比设计时按设计孔隙率进行计算，一般透水混凝土孔隙率范围为 15%～35%[9]。本次试验选定设计孔隙率为20%，25%和30%，水灰比设定为 0.3。按照《透水水泥混凝土路面技术规程》（CJJ/T135-2009）确定 RAPC 试验配合比，详见表 1。

表 1 试验配合比(kg/m³)

编号	水泥	再生骨料		水
		4.75-9.5mm	9.5-19mm	
RAPC-20	378.17	678.38	452.25	144.00
RAPC-25	323.46	678.38	452.25	127.59
RAPC-30	270.07	678.38	452.25	111.57

2.2. 试验方法

（1）孔隙率

采用排水法测定有效孔隙率。具体步骤如下：将试件养护至 28d 取出，将其完全浸泡在水中 24h，测定试件在水中的重量；用干毛巾擦干试件表面水分，将其置于 60℃烘箱中烘 24h 后，测定试件的重量。

（2）透水系数

本实验采用常水头法，该方法的核心机制是在测试过程中维持恒定水压，通过计量单位时间内透过试样的水流量，进而计算得出透水系数。测试步骤如下：从养护室取 28d 龄期的 RAPC 试件，四侧抹水泥净浆后自然风干 24h；将试件装入透水试验装置，橡皮泥密封上表面与装置缝隙；注水调节流量至水流稳定，用量筒接水 50s 后称量水体质量。公式如式（1）：

$$K=\frac{VL}{AHt} \quad (1)$$

式中：K 为透水系数，mm/s；V 为时间 t 秒内渗出的水量，m^3；L 为试样的厚度，mm；A 为试件的面积，mm^2；H 为水位差，mm，本试验取值为 200mm；t 为时间，s。

（3）抗压强度

测定 RAPC 的 28d 抗压强度，到相应龄期后从养护室取出，将其表面的水分擦干在 YAW-5000 微机控制电液伺服压力试验机上进行测试。

（4）平面孔隙结构

RAPC 的再生骨料会增大混凝土的总孔隙率和平均孔径，使得大孔径孔隙增多，本文采用图像法和计算机图像处理软件 Image Pro Plus 来分析 RAPC 的孔结构。

3. 结果与讨论

3.1. 有效孔隙率与透水系数

图 1 为 RAPC 有效孔隙率与透水系数的关系。透水系数随着有效孔隙率的增大而增大，本次 RAPC 试块实测透水系数最小为 1.72 mm/s，对应有效孔隙率为 19.27%；最大为 2.2 mm/s，对应有效孔隙率为 30.36%。本文对 36 组透水系数与有效孔隙率的数据进行指数回归分析，相关系数 R^2=0.74，本次试验 RAPC 制备采用了连续双粒级再生骨料，其成型过程中两种骨料分布相对随机，使其孔隙结构比单粒级更加复杂；另外，试验所用的再生骨料颗粒形状含有较多的针片状，也会产生较多复杂的孔隙，这些复杂的孔隙结构使得影响透水系数的因素增多，进而影响相关系数的大小[10]。

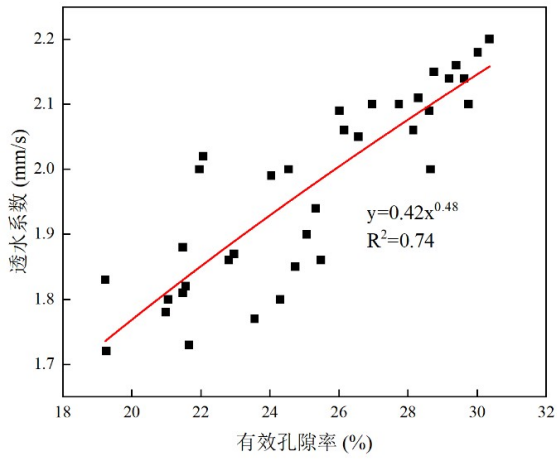


图 1 有效孔隙率与透水系数

3.2. RAPC 平面孔隙结构

（1）RAPC 平面孔隙特征参数

表 2 给出了不同设计孔隙率下 RAPC 平面孔隙特征参数的统计结果。由表可知，孔隙率增加时，平面总孔隙面积、平面孔隙率、平均等效孔径、周长及分形维数呈递增趋势，而孔数量、比表面积和平均形状因子递减。设计孔隙率提高使大孔径占比增加、小孔径占比减少，导致比表面积下降；孔数量增加未必提升透水性，仅大孔径占比达阈值时透水系数显著增大[11]。平均形状因子随孔隙率增大而减小，表明圆形孔隙（较椭圆形）因减少流动阻力更利于流体渗透。

