

再生粗骨料混凝土静动态抗压强度离散性试验研究

王小娟 李润琳 周宏元 母崇元 乔崎云

Experimental investigation on discreteness of quasi-static and dynamic compressive strength of recycled aggregate concrete

WANG Xiaojuan, LI Runlin, ZHOU Hongyuan, MU Chongyuan, QIAO Qiyun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231113.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

再生粗骨料硅烷浸渍处理对混凝土介质传输性能的影响

Effect of recycled coarse aggregate after strengthening by silane impregnation on mass transport of concrete

复合材料学报. 2020, 37(10): 2602–2609 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200316.002>

直剪作用下再生混凝土力学性能及强度指标换算

Mechanical properties and strength index conversion of recycled aggregate concrete under direct shear

复合材料学报. 2021, 38(11): 3962–3970 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210122.001>

碱、盐环境下不同应力水平FRP筋抗压强度试验与理论研究

Experimental and theoretical study on compressive strength of FRP rebars under different stress levels in alkali and salt solution

复合材料学报. 2017, 34(10): 2220–2231 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170106.001>

新拌超高性能纤维增强混凝土流动性能对其抗压强度的影响

Influence of the fresh ultra-high performance fiber reinforced concrete flowability on its compressive strength

复合材料学报. 2021, 38(11): 3827–3837 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210115.005>

基于Griffith破坏准则的FRP约束未损伤混凝土和损伤混凝土的抗压强度统一模型

Unified strength model based on Griffith failure criterion for FRP-confined undamaged and damaged concrete

复合材料学报. 2020, 37(9): 2358–2366 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191223.002>

钢纤维-聚丙烯纤维混杂对再生混凝土抗冲击性能的影响

Effect of steel fiber-polypropylene fiber hybrid addition on impact resistance of recycled aggregate concrete

复合材料学报. 2020, 37(7): 1763–1773 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191106.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

再生粗骨料混凝土静动态抗压强度离散性试验研究



分享本文

王小娟¹, 李润琳¹, 周宏元^{*1,2}, 毋崇元¹, 乔崎云¹

(1. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124;

2. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为研究再生粗骨料 (RCA) 替代率和应变率对再生粗骨料混凝土 (RAC) 抗压强度离散性的影响, 制备了 3 种不同 RCA 替代率的 RAC (0%、50%、100%), 分别进行准静态压缩及霍普金森压杆 (SHPB) 试验, 与概率统计分析理论, 对 RAC 抗压强度结果进行分析讨论。结果表明: 准静态压缩下, RAC 抗压强度离散程度随 RCA 替代率增加变化不显著, 但表现出先增加后减小的趋势; SHPB 试验应变率为 50~120 s⁻¹ 时, 受 RCA 替代率和应变率的共同影响, 同一应变率下 RAC 动态抗压强度离散程度随 RCA 替代率增加而增加, 同一 RCA 替代率下 RAC 动态抗压强度离散程度随应变率增加逐渐减小。此外, 对传统 Weibull 分布模型引入替代率和应变率参数进行修正, 考虑到抗压强度离散性可能影响结构设计的安全性, 提出了在任意保证率下具有不同 RCA 替代率的 RAC 动态抗压强度预测公式。

关键词: 再生混凝土; 离散性; 准静态压缩试验; 霍普金森压杆试验; 抗压强度

中图分类号: TU528; TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)06-3092-11

Experimental investigation on discreteness of quasi-static and dynamic compressive strength of recycled aggregate concrete

WANG Xiaojuan¹, LI Runlin¹, ZHOU Hongyuan^{*1,2}, MU Chongyuan¹, QIAO Qiyun¹

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To explore the influence of the substitute rate of recycled coarse aggregate (RCA) and strain rate on the discreteness of the compressive strength of recycled aggregate concrete (RAC), RAC specimens with three different RCA substitute rates were prepared for both quasi-static compression and split Hopkinson pressure bar (SHPB) tests. The test results show that despite the limited change in the discreteness of compressive strength of RAC with increasing RCA substitution rate, it still tends to initially increase and then decrease as the RCA substitution rate increases. The results of the SHPB test indicate that both the RCA substitute rate and the strain rate exert a significant influence on the variability of the dynamic compressive strength of RAC. The dynamic compressive strength discreteness of RAC with the same RCA substitute rate gradually decreases with increasing strain rate, while it increases with increasing RCA substitute rate under the same strain rate. In addition, the traditional Weibull distribution model was modified by introducing the parameters of RCA substitute rate and strain rate, and a dynamic compressive strength prediction formula for RAC with different RCA substitute rates at any given probability level was proposed.

收稿日期: 2023-08-24; 修回日期: 2023-09-24; 录用日期: 2023-11-02; 网络首发时间: 2023-11-14 10:33:27

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231113.001>

基金项目: 国家自然科学基金 (52278477; 52178096); 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室开放基金 (KFJJ23-12M)

National Natural Science Foundation of China (52278477; 52178096); Open Foundation of State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology (KFJJ23-12M)

通信作者: 周宏元, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为吸能材料、结构防护、结构抗爆设计 E-mail: hzhou@bjut.edu.cn

引用格式: 王小娟, 李润琳, 周宏元, 等. 再生粗骨料混凝土静动态抗压强度离散性试验研究 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(6): 3092-3102.

WANG Xiaojuan, LI Runlin, ZHOU Hongyuan, et al. Experimental investigation on discreteness of quasi-static and dynamic compressive strength of recycled aggregate concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(6): 3092-3102(in Chinese).

Keywords: recycled aggregate concrete; discreteness; quasi-static compressive test; split Hopkinson pressure bar; compressive strength

再生粗骨料混凝土 (RAC) 采用再生粗骨料 (RCA) 替代天然粗骨料 (NCA), 可减少对自然资源的消耗, 实现固体废弃物的回收利用。由于混凝土是一种非均质材料, 骨料力学性质的离散性及其位置的随机性、胶凝材料水化进程中引发的力学性质的离散性、初始缺陷的随机位置等诸多因素导致其在抗压强度方面存在一定的离散性^[1]。若忽略混凝土离散性对其力学性能的影响, 极有可能在实际工程中造成安全隐患。因此, 准确评估抗压强度离散性对于结构设计和可靠性分析至关重要。

目前, 许多学者对于 RAC 进行了大量静动态力学性能研究, 由于 RCA 经机械破碎后产生大量微裂纹, 表面附着大量松散老砂浆, 相较普通混凝土 (NAC) 存在更多初始缺陷^[2], 在准静态压缩下, RAC 的抗压强度普遍低于 NAC^[3-5], 在动态荷载下 RAC 动态抗压强度随着 RCA 替代率增大而减小, 动态增强因子 (DIF) 随 RCA 替代率的增加而增加^[6-8]。这些研究进一步加深了对 RAC 力学性能的理解, 然而仅使用抗压强度评价 RAC 力学性能是不充分的, 还应关注其抗压强度的离散性程度。有学者开展了 RAC 在准静态压缩下的抗压强度离散性研究, 陈海霞等^[9]认为 RAC 相较于 NAC 表现出更强的离散性, 赵雨等^[10]认为 RCA 替代率为 50% 时, 再生保温混凝土的抗压强度离散性最大。动态荷载下 RAC 抗压强度离散性的研究较少, 且往往只关注平均值, 忽视抗压强度离散性有可能导致结构设计存在安全风险, 因此研究抗压强度离散性对于深入理解且合理利用混凝土材料的力学行为具有重要意义。

