

粉煤灰再生骨料混凝土力学性能及微结构演变

Mechanical Properties and Microstructure Evolution of Recycled Aggregate Concrete with Fly Ash

陈义国¹, 齐仕杰², 纪续¹, 岳红亚², 王磊¹, 徐润²

(1. 济南金日公路工程有限公司, 济南 250101;
2. 山东省交通规划设计院集团有限公司, 济南 250101)

摘要: 将废旧混凝土用作再生骨料既符合建筑材料绿色可持续发展战略的需求, 又能有效减缓天然石材资源逐渐枯竭的问题, 但再生骨料的高吸水率及复杂的界面过渡区不可避免地对混凝土力学性能造成不利影响。对再生骨料进行预处理后, 研究了再生骨料对粉煤灰再生骨料混凝土力学性能的影响规律及作用机理。结果表明: 预浸泡处理保证了浆体中的有效水胶比, 并通过内养护方式进一步促进浆体的水化进程, 从而有效改善粉煤灰再生骨料混凝土的力学性能。同时, 通过抗压强度时变模型验证了粉煤灰再生骨料混凝土力学性能演变规律, 有效促进了再生骨料在建筑材料方向的利用。

关键词: 再生骨料; 混凝土; 力学性能; 微观形貌; 孔结构

中图分类号: TU528.45 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249(2025)01-0013-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.003

CHEN Yiguo¹, QI Shijie², JI Xu¹, YUE Hongya², WANG Lei¹, XU Run²

(1. Ji'nan Kinyue Highway Engineering Co., Ltd., Ji'nan 250101, China;

2. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Ji'nan 250101, China)

Abstract: Using waste concrete as recycled aggregate can effectively avoid the waste of land resources and environmental problems. The application of RA not only meets the needs of green and sustainable development strategies for building materials but also effectively mitigates the depletion of natural stone resources. However, the high water absorption rate and complex interface transition zone of RA inevitably have adverse effects on the mechanical properties of concrete. In this study, the influence mechanism of the substitution of recycled aggregates and the pre-soaking treatment on the mechanical properties of fly ash recycled aggregate concrete were explored. The results indicate that the pre-soaking treatment ensures the effective water-to-binder ratio in the matrix and further promotes the hydration process of the cementitious materials through internal curing, thereby effectively improving the mechanical properties of fly ash recycled aggregate concrete. At the same time, the evolution of mechanical properties of fly ash recycled aggregate concrete was verified through a time-varying compressive strength model, effectively promoting the utilization of RA in the direction of building materials.

Key words: recycled aggregate; concrete; physical properties; micro-morphology; pore structure

基金项目: 山东省自然科学基金青年基金项目 (ZR2022QE064); 山东省交通运输厅科技计划项目 (2022B03-01)。

作者简介: 陈义国 (1985—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 市场开发与工程管理。

通信作者: 岳红亚 (1990—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 固体废弃物资源化利用。

收稿日期: 2024-12-19

材料科学

0 引言

当前,大规模城镇化进程所产生的废弃混凝土通常以堆放或填埋方式处理,造成了土地资源浪费及环境污染,而如何处置大量的废旧混凝土成为亟待解决的问题。其中,利用建筑废弃物制备再生骨料混凝土(Recycled aggregate concrete, RAC)成为建筑材料领域的重点研究方向。研究表明,将废旧混凝土用作再生骨料可达到90%以上的综合利用率,可节约60%的石灰石资源并减少约15%~20%的CO₂排放量^[1]。

然而,再生骨料表面附着大量的老旧砂浆,导致其吸水率、压碎值等指标较高于天然骨料^[2-3]。同时,废旧混凝土的破碎过程会导致再生骨料出现大量的贯穿裂缝,进一步影响再生骨料的物理性能。此外,由于旧砂浆的表面黏附情况复杂,导致RAC中出现复杂的界面过渡区^[4]。由于旧砂浆与新砂浆的相对强度、相对质量以及包裹情况差距往往导致界面过渡区成为RAC中最明显的薄弱环节。