表 2 不同孔隙率下平面孔隙分布特征

孔隙率	孔数/个	平面总孔隙面积/mm²	平面孔隙率/%	平均等效孔径/mm	周长/mm	比表面积/mm⁻¹	平均形状因子	分形维数
20%	212	5061.24	35.15	4.43	23.18	1.14	3.31	1.2011
25%	202	5467.32	37.97	4.50	24.20	1.12	3.29	1.2021
30%	195	6931.44	48.14	4.83	28.56	1.00	2.80	1.2088

（2）孔隙特征参数对 RAPC 抗压强度的影响

图 2 为平面孔隙特征参数与 RAPC 抗压强度之间的关系，可以看出抗压强度与平面孔隙率、周长呈负相关性，而与比表面积和形状因子呈正相关[12]。平面孔隙率和周长越大，混凝土内部的孔越多，导致 RAPC 的力学性能下降；比表面积越大，混凝土内部小孔的数量越多，则会形成均匀致密的孔结构，因此可以承受较大的应力[13]；形状因子越大，混凝土内部圆形孔数量越少而椭圆形孔数量增加，这说明椭圆形孔是有利于提高 RAPC 的力学性能。

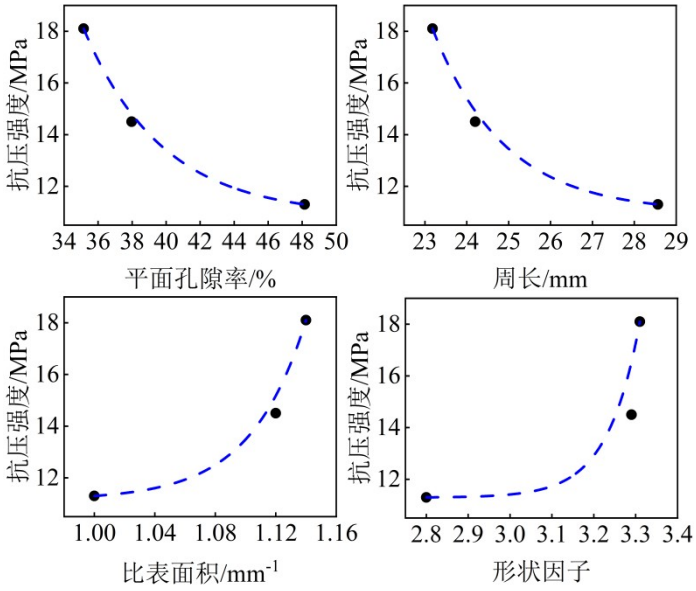


图 2 抗压强度与孔隙特征参数之间的关系

（3）孔隙特征参数对 RAPC 透水系数的影响

图 3 展示了单一孔隙特征参数与透水系数的关系。平面孔隙率、周长、比表面积和形状因子与透水系

数具有良好的线性相关关系，相关系数在 0.8~0.9 之间，而分形维数与透水系数相关性较差。平面孔隙率、周长和分形维数与 RAPC 的透水性能呈正相关，而比表面积、形状因子与透水性能成反比，呈现的规律恰与抗压强度相反。