鉴于此, 本文对不同 RCA 替代率的 RAC 试件进行准静态压缩和霍普金森压杆 (SHPB) 试验, 得到静态荷载下 RCA 替代率与应变率对 RAC 抗压强度离散性的影响规律。基于修正的 Weibull 分布模型, 提出了在任意保证率下具有不同 RCA 替代率的 RAC 动态抗压强度预测公式。

1 试验设计

1.1 原材料与配合比

采用普通硅酸盐水泥 P·O 42.5, 其矿物成分见表 1。细骨料为河砂, 最大粒径为 4.75 mm, 表观密度为 2 590 kg/m³。天然粗骨料 (NCA) 选取天然碎石, 再生粗骨料 (RCA) 由北京格林雷斯环保科技有限公司提供, 来源为附近废弃建筑物粉碎后的建筑垃圾, 考虑到其杂质含量较高, 试验前对其进行了多次筛分和清洗。根据我国发布的《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177—2010)^[11], 本次试验中粗骨料分类为 Class II, 粗骨料性能指标见表 2。由于 RCA 的吸水率较高^[12], 需加入额外的搅拌水以保证相同的有效水灰比, 具体配合比见表 3。采用两阶段混合法制备 RCA 替代率为 0%、50%、100% 的 RAC 试件, 分别命名为 RAC-0、RAC-50、RAC-100。所有试件在标准养护条件下养护 28 天。试验前, 所有试件的两端都进行了打磨处理, 其中 SHPB 试验试件不平行度≤0.02 mm。

1.2 试验设备与试验方法

1.2.1 准静态压缩试验

试件尺寸为直径 φ70 mm×140 mm, 共 3 组, 每组准备 40 个。使用美特斯工业系统 (中国) 有限公司提供的 MTS Exceed E45 试验机 (最大负载能力为 300 kN) 对 RAC 试件进行准静态压缩试验,

表 1 普通硅酸盐水泥 P·O 42.5 的矿物成分

Table 1 Mineral components of ordinary Portland cement P·O 42.5

Al ₂ O ₃ /wt%	SiO ₂ /wt%	Fe ₂ O ₃ /wt%	CaO/wt%	SO ₃ /wt%	R ₂ O/wt%	MgO/wt%	Other/wt%
4.42	21.65	2.61	62.93	2.27	0.83	2.92	2.37

Note: R₂O—Basic oxide (Na₂O, K₂O).

表 2 粗骨料性能指标

Table 2 Performance index of coarse aggregates

Aggregate type	Gradation/mm	Apparent density/(kg·m ⁻³)	Crush index/%	Mortar content/%	Water absorption/%
NCA	5-12.5	2 814	8.8	0	0.40
RCA	5-12.5	2 640	17.7	34	3.85

Notes: NCA—Natural coarse aggregate; RCA—Recycled coarse aggregate.

表 3 试验配合比 (kg/m³)
Table 3 Mix design proportions of tests (kg/m³)

Specimen	Cement	Sand	NCA	RCA	Water	Extra water
RAC-0	462.5	596.09	1 156.41	0	185	0
RAC-50	462.5	596.09	578.21	578.21	185	17.35
RAC-100	462.5	596.09	0	1 156.41	185	34.69

Notes: RAC-0, RAC-50, RAC-100—Recycled aggregate concrete (RAC) with 0%, 50%, 100% substitute rate of recycled coarse aggregate, respectively.

采用等速位移的加载方式，加载速率为 0.1 mm/min (等效应变速率为 $1.2\times10^{-5} \text{ s}^{-1}$)。

1.2.2 SHPB 试验

SHPB 试验基于一维应力波和应力均匀性两个基本假定^[13]，试件尺寸为 $\phi 70 \text{ mm}\times 35 \text{ mm}$ ，采用直径 10 mm 的橡胶圆片作为波形整形器延长入射波上升沿并消除应力波高频振荡。试验时在杆端涂抹润滑剂防止对应变率效应的高估^[14-15]。试验设备是由合肥姜水动态力学实验室提供的直径为 75 mm 的 SHPB 系统，冲击速度分为 4 组：Group 1 (4.3 m/s)、Group 2 (5.2 m/s)、Group 3 (5.7 m/s)、Group 4 (6.2 m/s)，对应应变率分别为 50 s^{-1} 、 70 s^{-1} 、 90 s^{-1} 和 120 s^{-1} ，共 12 组，每组准备 40 个试件。

2 试验结果及分析

2.1 准静态压缩试验结果

2.1.1 破坏模式

图 1 展示了在准静态压缩下具有不同 RCA 替代率的 RAC 的破坏模式。全部 RAC 试件表现出相似的破坏模式。试件中部首先出现纵向裂缝，随着荷载的增加，裂纹沿纵向扩展到顶部和底部，中部混凝土膨胀剥落，直至试件丧失承载能力。随着 RCA 替代率的增加，试件破坏更快，表现出更强的脆性。RCA 的加入使试件中旧砂浆与粗骨料界面和旧砂浆与新砂浆界面增加，荷载作用下大量裂缝在界面处发展，RAC 更容易发生裂纹和断裂^[16]。

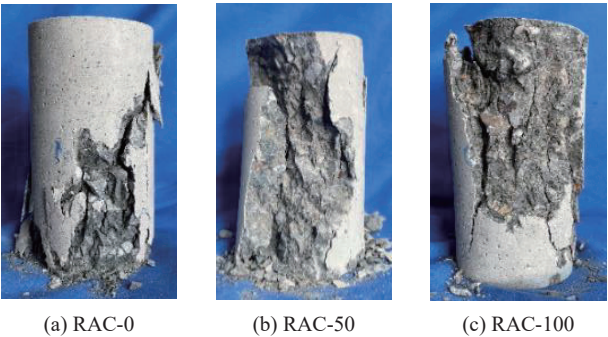


图 1 准静态压缩试验下再生混凝土 (RAC) 试件的破坏模式
Fig. 1 Failure mode of recycled aggregate concrete (RAC) specimens under quasi-static compression

2.1.2 抗压强度

图 2 绘制了具有不同 RCA 替代率的 RAC 试件的 120 组抗压强度结果。随着 RCA 替代率的增加，RAC 的抗压强度下降，RAC-50 与 RAC-100 的抗压强度相较 RAC-0 分别下降了 6.35% 和 16.94%。此外，不同 RCA 替代率下的 RAC 试件的抗压强度表现出不同的离散程度。

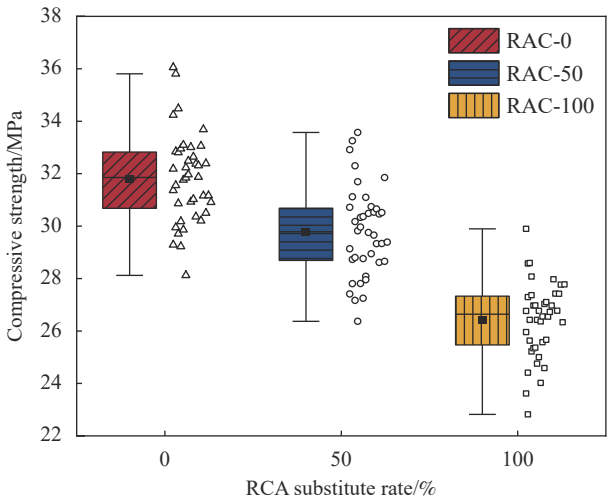


图 2 准静态压缩下 RAC 抗压强度
Fig. 2 Compressive strength of RAC under quasi-static compression