为了降低再生骨料对混凝土性能的影响,研究人员采用了不同的处理方式来改善再生骨料性能或优化混凝土材料体系。王娟等^[5]使用了吸水率7.9%的再生骨料,采用骨料预湿、合理的颗粒级配等方式来降低其对RAC力学性能的影响,发现粉煤灰的掺入可有效改善RAC的密实性,降低再生骨料对混凝土力学强度的不利影响;张玉栋等^[6]探究了辅助胶凝材料对RAC力学性能和孔结构的影响,发现辅助胶凝材料的掺入可显著改善RAC的和易性。此外,纳米SiO₂(NS)、碳纳米管(CNT)和氧化石墨烯(GO)等纳米材料具有良好的填充效应,较小的颗粒粒径不仅有利于发挥填充效应,同时也可作为水泥水化产物提供成核位点,均已被成功应用于RAC的强化处理中^[7-9]。程子扬等^[10]采用纳米CaCO₃和粉煤灰来改善RAC界面过渡区,发现纳米CaCO₃可有效提高RAC的早期力学性能,而粉煤灰的二次水化活性则有效提高RAC的长期性能。

综上所述,再生骨料在建筑材料领域的巨大潜力和应用价值。但是,再生骨料的应用过程中需要重点关注其高吸水率及复杂的界面过渡区的影响。通过对效率和成本的综合考虑,采用浸泡方式对再

生骨料进行预处理,以期降低对混凝土性能的不利影响。在此基础上,综合探究再生骨料的取代、矿物掺合料以及水胶比等因素对混凝土力学性能和微结构的影响及作用机理。此外,通过掺入粉煤灰作为辅助胶凝材料来提高混凝土长期性能^[11]。再生骨料与粉煤灰等固体废弃物的循环利用不仅能降低潜在的污染风险,还可以进行资源的二次回收利用,实现资源环境与经济效益并行的高质量发展。

1 试验方案

1.1 试验材料与配合比

水泥为P·O 42.5R普通硅酸盐水泥,密度为3 100 kg/cm³;粉煤灰为Ⅱ级粉煤灰,密度为2 200 kg/cm³,两者的化学组成见表1;细骨料采用当地河砂,细度模数为2.7;普通粗骨料为粒径5~25 mm的破碎玄武岩,堆积密度与表观密度分别为1 600、2 630 kg/cm³,吸水率为1.2%;再生骨料由当地建筑废旧混凝土破碎制备得到,采用5~25 mm连续级配,堆积密度与表观密度分别为1 320、2 550 kg/cm³,吸水率为6.7%,压碎值指标为16%;采用聚羧酸减水剂(SP)控制混凝土的坍落度在150 mm左右。

配制天然集料混凝土(下称NAC)与粉煤灰再生骨料混凝土(下称RAC)以开展试验,拟定C40强度等级为RAC设计目标,采用自由水胶比的方式进行配合比计算^[11]。得到各组混凝土的配合比,见表2。对照组NAC与RAC40均采用相同水胶比0.40;RAC35则采用0.35的水胶比,以提高设计混凝土的强度。在粉煤灰再生骨料混凝土中,根据再生骨料是否预饱和吸水设置两个试验组,在“-R”试验组中再生骨料不进行预吸水处理,在“-W”试验组中,通过预吸水的方式来降低再生骨料的高孔隙率对混凝土的影响。将再生骨料提前24 h浸泡,随后取出,再生骨料晾至饱和面干再进行混凝土的制备。

表1 原材料化学组成

Table 1		Chemical composition of raw materials						/%
材料名称	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	SO ₃	K ₂ O	
水泥	65.37	4.92	3.79	19.76	0.14	4.39	0.57	
粉煤灰	5.12	37.70	1.79	45.96	0.52	0.82	0.47	