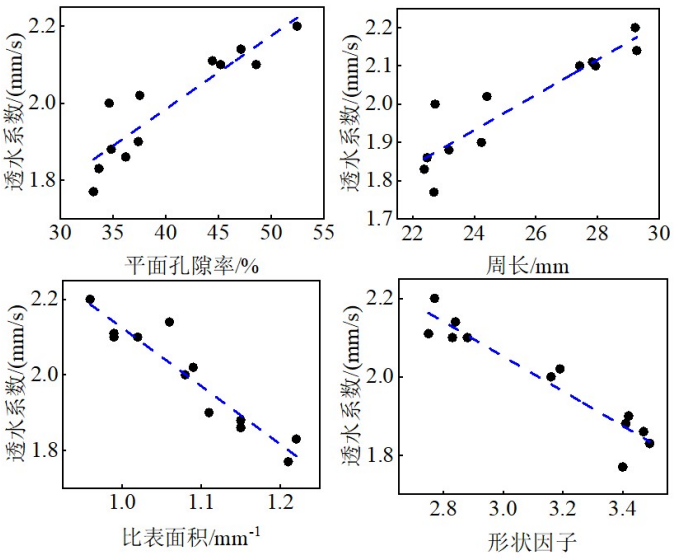


图 3 透水系数与孔隙特征参数之间的关系

由上述分析可知，单一的孔隙特征参数在一定程度上能够表达 RAPC 透水性能的变化规律，但其表征结果往往不全面、不系统，且相关性受干扰较大。为此，本文提出综合考虑不同孔隙特征参数对透水系数的影响。采用式（2）定义复合孔隙特征参数 R：

$$R=\sum \alpha_i R_i \quad (2)$$

式中：R_i 为不同孔隙特征参数，本文取 i=1~4，其中 R_1 为平面孔隙率（%），R_2 为周长（mm），R_3 为比表面积（mm-1），R_4 为形状因子；α_i 为不同孔隙特征参数对透水系数的影响程度，通过多元线性回归分析得到α_1~α_4，分别为-0.0055、0.0766、-0.6556 和 0.3153。

根据式（3），计算不同孔隙率的复合孔结构参数 R 并绘制其与透水系数的关系图。图 4 中显示出，两者满足二次多项式关系，相关系数为 0.957，较单一参数拟合的相关性显著提升，表明通过综合考虑各孔隙特征参数对透水系数的影响，可以提高两者拟合度和相关性。

$$k_0=-0.275R^2+2.145R-1.204 \quad (3)$$

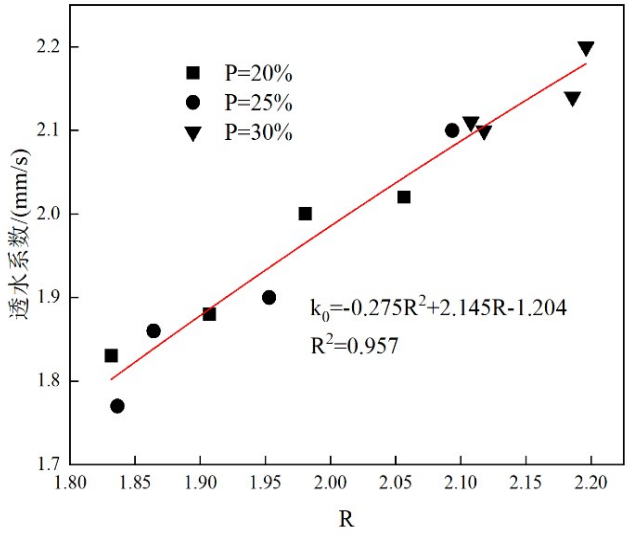


图 4 透水系数与复合孔隙特征参数拟合

在复合孔隙特征参数的基础上加上分形维数对透水系数的影响，建立多因素透水系数计算模型，如式（4）。回归分析结果如图 5 所示，R^2=0.948，且 P 值小于 0.05，表明此模型可以用来更好地描述不同孔隙率下透水系数与孔结构之间的定量关系。