2.2 SHPB 试验结果

2.2.1 破坏模式

采用最大应力的 75% 至 100% 范围的线性斜率代表应变率^[17]。各组试件破坏模式如图 3 所示。不同 RCA 替代率的 RAC 试件在不同应变率下破坏模式相似。当应变率较低时，试件破坏主要由贯穿主裂缝引起，试件能大体保持其完整性。随着应变率的增加，试件出现了更多更细密的裂缝，当应变率达到 90 s^{-1} 以上时，试件破裂成碎片并向四周飞溅，破坏形式与准静态压缩与低应变率下显著不同^[18]。由于高应变率下裂纹没有足够的时间通过砂浆基底的薄弱层路径传播，大量裂缝贯穿骨料。而在低应变率下因砂浆基底较低强度，裂缝主要穿透骨料间的砂浆。

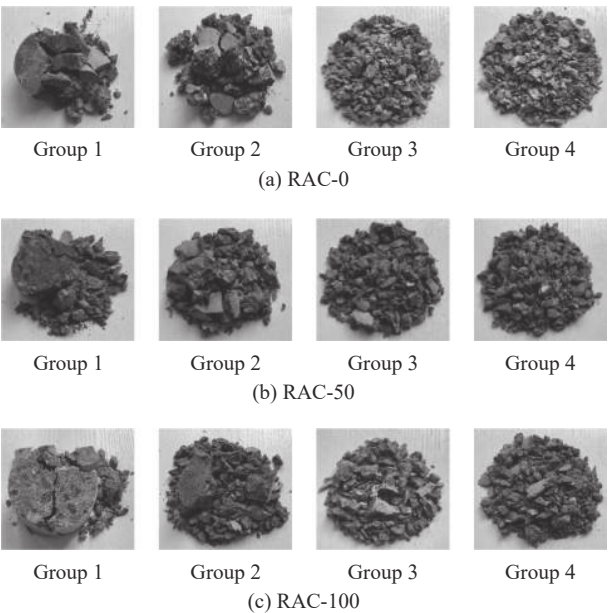


图3 霍普金森压杆 (SHPB) 试验下 RAC 试件的破坏模式
Fig. 3 Failure modes of RAC specimens in split Hopkinson pressure bar (SHPB) test

2.2.2 抗压强度

图4 为不同 RCA 替代率下 RAC 试件的动态抗压强度随应变率的变化情况, 表明具有不同 RCA 替代率的 RAC 试件均表现出显著的应变率效应, 其动态破坏机制主要表现为 3 个方面^[19]: (1) 热活化机制。随着应变率的增高, 裂缝的扩展演化发生变化, 准静态压缩中裂缝有时间沿最薄弱面进行发展, 随着荷载的增大, 裂缝会穿透粗骨料颗粒导致强度增大; (2) 孔隙水作用。微孔隙中自由水表现出的类似 Stefan 效应会使混凝土加固。此外, 随着应变率的增加, 自由水对裂纹作用模式逐渐从张拉模式转化为约束模式^[20], 抑制裂缝的拓展; (3) 惯性效应。由于粒子加速度运动产生沿加载方向的惯性力及泊松效应和端部摩擦带来的侧向约束效应会限制混凝土试件的侧向变形^[21]。在各应变率下, 随着 RCA 替代率的增加, 试件的抗压强度降低。同一替代率下, 应变率从 50 s⁻¹ 增加至 120 s⁻¹ 时, RAC-0、RAC-50 和 RAC-100 试件的动态抗压强度分别增加了 30.42%、35.55% 和 37.40%, 表明随着 RCA 替代率的提高, 试件表现出更明显的应变率效应^[5, 14, 22]。此外, 不同 RCA 替代率的 RAC 试件动态抗压强度表现出不同程度的离散性, 这是由于不同的裂缝开展路径和损伤区域^[23], 低应变率下试件内部初始缺陷程度对于裂缝优先开展路径和损伤开始区域有着重要

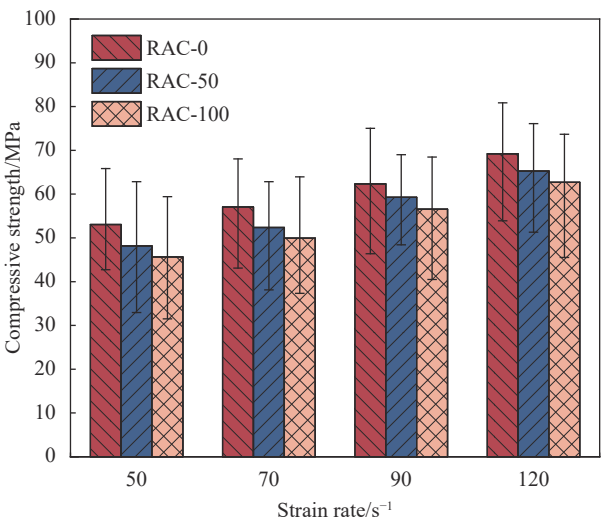


图4 SHPB 试验 RAC 试件抗压强度
Fig. 4 Compressive strength of RAC specimens in SHPB test

影响, 高应变率下由于裂缝发展时间短, 损伤区域扩大到整个试件, 初始缺陷的影响会减小。

3 讨论

3.1 考虑 RCA 替代率的 RAC 准静态抗压强度预测

3.1.1 分布模型的确定

采用正态分布^[24]、Weibull 分布^[25] 和对数正态分布^[26] 分别对 RAC 抗压强度按下式进行分布拟合, 结果见图 5:

$$f(\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma-\mu_1}{\sigma_1}\right)^2\right]$$
 (1a)

$$f(\sigma) = \frac{m}{\beta} \left(\frac{\sigma}{\beta}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\beta}\right)^m\right]$$
 (1b)

$$f(\sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(\sigma)-\mu_2}{\sigma_2}\right)^2\right]$$
 (1c)

式中: σ 为试件抗压强度值; μ_1 、 σ_1 为正态分布的均值和标准差; m 和 β 为 Weibull 分布的形状参数和尺度参数; μ_2 、 σ_2 为对数正态分布的位置参数和尺度参数。

由图 5 发现, 这 3 种分布均可描述 RAC 在准静态压缩下的强度分布, 但观察拟合优度参数 R^2 得到, 在对 RAC-50 的描述中正态分布与对数正态分布表现较差 ($R^2=0.85$), 相比较而言 Weibull 分布 ($R^2=0.93$) 能够提供更准确的结果。

3.1.2 Weibull 分布回归分析

基于式 (2), 取两次对数后^[27], 得到式 (3):
$$P_f(\sigma) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\beta}\right)^m\right]$$
 (2)