表 2 混凝土配合比
Table 2 Concrete mix

序号	水胶比	水 /g	水泥 /g	粉煤灰 /g	细骨料 /g	粗骨料/g		减水剂 /g
						天然骨料	再生骨料	
NAC40	0.40	160	280	120	769.4	1062.7		1.5
RAC40-R	0.40	160	280	120	769.4		1062.7	1.5
RAC40-W	0.40	160	280	120	769.4		1062.7	1.5
RAC35-R	0.35	155	308	132	751.1		1081.0	1.5
RAC35-W	0.35	155	308	132	751.1		1081.0	1.5

1.2 试验方法

按照设计的配合比制备混凝土试样。将胶凝材料和细骨料进行充分搅拌，再加入减水剂与水的混合溶液进行充分搅拌，最后加入粗骨料，待充分拌合后，将新拌混凝土倒入 100 mm × 100 mm × 100 mm 的模具中，用保鲜膜密封表面。在室温中养护 24 h 后拆模并送入标准养护室中养护至测试龄期。

当混凝土试样养护至龄期为 3、7、28、56 d 时，按照 GB/T 50081—2019《普通混凝土力学性能试验方法标准》测试混凝土的抗压强度，加载速率控制在 0.6 MPa/s。每组试样数量为 3 块，取算术平均值作为试验结果。

通过微观试验探究粉煤灰再生骨料混凝土力学性能和微观结构规律。当养护龄期为 3 d 或 28 d 时，从不同配比的混凝土中取 0.5 cm 左右的块状试样，浸泡于无水乙醇溶液中并烘干以终止水泥基材料的水化。随后，采用 SEM (scanning electron microscope) 试验观察粉煤灰再生骨料混凝土表面的微观形貌，采用 MIP (mercury intrusion porosimetry) 试验探究不同因素对粉煤灰再生骨料混凝土孔结构的影响。

2 结果与讨论

2.1 抗压强度

图 1 为再生骨料预处理前后的粉煤灰再生骨料混凝土抗压强度。在相同的水胶比下，再生骨料的掺入降低了混凝土的早期抗压强度。在龄期为 3 和 7 d 时，再生骨料全替代普通骨料时，混凝土的抗压强度分别下降了 24.18% 与 21.03%。在龄期为 28 d 时，NAC 的抗压强度达到了 49.7 MPa，而 RAC40-R 的抗压强度为 41.5 MPa，抗压强度降低了 16.50%。由于再生骨料的吸水率高于天然骨料，因此再生骨料附近的自由水被吸附，从而影响了再生骨料附近浆体的水化，造成了界面过渡区的劣化。此外，再

生骨料的压碎值等物理性能高于天然骨料，且复杂的界面过渡区进一步造成了 RAC 中与新拌合浆体的不良结合，因此，直接造成了 RAC 抗压强度的降低，这一点在 28 d 龄期之前更加明显。随着养护龄期的增加，再生骨料对混凝土力学性能的影响逐渐降低，粉煤灰的火山灰活性、提供成核位点的方式促进胶凝材料的生成，有效增加混凝土的密实性及长龄期服役性能，因此粉煤灰再生骨料混凝土的抗压强度相对提高。

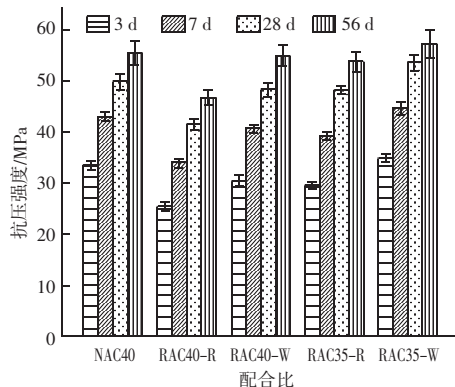


图 1 不同水胶比与养护龄期对抗压强度的影响
Fig. 1 Influence of different water binder ratio and curing temperature on compressive strength