$$k=-73.420+3.032R+117.819D-0.499R^2-48.638D^2 \quad (4)$$

式中：k 为透水系数，mm/s；R 为复合孔隙特征参数；D 为分形维数。

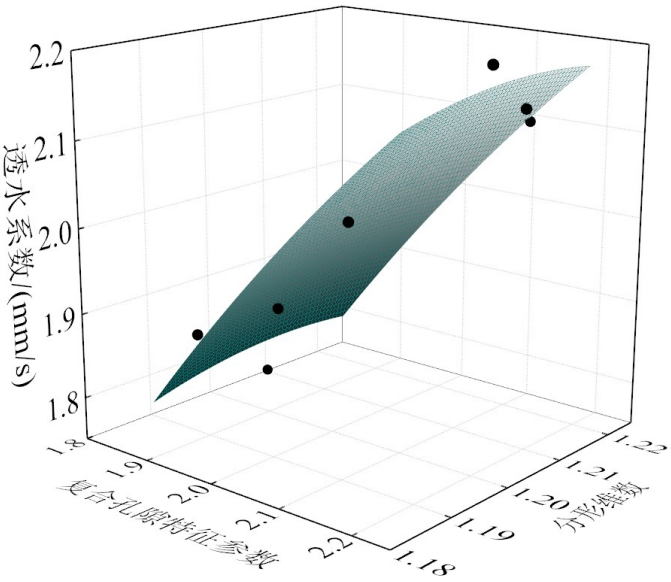


图 5 透水系数的多元回归分析

4. 结论

本文针对 RAPC，研究了 20%、25%和 30%三种不同设计孔隙率下 RAPC 的透水性能和孔隙结构，得出主要结论如下：

（1）RAPC 有效孔隙率随设计孔隙率增大而升高；透水系数随有效孔隙率增加递增，密度显著递减；初始透水系数与有效孔隙率遵循指数函数规律。此外，平面总孔隙面积、平面孔隙率、平均等效孔径及周长随孔隙率增大而递增，比表面积与平均形状因子递减。

（2）RAPC 抗压强度与平面孔隙率、周长、分形维数呈负相关性，而与比表面积和形状因子呈正相关；透水性能与抗压强度的规律相反，其中分形维数与透水系数相关性较差。RAPC 初始透水系数与平面孔隙率、周长等单一平面孔隙特征参数表现出不同程度的线性相关性；RAPC 初始透水系数与综合考虑不同孔隙特征参数的复合孔结构参数满足二次多项式的规律关系，其相关系数可达 0.95 以上。

参考文献

[1] 黄磊, 林绍福, 刘希亮, 等. 探索城市更新消耗: 一种基于高分遥感影像的城市建筑垃圾年产量快速估算方法[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26(09): 2192- 2212.

[2] 张谌. 上海市露天固废堆放场地识别和分析[D]. 华东师范大学, 2024.

[3] 海南省海口市建筑垃圾管理粗放生态破坏和环境污染问题多发[J]. 中国环境监察, 2024, (01): 24- 25.

[4] 仇培涛. 硫酸腐蚀下大孔隙混凝土孔隙结构和渗透性演化规律研究[D]. 中国矿业大学, 2020.

[5] El-Hassan H, Kianmehr P, Zouaoui S. Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag[J]. Construction and Building Materials, 2019, 212: 164-175.

[6] Zaetang Y, Sata V, Wongsa A, et al. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2016, 111: 15-21.

[7] 陈守开, 常承艳, 郭磊, 等. 再生骨料掺量对透水混凝土性能的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(01): 98- 108.

[8] 澹台旭辉. 影响再生骨料混凝土力学性能的因素[J]. 石材, 2024, (01): 55- 58.

[9] 黄志伟, 薛志龙, 郭磊, 等. 骨料级配对再生透水混凝土性能的影响[J]. 人民黄河, 2021, 43(04): 147- 150+ 154.

[10] 任强, 张吉, 蒋正武, 等. 骨料多尺度粒形表征及其对混凝土性能影响[J/OL]. 建筑材料学报, 1- 14[2025- 05- 11].

[11] 陈守开, 卢鹏, 李炳林, 等. 不同纤维对再生骨料透水混凝土性能的影响与评价[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(01): 208- 218.

[12] 赵云鹏. 单掺废玻璃颗粒再生骨料透水混凝土孔结构及增强机理研究[D]. 华北水利水电大学, 2022.

[13] 张启懿, 邹春霞, 郭晓松, 等. NaOH 改善粉煤灰混凝土微结构及抗风蚀-冻融耐久性能[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(04): 131- 140.