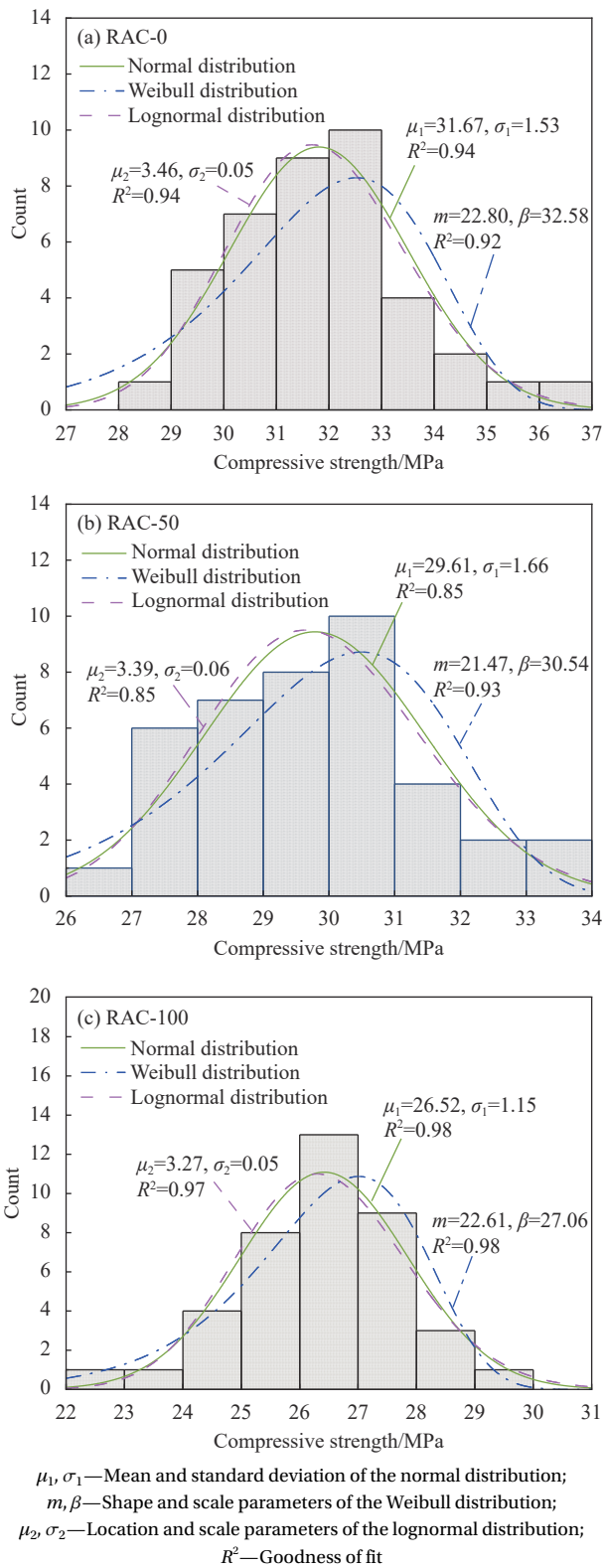


图5 准静态压缩试验下 RAC 抗压强度分布

Fig. 5 Distribution of compressive strength of RAC under quasi-static compression

$\ln[-\ln(1 - P_f(\sigma))] = m \ln \sigma - m \ln \beta$ (3)

其中， $P_f(\sigma)$ 为试样在 σ 应力下破坏的概率。式

(3)可简化为一般线性方程的形式， m 可视为以 $\ln \sigma$ 为横坐标和 $\ln[-\ln(1 - P_f(\sigma))]$ 为纵坐标时直线的拟合斜率。为了确定每个强度值的失效概率，将强度值升序排列后第 i 个强度值对应的概率 $P_f(\sigma_i)$ 近似为第 i 个样本数据与总样本数据 N 的关系：

$$P_f(\sigma_i) = \frac{i - 0.5}{N}$$
 (4)

图 6 给出了根据式 (3) 和式 (4) 拟合的 RAC 抗压强度的 Weibull 图，估计参数总结在表 4。对于具有不同 RCA 替代率的 RAC，线性回归结果与实测强度数据表现出良好的一致性。采用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 拟合优度检验^[28] 进一步验证回归结果的准确性。最大偏差 D_n 为观测样本的累积频率 $P_{f,E}(\sigma_i)$ 与回归的 Weibull 概率分布 $P_{f,W}(\sigma_i)$ 的最大差值，如下式所示：

$$D_n = \max \left[\left| P_{f,E}(\sigma_i) - P_{f,W}(\sigma_i) \right| \right] < D_{n\alpha}$$
 (5)

其中， $D_{n\alpha}$ 为 n 个数据在显著水平为 α 下的临界值，此处为 40 组数据在 $\alpha=0.05$ 时的临界值取 0.215^[28]。由表 4 可知 D_n 均小于 $D_{n\alpha}$ ，说明 RAC 准静态抗压强度均服从 Weibull 分布。

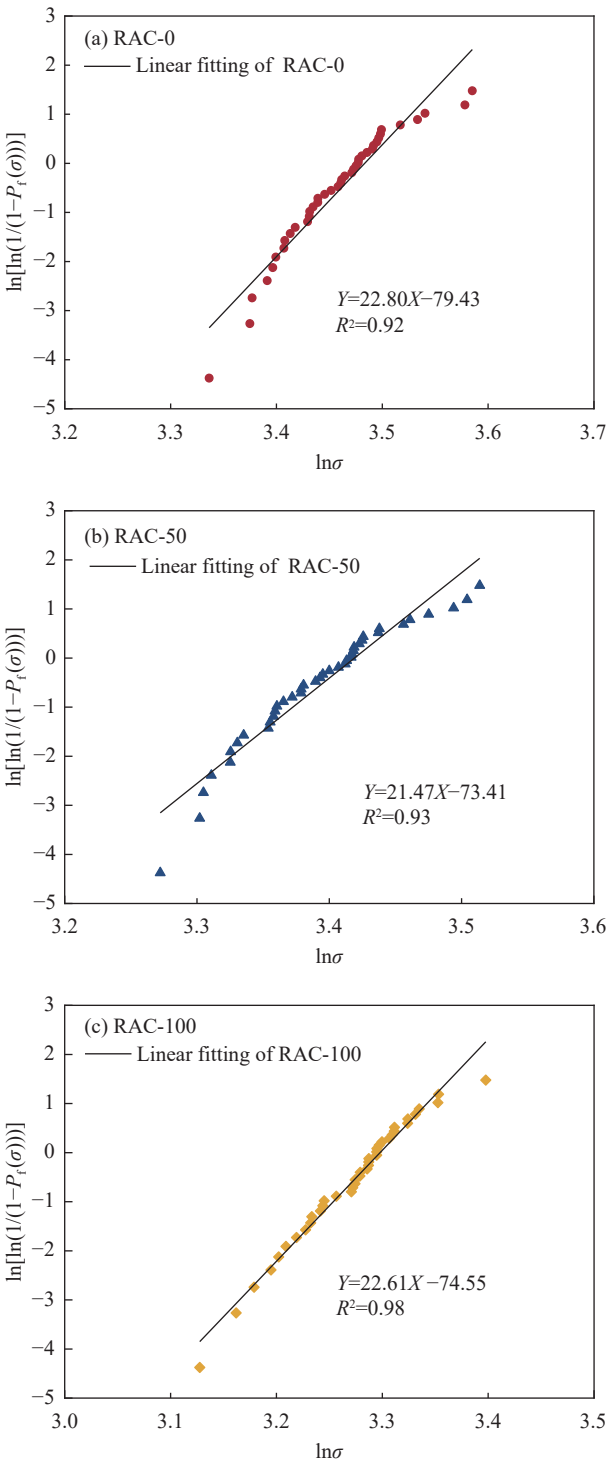
此外，Weibull 分布下 RAC 抗压强度的数学期望值 $E(\sigma)$ 、标准差 S 与离散系数 C 的计算方法见下式，结果见表 4：

$$E(\sigma) = \int_0^\infty \sigma \frac{dP_f(\sigma)}{d\sigma} d\sigma = \beta \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right)$$
 (6a)

$$S = \int_0^\infty (\sigma - E(\sigma))^2 \frac{dP_f(\sigma)}{d\sigma} d\sigma$$
$$= \beta \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{m} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{m} \right) \right]^{1/2}$$
 (6b)

$$C = \frac{S}{E(\sigma)}$$
 (6c)