对再生骨料进行预浸泡处理后，RAC40-W 的抗压强度比未处理提高了 16.15%，此时其抗压强度已基本与同水胶比的普通骨料混凝土相一致。显然，对再生骨料进行预浸泡处理后，由于再生骨料中的水分已经基本饱和，因此，再生骨料附近的浆体中，有效水胶比未出现明显的变化，保证了胶凝材料的水化。此外，再生骨料中的自由水随着养护龄期的增加会逐渐释放到水泥浆体中，在一定程度上起到内养护作用，从而改善界面过渡区，有利于粉煤灰再生骨料混凝土力学性能的提升。

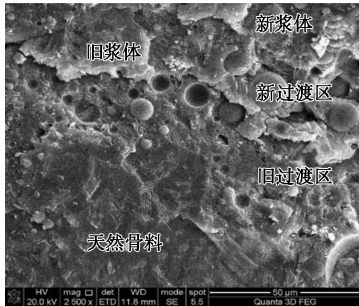
然而，考虑到再生骨料性能中可能存在的波动，DB37/T 5176—2021《再生混凝土配合比设计规程》中规定，当 C40 混凝土中再生骨料 100% 取代时，其 28 d 抗压强度应当为 49.9 MPa，因此 RAC40-W 的抗压强度仍然略低于此限值。随着水胶比从 0.40 降低到 0.35，粉煤灰再生骨料混凝土的抗压强度得到进一步提高，在未对再生骨料进行预处理的情况下，RAC35-R 的 28 d 抗压强度为 48.1 MPa；经过预处理后，RAC35-W 抗压强度则达到了 53.6 MPa。此

材料科学

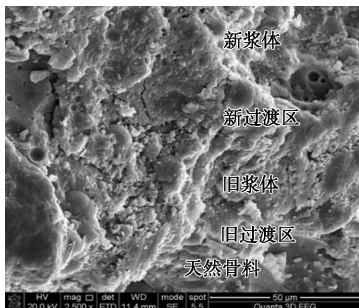
时,粉煤灰再生骨料混凝土的抗压强度已经满足再生混凝土的强度等级要求。

2.2 微观形貌

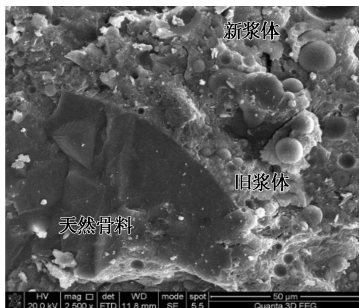
选取 RAC40-R 与 RAC40-W 两个配合比进行微观形貌测试,由图 2 可知,当直接采用再生骨料作为替代性骨料时,混凝土中存在明显的分层,即天然骨料-旧过渡区-旧砂浆-新过渡区-新砂浆的复杂界面,如图 2 (a) 所示。在养护龄期为 3 d 时,新拌浆体中仍存在大量未水化的粉煤灰颗粒,在过渡区附近形成有效的填充;随着水化时间增加到 28 d,这些填充的粉煤灰颗粒逐渐水化形成胶凝材料,进一步优化粉煤灰再生骨料混凝土中的孔结构,从而有效改善其力学性能。但是,复杂的界面过渡区仍然存在,再生骨料较高的吸水率造成其附近的



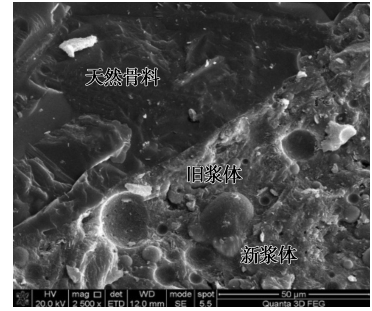
(a) RAC40-R, 3 d



(b) RAC40-R, 28 d



(c) RAC40-W, 3 d



(d) RAC40-W, 28 d

图 2 粉煤灰再生骨料混凝土微观形貌

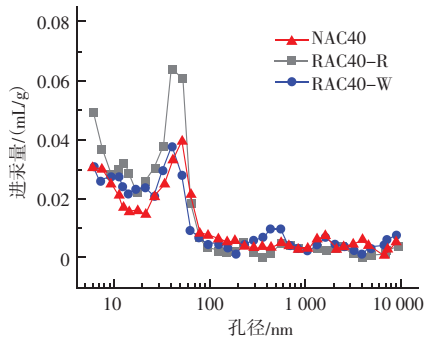
Fig. 2 Microstructure of fly ash regenerated aggregate concrete