其中， Γ 代表 Gamma 函数。Weibull 分布中，除离散系数 C 外，形状参数 m 也可以表示一组数据的分散情况， m 值越低，强度变异性越高^[29]。由表 4 可知在准静态压缩情况下，随着 RCA 替代率的增加，RAC 的离散系数差异并不明显，但随 RCA 替代率的增加，RAC 抗压强度的离散性表现出先增加后降低的趋势。RAC 试件抗压强度离散性可以归结于砂浆的离散性、粗骨料位置的随机性及内部缺陷的数量。值得注意的是，本研究中骨料来源单一，若骨料来源不同会增大试验结果的离散性^[5,30]，需对这一趋势予以重视。在准静态压缩条件下，根据 Weibull 分布可靠度函数可计算出在



σ—Compressive strength of RAC; $P_f(\sigma)$ —Probability of failure at stress σ

图6 准静态压缩下 RAC 抗压强度 Weibull 分布

Fig. 6 Weibull distribution of compressive strength of RAC under quasi-static compression

任意保证率 R 下不同 RCA 替代率的 RAC 抗压强度 σ_R , 如下式所示:

$$\sigma_R = \beta \left(\ln \frac{1}{R} \right)^{1/m} \tag{7}$$

RAC 在保证率为 0.75、0.85 和 0.95 下的抗压强度统计在表 5。

3.2 考虑 RCA 替代率的 RAC 动态抗压强度预测

3.2.1 修正的 Weibull 分布回归分析

为考虑应变率效应的影响, 将双参数 Weibull 分布模型进行了修正, 加入了应变率效应参数。采用修正的 Weibull 分布模型对 RAC 动态抗压强度进行分析^[31], 如下式:

$$P_M(\sigma) = 1 - \exp \left[-\varepsilon^\eta \delta^\gamma \left(\frac{\sigma}{\beta} \right)^m \right] \tag{8}$$

其中: ε 为应变率; η 为应变率效应参数; γ 为 RCA 替代率百分数; δ 为替代率参数。将式 (8) 简化为线性形式, 如下式所示:

$$\ln[-\ln(1 - P_M(\sigma))] = \eta \ln \varepsilon + \gamma \ln \delta + m \ln \sigma - m \ln \beta \tag{9}$$

对该方程进行回归分析, 如图 7 所示。 m 可由斜率求得, β 、 η 和 δ 由截距项求得。具体拟合参数结果见表 6, 可知, R^2 系数均在 0.90~0.98 之间, 表明具有不同 RCA 替代率的 RAC 在不同应变率下的回归结果与试验结果吻合较好。采用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 进行检验, 最大偏差 D_n 均在合理范围内, 修正的 Weibull 分布可准确描述在不同 RCA 替代率和应变率下 RAC 的动态强度分布。此外, 计算了 RAC 动态抗压强度的数学期望值 $E_M(\sigma)$ 、标准差 S_M 与离散系数 C_M , 如下式所示:

$$E_M(\sigma) = \int_0^\infty \sigma \frac{dP_M(\sigma)}{d\sigma} d\sigma = \beta \varepsilon^{-\frac{\eta}{m}} \delta^{-\frac{\gamma}{m}} \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right) \tag{10a}$$

$$S_M = \int_0^\infty (\sigma - E_M(\sigma))^2 \frac{dP_M(\sigma)}{d\sigma} d\sigma = \beta \varepsilon^{\frac{\eta}{m}} \delta^{\frac{\gamma}{m}} \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{m} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{m} \right) \right]^{1/2} \tag{10b}$$

$$C_M = \frac{S_M}{E_M} \tag{10c}$$

图 8 给出了不同 RCA 替代率下 RAC 动态抗压强度与应变率的关系。可知, 在相同的应变率下, 随着 RCA 替代率的增加, RAC 动态强度离散程度也随之增加。在相同的 RCA 替代率下, 强度离散程度随应变率的增加而降低。同一应变率下, RCA 的增加会导致混凝土内部缺陷增多, 由于在高应变率下材料惯性效应增强, 缺陷会阻碍应力波的传播, 加剧能量的耗散^[32], 导致材料在较大缺陷处更容易发生局部应力集中, 使 RAC 在动态加载下的破坏行为受缺陷大小的影响更显著。对

表 4 准静态压缩下 RAC 抗压强度 Weibull 参数

Table 4 Weibull parameters for compressive strength of RAC under quasi-static compression

Specimen	Linear fitting equation $Y=aX+b$			Weibull parameter		$E(\sigma)/\text{MPa}$	S/MPa	C	K-S goodness-of-test	
	a	b	R^2	m	β				D_n	$D_{n\alpha}$
RAC-0	22.80	79.43	0.92	22.80	32.58	31.817	1.737	0.054	0.103	0.215
RAC-50	21.47	73.41	0.93	21.47	30.54	29.783	1.723	0.058	0.104	
RAC-100	22.61	74.55	0.98	22.61	27.06	26.415	1.454	0.055	0.069	

Notes: $E(\sigma)$ —Mathematical expectation; S —Variance; C —Dispersion coefficient; K-S—Kolmogorov-Smirnov; a , b —Slope and intercept of the linear fitting equation; D_n —Maximum deviation; $D_{n\alpha}$ —Critical values for n data at a confidence level of α .

表 5 不同保证率下的 RAC 抗压强度

Table 5 Compressive strength of RAC at different levels of reliability

Specimen	$\sigma_{\text{mean}}/\text{MPa}$	$\sigma_{0.75}/\text{MPa}$	$\sigma_{0.85}/\text{MPa}$	$\sigma_{0.95}/\text{MPa}$
RAC-0	31.82	30.85	30.09	28.60
RAC-50	29.78	28.82	28.06	25.47
RAC-100	26.42	25.61	24.97	22.77

Notes: σ_{mean} —Mean compressive strength; $\sigma_{0.75}$, $\sigma_{0.85}$, $\sigma_{0.95}$ —Compressive strength with a guarantee of 0.75, 0.85, 0.95, respectively.

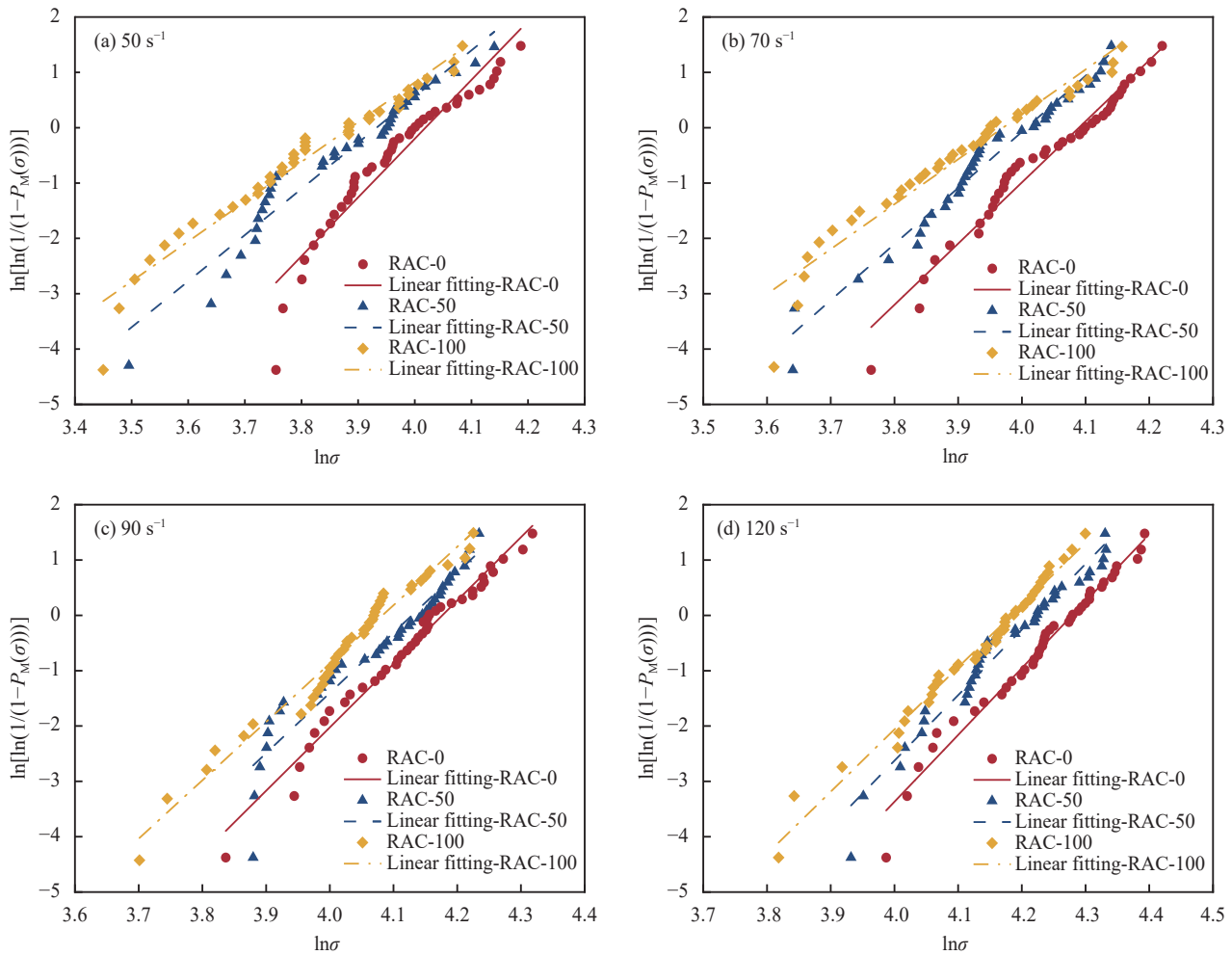


图 7 SHPB 试验中 RAC 动态抗压强度的修正 Weibull 分布图

Fig. 7 Modified Weibull distribution of RAC compressive strength in SHPB test

于同一替代率的 RAC，应变率的增加会使 RAC 变形速率增加，内部变形差异减小，且在高应变率

下骨料的穿透行为会减弱界面过渡区对于 RAC 的破坏影响^[32]，导致离散性降低。

表 6 SHPB 试验下 RAC 抗压强度修正 Weibull 参数

Table 6 Modified Weibull parameters for compressive strength of RAC in SHPB test

Specimen	Strain rate/s ⁻¹	Fitting curve	Modified Weibull parameter				R ²	E _M (σ)/MPa	S _M /MPa	C _M	K-S goodness-of-test	
			m	β	η	δ					D _n	D _{na}
RAC-0	50.4	Y=10.62X-42.67	10.62	13.53	-3.79		0.92	52.20	0.74	0.014	0.099	
	68.0	Y=11.05X-45.18	11.05	13.89	-3.82		0.97	57.06	0.71	0.012	0.111	
	89.1	Y=11.46X-47.85	11.46	14.37	-3.85		0.98	62.11	0.70	0.011	0.095	
	117.3	Y=12.08X-51.68	12.07	15.48	-3.90		0.98	69.20	0.70	0.010	0.094	
RAC-50	50.8	Y=8.34X-32.79	8.34	13.05	-2.94		0.94	49.23	0.85	0.018	0.135	
	68.7	Y=10.15X-40.66	10.15	13.36	-3.43		0.97	53.13	0.75	0.014	0.123	
	88.6	Y=10.88X-44.93	10.88	14.30	-3.62		0.92	60.70	0.73	0.012	0.087	
	118.2	Y=11.86X-50.07	11.86	15.43	-3.72		0.96	66.03	0.73	0.011	0.134	
RAC-100	53.2	Y=7.19X-27.95	7.19	12.66	-2.53		0.96	45.37	0.96	0.022	0.119	
	70.5	Y=8.12X-32.24	8.12	13.99	-2.62		0.94	49.47	1.00	0.020	0.095	
	89.2	Y=10.55X-43.06	10.55	14.73	-3.35		0.97	56.23	0.80	0.014	0.142	
	121.3	Y=11.24X-47.02	11.24	15.84	-3.42		0.98	62.86	0.80	0.013	0.073	

Notes: E_M(σ), S_M, and C_M—Mathematical expectation, variance, and dispersion coefficient based on the modified model; η—Strain rate effect parameter; δ—Substitute rate parameter.

3.2.2 RAC 动态强度预测公式

通过表 6 发现，RAC 的替代率和应变率会对修正后 Weibull 分布的特征参数有一定程度的影响，将 m、β、η 分别与应变率和替代率进行拟合，可得到在一定应变率下 RAC 的动态平均抗压强度 σ_{mean} 预测公式，如下式所示：

$$\sigma_{\text{mean}} = \beta \dot{\epsilon}^{-\frac{\eta}{m}} \delta^{-\frac{\gamma}{m}} \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right), \quad 50 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 120 \text{ s}^{-1}$$
$$\begin{cases} m = 7.696 + 0.045\dot{\epsilon} - 2.130\gamma \\ \beta = 11.342 + 0.036\dot{\epsilon} - 0.159\gamma \\ \eta = -3.115 - 0.009\dot{\epsilon} + 0.881\gamma \end{cases} \quad (11)$$

图 9 为预测平均抗压强度与试验平均抗压强度的比较结果，平均误差为 1.37%，最大误差为 3.96%，修正后的 Weibull 模型能够较好预测不同 RCA 替代率 γ 下的 RAC 平均动态抗压强度。

在实际工程中，为确保结构的安全性和可靠性，常采用更高保证率下的抗压强度。根据修正 Weibull 分布的可靠度函数可求出在任意保证率 R 下的 RAC 动态抗压强度 σ_R，如下式：

$$\sigma_R = \beta \left[\frac{\ln(1/R)}{\dot{\epsilon}^\eta \delta^\gamma} \right]^{1/m}, \quad 50 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 120 \text{ s}^{-1} \quad (12)$$

图 10 展示了在保证率为 0.75、0.85 和 0.95 下 RAC 动态抗压强度与平均值的比值。随着应变率的增加比值趋近于 1，这意味着高应变率下 RAC 动态抗压强度离散性减小。对于不同 RCA 替代率，随着保证率增加，RAC 动态抗压强度变化幅度增大，表明 RAC-100 试件动态抗压强度表现出更强的离散性，与试验结果相符。

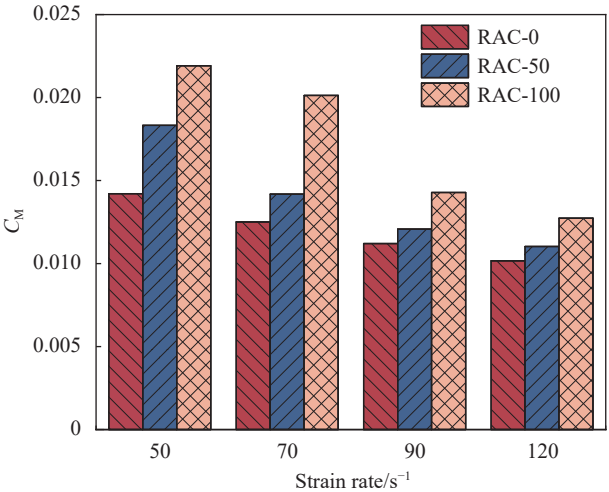


图 8 不同应变率下不同 RCA 替代率的 RAC 的离散系数 C_M

Fig. 8 Dispersion coefficient C_M of RAC with different RCA substitute rates and strain rates