有效水胶比显著降低,胶凝材料无法完全水化,从而降低了再生骨料与新拌浆体之间的结合能力,最终导致粉煤灰再生骨料混凝土的力学性能仍旧低于天然骨料混凝土。

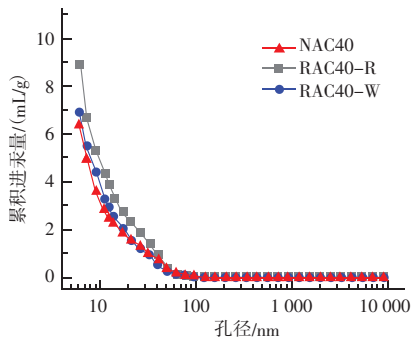
当采用预浸泡方式对再生骨料进行预处理后,发现粉煤灰再生骨料混凝土中的分层现象被有效缓解,天然骨料-旧砂浆以及旧砂浆-新砂浆之间的界面过渡区被同时改善,过渡区的宽度显著降低,证明了预浸泡方式对粉煤灰再生骨料混凝土的有效影响。显然,当再生骨料预吸水饱和后,再生骨料与新拌浆体之间的结合能力被有效改善。一方面,再生骨料的较高吸水率不会影响附近的新拌浆体,保证了胶凝材料的充分水化;另一方面,随着水化时间增加,再生骨料中的水分逐渐释放到附近的浆体中,从而对附近的浆体起到内养护作用,提高胶凝材料的水化进程。因此,预浸泡后再生骨料所制备的混凝土中过渡区被明显改善,从而有效提高了粉煤灰再生骨料混凝土的力学性能。

2.3 孔结构

选取 NAC40、RAC40-R 与 RAC40-W 三组配合比进行最可几孔径分析。由图 3 (a) 可知,与天然骨料混凝土相比,再生骨料混凝土中最可几孔径从 50.41 nm 向左移动到 40.33 nm,同时, RAC40-R 最可几孔径对应孔的数量增加了 61.44%,对应了再生骨料中含有的旧砂浆以及复杂的界面过渡区。当采用预浸泡方式对再生骨料进行预处理后, RAC40-W 中孔的数量明显降低,最可几孔径对应孔的数量与天然骨料混凝土基本相同,且整体的孔径分布规律基本保持一致。



(a) 进汞量



(b) 累积进汞量

图3 粉煤灰再生骨料混凝土孔结构

Fig. 3 Fly ash regenerated aggregate concrete pore structure

此外，混凝土孔隙率的变化可以定量反映混凝土材料中孔的整体变化。当采用再生骨料直接替代天然骨料时，孔隙率从 10.94% (NAC40) 增加到 12.13% (RAC40-R)，说明再生骨料的全替代会直接增加粉煤灰再生骨料混凝土中孔的数量。当对再生骨料进行预浸泡处理后，RAC40-W 的孔隙率下降到 11.74%，证明了预浸泡方式对再生骨料的改性效果显著，避免了再生骨料的高吸水率对粉煤灰再生骨料混凝土的不利影响。

此外，混凝土的抗压强度与其孔隙率密切相关。如图 4 所示，随着再生骨料对天然骨料的全替代，粉煤灰再生骨料混凝土的孔隙率出现显著提升，对应了宏观上其抗压强度的迅速降低。随后，将再生骨料采用预浸泡方式进行处理后，RAC40-W 的孔隙率出现了明显降低，同时在抗压强度上出现了明显的提高，此时粉煤灰再生骨料混凝土的抗压强度基本与天然骨料混凝土相一致，证实了预浸泡方式对再生骨料的改善效果。