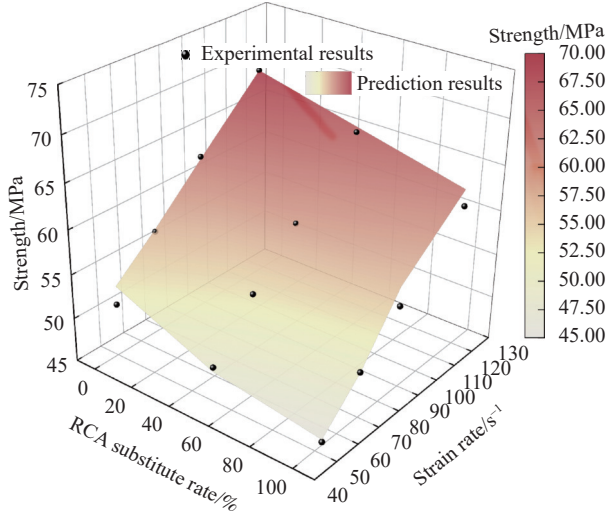


图 9 RAC 试验值与预测值比较

Fig. 9 Comparison between experimental and prediction results of RAC

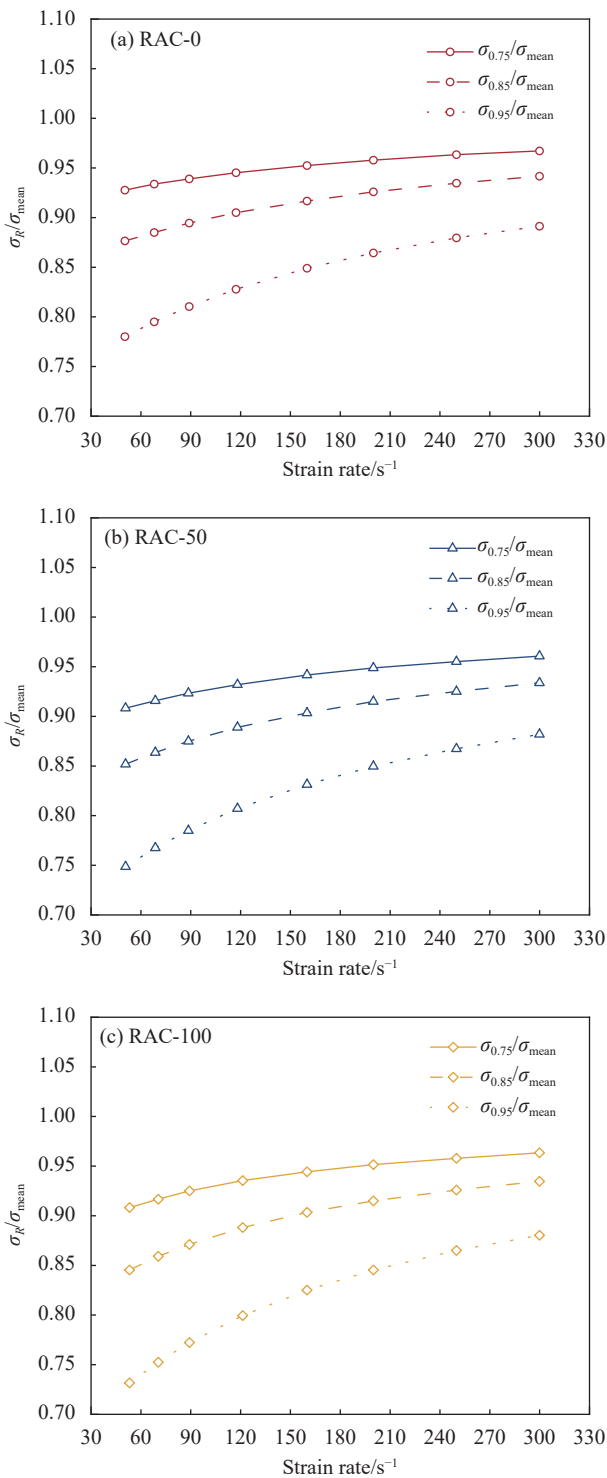


图 10 不同保证率 R 下的 RAC 动态抗压强度 σ_R 增长情况
Fig. 10 Dynamic compressive strength σ_R growth of RAC with different levels of reliability R

4 结论

对不同再生粗骨料 (RCA) 替代率的再生粗骨料混凝土 (RAC) 试件进行准静态压缩和霍普金森压杆 (SHPB) 试验, 研究了静动态荷载下, RCA 替

代率与应变率对 RAC 抗压强度离散性的影响规律。此外, 基于修正的 Weibull 分布模型, 提出了任意保证率下具有不同 RCA 替代率的 RAC 动态抗压强度预测公式。主要结论如下:

(1) 采用 3 种分布模型对准静态压缩下的 RAC 抗压强度进行拟合, 发现 Weibull 分布可提供较准确的描述, 结果表明 3 种 RCA 替代率的 RAC 抗压强度离散性分别为 0.054、0.058、0.055, 随 RCA 替代率的增加, 表现出先增加后减小的趋势, 但差异不显著;

(2) SHPB 试验应变率为 50~120 s⁻¹ 时, RAC 动态抗压强度离散性同时受到 RCA 替代率和应变率的影响。在相同的应变率下, 随着 RCA 替代率的增加, RAC 动态强度离散性也随之增加。在相同的 RCA 替代率下, 随着应变率的增加, 强度离散性降低;

(3) 基于修正的 Weibull 分布, 提出了单一配合比下任意保证率下不同 RCA 替代率的 RAC 动态抗压强度预测公式, 计算预测平均抗压强度与试验值比较最大误差为 3.96%, 修正后的 Weibull 模型能较好预测不同 RCA 替代率下的 RAC 动态抗压强度, 为实际工程中 RAC 结构的设计提供参考。需要说明的是, 本研究中动态抗压强度预测公式适用于应变率为 50~120 s⁻¹ 的情况。对于多种配合比与多种强度情况有待于进一步研究。

参考文献:

[1] 杜修力, 韩亚强, 金浏, 等. 骨料空间分布对混凝土压缩强度及软化曲线影响统计分析 [J]. 水利学报, 2015, 46(6): 631-639. DU Xiuli, HAN Yaqiang, JIN Liu, et al. Statistical investigation on effects of aggregate distribution on concrete compression strength and the descending part of stress-strain curve[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(6): 631-639(in Chinese).

[2] GUNAYISI E, GESOGLU M, KAREEM Q, et al. Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete[J]. Materials and Structures, 2016, 49(1-2): 521-536.

[3] 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. WANG Junhui, HUANG Yue, YANG Guotao, et al. Research progress on compressive properties of recycled aggregate concrete[J]. Materials Reports, 2022, 36(S1): 278-286(in Chinese).

[4] 商效瑛, 杨经纬, 李江山. 基于 CT 图像的再生混凝土微观破坏裂纹分形特征 [J]. 复合材料学报, 2020, 37(7): 1774-1784.