3 结论

分别探究了再生骨料的全替代以及再生骨料的

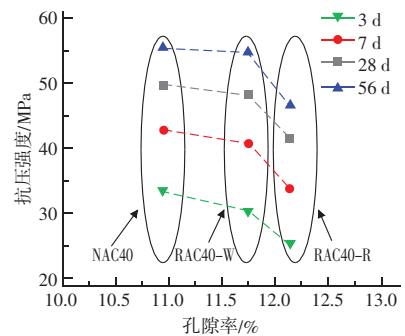


图4 粉煤灰再生骨料混凝土孔隙率与抗压强度的关系

Fig. 4 Relationship between porosity and compressive strength of fly ash regenerated aggregate concrete

预浸泡处理方式下，再生骨料对粉煤灰再生骨料混凝土力学性能和微观结构的影响规律及作用机理，得到主要结论如下。

(1) 当再生骨料代替天然骨料后，粉煤灰再生骨料混凝土的 28 d 抗压强度降低了 16.5%。再生骨料的高吸水率以及复杂的界面过渡区导致骨料附近的有效水胶比降低，阻碍了胶凝材料的水化，进而降低了宏观力学性能。

(2) 采用预浸泡方式对再生骨料进行处理后，粉煤灰再生骨料混凝土的抗压强度与天然骨料混凝土基本一致。再生骨料的预吸水饱和保证了胶凝材料的充分水化，同时自由水随着水化逐渐释放到附近的浆体中，通过内养护的方式进一步促进胶凝材料的水化进程。

(3) 再生采用预浸泡方式可以有效降低再生骨料的高吸水率对骨料附近浆体的影响，通过对界面过渡区的改善增强了新拌浆体与再生骨料之间的结合能力，从而有效避免了再生骨料对混凝土力学性能的不良影响。

参 考 文 献

- [1] GUO H, SHI C J, GUAN X M, et al. Durability of recycled aggregate concrete - A review [J]. Cement and Concrete Composites, 2018 (89): 251-259.
- [2] 杨军强, 孙欣. 建筑垃圾再生骨料工程特性分析 [J]. 施工技术 (中英文), 2022, 51 (16): 105-109.
- [3] ZHENG Y X, ZHUO J B, ZHANG P. A review on durability of nano-SiO₂ and basalt fiber modified recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021 (304): 124659.
- [4] ZHAN B, XUAN D X, POON C S, et al. Characterization of interfacial transition zone in concrete prepared (下转第 23 页)

参 考 文 献

- [1] RIEKSTINS A, BAUMANIS J, BARBARS J. Laboratory investigation of crumb rubber in dense graded asphalt by wet and dry processes [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 292: 123459.
- [2] KAKAR M R, MIKHAILENKO P, PIAO Z, et al. Analysis of waste polyethylene (PE) and its by-products in asphalt binder [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 280: 122492.
- [3] 汪海年, 郑文华, 尤占平, 等. 聚合物改性剂和石油沥青相容性评价方法研究进展 [J]. *交通运输工程学报*, 2023, 23 (1): 8-26.
- [4] 刘少鹏, 黄卫东, 纪淑贞. PE 对沥青及沥青混合料性能影响研究 [J]. *公路工程*, 2016, 41 (1): 28-32.
- [5] 史绍松, 李传强, 凌天清, 等. 不同熔点的废旧 PE 裂解蜡温拌沥青性能研究 [J]. *化工新型材料*, 2022, 50 (10): 275-280.
- [6] 吴正光, 王彤, 程壮, 等. 废旧 PE 改性沥青混合料路用性能试验研究 [J]. *公路*, 2017, 62 (11): 235-238.
- [7] 汪海年, 徐宁, 陈玉, 等. 生物油再生老化沥青材料研究进展 [J]. *中国公路学报*, 2023, 36 (5): 1-20.
- [8] SONIBARE K, RUCKER G, ZHANG L Q. Molecular dynamics simulation on vegetable oil modified model asphalt [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 270: 121687.
- [9] CAO X X, CAO X J, TANG B M, et al. Investigation on possibility of waste vegetable oil rejuvenating aged asphalt [J]. *Applied Sciences*, 2018, 5: 765.
- [10] SUO Z, YAN Q, JI J, et al. The aging behavior of reclaimed asphalt mixture with vegetable oil rejuvenators [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 299: 123811.
- [11] SUO Z, CHEN H, YAN Q, et al. Laboratory performance evaluation on the recovering of aged bitumen with vegetable oil rejuvenator [J]. *Frontiers in Materials*, 2021, 8.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20-2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [13] MA Q, GUO Z, GUO P, et al. Research on the viscosity-temperature properties and thermal stability of stabilized rubber powder modified asphalt [J]. *Sustainability*, 2021, 13 (24): 13536: 1-14.
- [14] YANG T, CHEN M, ZHOU X, et al. Evaluation of thermal-mechanical properties of bio-oil regenerated aged asphalt [J]. *Materials*, 2018, 11 (11): 2224.
- [15] 冯新军, 杨洪阳, 肖洪海, 等. 基于 SBS 结构修复的再生沥青性能及机理研究 [J]. *中外公路*, 2024, 44 (4): 56-63.

(上接第 12 页)

- without transverse reinforcement based on refined experimental measurements [J]. *Structural concrete*, 2017, 19 (1): 49-64.
- [10] HUBER P, HUBER T, KOLLEGER J. Investigation of the shear behavior of RC beams on the basis of measured crack kinematics [J]. *Engineering Structures*, 2016, 113: 41-58.
- [11] 肖建庄, 孙畅, 谢贺. 再生混凝土骨料咬合及剪力传递机理 [J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2014, 42 (1): 13-18.
- [12] PETERS W H, RANSON W F. Digital Imaging Techniques in Experiment Stress Analysis [J]. *Optical Engineering*, 1982, 21 (3): 427-431.
- [13] BELBACHIR A, ALAM S Y, MATALLAH M, et al. Size effect on the contribution of the aggregate interlock mechanism in reinforced concrete beams without shear reinforcement [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2020, 24 (9/10): 1363-1380.
- [14] 任会兰, 杜一宁, 宋水舟. 基于 DIC 方法研究混凝土劈裂的变形和破坏 [J]. *高压物理学报*, 2022, 36 (4): 91-100.
- [15] 刘琼, 肖建庄, 潘智生, 等. 废混凝土骨料和废砖骨料再生混凝土的模型化研究 [J]. *建筑结构学报*, 2020, 41 (12): 133-140.

(上接第 17 页)

- with carbonated modeled recycled concrete aggregates [J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 136: 106175.
- [5] 王娟, 李秀领, 郭强. 不同粗骨料取代率下粉煤灰再生混凝土的力学性能研究 [J]. *混凝土*, 2024 (6): 105-109.
- [6] 张玉栋, 张佳帅, 贾吉龙, 等. 粗骨料全替代再生混凝土的孔结构与力学性能分析 [J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43 (8): 3005-3016, 3033.
- [7] SONG X B, LI C Z, CHEN D D, et al. Interfacial mechanical properties of recycled aggregate concrete reinforced by nano-materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2021 (270): 121446.
- [8] YU L Z, WU R X. Using graphene oxide to improve the properties of ultra-high-performance concrete with fine recycled aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2020 (259): 120657.
- [9] LI W G, LONG C, TAM V W Y, et al. Effects of nano-particles on failure process and microstructural properties of recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 142: 42-50.
- [10] 程子扬, 陈国夫, 屠艳平. 纳米 CaCO₃ 对粉煤灰再生骨料混凝土性能及微结构的影响 [J]. *建筑材料学报*, 2023, 26 (3): 228-235.
- [11] 张正亚, 邢振贤, 龙晋豫. 建筑垃圾再生骨料混凝土配合比试验研究 [J]. *江西建材*, 2017 (24): 2, 4.