- SHANG Xiaoyu, YANG Jingwei, LI Jiangshan. Fractal characteristics of meso-failure crack in recycled coarse aggregate concrete based on CT image[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(7): 1774-1784(in Chinese).
- [5] XIAO J Z. Recycled aggregate concrete structures[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2018: 144-146.
- [6] GUO J L, CHEN Q J, CHEN W S, et al. Tests and numerical studies on strain-rate effect on compressive strength of recycled aggregate concrete[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(11): 04019281.
- [7] LU Y B, CHEN X, TENG X, et al. Dynamic compressive behavior of recycled aggregate concrete based on split Hopkinson pressure bar tests[J]. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2014, 11(1): 131-141.
- [8] XIAO J Z, LI L, SHEN L M, et al. Compressive behaviour of recycled aggregate concrete under impact loading[J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 71: 46-55.
- [9] 陈海霞, 宋学庆. 再生骨料混凝土强度离散性试验研究 [J]. *西安科技大学学报*, 2021, 41(2): 290-297.
- CHEN Haixia, SONG Xueqing. Experimental study on the strength dispersion of recycled aggregates concrete[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2021, 41(2): 290-297(in Chinese).
- [10] 赵雨, 刘元珍, 王文婧, 等. 再生粗骨料取代率对再生保温混凝土抗压强度离散性影响 [J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(13): 275-279.
- ZHAO Yu, LIU Yuanzhen, WANG Wenjing, et al. Influence of recycled coarse aggregate replacement rate on the discreteness of the compressive strength of recycled aggregate thermal insulation concrete[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(13): 275-279(in Chinese).
- [11] 全国混凝土标准化技术委员会. 混凝土用再生粗骨料: GB/T 25177—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- National Technical Committee 458 on Concrete of Standardization Administration of China. Recycled coarse aggregate for concrete: GB/T 25177—2010[S]. Beijing: China Standards Press, 2010(in Chinese).
- [12] 鲍玖文, 李树国, 张鹏, 等. 再生粗骨料硅烷浸渍处理对混凝土介质传输性能的影响 [J]. *复合材料学报*, 2020, 37(10): 2602-2609.
- BAO Jiuwen, LI Shuguo, ZHANG Peng, et al. Effect of recycled coarse aggregate after strengthening by silane impregnation on mass transport of concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(10): 2602-2609(in Chinese).
- [13] 王礼立. 应力波基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 52-54.
- WANG Lili. Foundation of stress waves[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 52-54(in Chinese).
- [14] 王兴国, 姜茂林, 陈旭, 等. 不同预浸骨料-PVA 纤维对再生混凝土力学性能的影响 [J]. *复合材料学报*, 2022, 39(3): 1205-1214.
- WANG Xingguo, JIANG Maolin, CHEN Xu, et al. Effect of different pre-soaked aggregate-PVA fiber on the mechanical properties of recycled aggregate concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(3): 1205-1214(in Chinese).
- [15] 李为民, 许金余, 沈刘军, 等. 玄武岩纤维混凝土的动态力学性能 [J]. *复合材料学报*, 2008(2): 135-142.
- LI Weimin, XU Jinyu, SHEN LiuJun, et al. Dynamic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete using a split Hopkinson pressure bar[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008(2): 135-142(in Chinese).
- [16] ZHOU H Y, ZHOU H Z, WANG X J, et al. Static size effect of recycled coarse aggregate concrete: Experimental study, meso-scale simulation, and theoretical analysis[J]. *Structures*, 2021, 34: 2996-3012.
- [17] PAJAK M, JANISZEWSKI J. Influence of aggregate and recycled steel fibres on the strain rate sensitivity of mortar and concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 363: 129855.
- [18] 谢友均, 王猛, 马昆林, 等. 不同养护温度下蒸养混凝土的冲击性能 [J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(3): 521-528, 536.
- XIE Youjun, WANG Meng, MA Kunlin, et al. Impact mechanical characteristics of steam cured concrete under different curing temperatures[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(3): 521-528, 536(in Chinese).
- [19] 王国盛, 路德春, 杜修力. 混凝土材料真实动态强度及率效应机理研究 [J]. *工程力学*, 2018, 35(6): 58-67.
- WANG Guosheng, LU Dechun, DU Xiuli, et al. Research on the actual dynamic strength and the rate effect mechanisms for concrete materials[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(6): 58-67.
- [20] 王海龙, 李庆斌. 不同加载速率下饱和混凝土的劈拉试验研究及强度变化机理 [J]. *工程力学*, 2007, 24(2): 105-109.
- WANG Hailong, LI Qingbin. Experiments on saturated concrete under different splitting tensile rate and mechanism on strength change[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(2): 105-109(in Chinese).
- [21] LU D C, DU X L, WANG G S, et al. A three-dimensional elastoplastic constitutive model for concrete[J]. *Computers & Structures*, 2016, 163(8): 41-55.
- [22] 白卫峰, 李思蕾, 管俊峰, 等. 再生混凝土的单轴压缩动态力学性能 [J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(5): 498-508.
- BAI Weifeng, LI Silei, GUAN Junfeng, et al. Dynamic mechanical properties of recycled concrete in uniaxial compression[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(5): 498-508(in Chinese).

- [23] 金浏, 韩亚强, 杜修力. 混凝土单轴动态拉伸强度随机性的统计特性分析 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(24): 6-13, 26.
JIN Liu, HAN Yaqiang, DU Xiuli. Statistical investigation on the randomness of uniaxial dynamic tensile strengths of concrete [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(24): 6-13, 26 (in Chinese).
- [24] 李佳彬, 肖建庄, 黄健. 再生粗骨料取代率对混凝土抗压强度的影响 [J]. 建筑材料学报, 2006, 9(3): 297-301.
LI Jiabin, XIAO Jianzhuang, HUANG Jian. Influence of recycled coarse aggregate replacement percentages on compressive strength of concrete [J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(3): 297-301 (in Chinese).
- [25] 孔祥清, 何文昌, 邢丽丽, 等. 钢纤维-聚丙烯纤维混杂对再生混凝土抗冲击性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2020, 37(7): 1763-1773.
KONG Xiangqing, HE Wenchang, XING Lili, et al. Effect of steel fiber-polypropylene fiber hybrid addition on impact resistance of recycled aggregate concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(7): 1763-1773 (in Chinese).
- [26] 韩旭旭, 张程煜, 陈博, 等. 2D-SiC_f/SiC 复合材料抗拉强度统计分布规律 [J]. 复合材料学报, 2019, 36(2): 434-440.
HAN Xuxu, ZHANG Chengyu, CHEN Bo, et al. Statistical distribution of tensile strength of a 2D-SiC_f/SiC composite [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(2): 434-440 (in Chinese).
- [27] VU C C, HO N K, PHAM T A. Weibull statistical analysis and experimental investigation of size effects on the compressive strength of concrete-building materials [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01231.
- [28] PETTITT A N, STEPHENS M A. The Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit statistic with discrete and grouped data [J]. Technometrics, 1977, 19(2): 205-210.
- [29] XU J S, HE X X. Size effect on the strength of a concrete member [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990, 35 (4-5): 687-695.
- [30] 肖建庄, 雷斌, 袁飏. 不同来源再生混凝土抗压强度分布特征研究 [J]. 建筑结构学报, 2008(5): 94-100.
XIAO Jianzhuang, LEI Bin, YUAN Biao. Compressive strength distribution of recycled aggregate concrete derived from different origins [J]. Journal of Building Structures, 2008(5): 94-100 (in Chinese).
- [31] CHEN X D, WU S X, ZHOU J K. Compressive strength of concrete cores under high strain rates [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015, 29(1): 06014005.
- [32] 骆开静. 高性能再生混凝土动态力学特性及应变率效应研究 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2018.
LUO Kaijing. The research on dynamic mechanical characteristics of high performance recycled concrete and strain rate effect [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2018 (in Chinese).