

文章编号: 1673- 9469(2011) 01- 0005- 05

海水环境下再生混凝土的腐蚀研究

安新正^{1,2}, 易成², 姜新佩¹, 刘超³

(1. 河北工程大学 土木学院, 河北 邯郸 056038; 2. 中国矿业大学 力学与建筑学院, 北京 100083; 3. 河北工程大学 建筑学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为了研究不同再生骨料替代率 ρ 、荷载对再生混凝土腐蚀损伤的影响, 利用强度等级为 C25 的废弃普通混凝土构件制备再生骨料, 并分别以 $\rho = 0\%$ 、 $\rho = 30\%$ 和 $\rho = 50\%$ 的再生骨料替代率来配置再生混凝土。采用人工海水侵蚀溶液对弯曲应力作用下的再生混凝土试件进行 0、10、20、30、40、50 次干湿交替循环腐蚀试验, 以研究人工海水腐蚀条件下再生骨料替代率和弯曲应力对再生混凝土性能的影响规律。结果表明, 弯曲应力的存在加速了人工海水对再生混凝土的侵蚀作用。同时, 在相同弯曲应力系数下人工海水对再生混凝土的腐蚀损伤将随再生骨料替代率的增大而减小; 在相同再生骨料替代率下人工海水对再生混凝土的腐蚀损伤将随弯曲应力系数的增大而增大。

关键词: 再生混凝土; 再生骨料取代率; 干湿交替循环; 腐蚀; 弯曲应力

中图分类号: TU 528

文献标识码: A

Study on corrosion of recycled aggregate concrete in seawater environment

AN Xin-zheng^{1,2}, YI Cheng², JIANG Xin-pei¹, LIU Chao³

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China; 2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 3. Architecture School, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract: The recycled aggregate concrete (RAC) were respectively prepared with 0%, 30%, 50% of recycled aggregate made from C25 grade waste concrete, to research the effect of the recycled aggregate replacement ratio and the load on the corrosion resistance. Then the dry-wet test with the aggressive medium of artificial seawater under the effect of bending stress by 0, 10, 20, 30, 40 and 50 cycles were carried out on the RAC specimens to observe the influence of artificial seawater corrosion on the RAC internal damage. The results show that the bending stress has accelerated deterioration velocity of the material performance of RAC in environment of artificial seawater. Furthermore, the corrosion damage of RAC in artificial seawater decreases with the increase of recycled aggregate replacement ratio in the same bending stress coefficient, and the corrosion damage of RAC in artificial seawater increases with the increase of bending stress coefficient in the same recycled aggregate replacement ratio.

Key words: recycled aggregate concrete (RAC); recycled aggregate replacement ratio; drying-wetting cycles; corrosion; bending stress coefficient

对废弃混凝土进行杂质清洗和机械破碎后可制成具有一定颗粒级配的再生混凝土粗骨料。将这些再生混凝土粗骨料以一定的比例替代天然的粗骨料, 可以配置出性能优良的再生粗骨料混

土(简称再生混凝土)以满足道路、城市基础设施、工业与民用建筑等建设对混凝土材料日益增长的需求。再生混凝土是废弃混凝土资源化循环利用、实现建筑材料可持续发展和低碳经济的较为

收稿日期: 2010- 11- 17

基金项目: 煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题(SKLCRSM09KF08); 河北省自然科学基金(E2010001034) 特约专稿
作者简介: 安新正(1963-), 男, 河南镇平人, 博士, 副教授, 从事混凝土耐久性检测方面的研究。

有效手段之一。

目前,国内外学者在再生混凝土的冻融、硫酸盐侵蚀、碳化等耐久性方面已取得了阶段性的研究成果^[2-12],然而在海水环境下再生混凝土耐久性方面的研究目前还较为匮乏。本文采用室内人工海水干湿交替循环侵蚀的方法对施加有一定比例弯曲应力的再生混凝土试件进行快速腐蚀试验,研究其在一定比例弯曲应力、不同再生粗骨料替代率条件下,再生混凝土腐蚀损伤的变化规律,以期在类似条件下再生混凝土结构的耐久性研究提供有益的参考。

1 试验过程

1.1 再生粗骨料及其它材料的选用

①再生粗骨料:采用强度等级为 C25 的旧有建筑拆卸下来的混凝土梁,并经自来水清洗、鄂式破碎机破碎、颗粒筛分等程序后制成具有连续颗粒级配的再生粗骨料(粒径:5~10mm)。经检验可得到该再生粗骨料的基本性能指标(详见表 1);

②细骨料:采用普通河砂,其表观密度为 $2.65\text{g}/\text{cm}^{-3}$,细度模数为 2.6;

③掺合料:采用邯郸码头电厂产 I 级粉煤灰;

④水 泥:采用太行山 P. O 42.5 级水泥;

⑤天然骨料:采用邯郸市,具有连续级配的碎石(粒径:5~10mm),其基本性能指标见表 1;

⑥水:采用邯郸市饮用自来水。

表 1 粗骨料的性能指标

Tab. 1 Properties of concrete aggregate

骨料类型	粒径范围 / mm	含水率 / %	吸水率 / %	表观密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	压碎指标
再生	5~10	2.38	5.36	2.215	11.73
天然	5~10	0.27	0.63	2.640	4.10

1.2 再生混凝土配合比设计及试件制作

再生粗骨料替代率在此取 $\rho = 0\%$ 、 $\rho = 30\%$ 和 $\rho = 50\%$ 3 个档次。按设计的替代百分比称量再生粗骨料与天然粗骨料,并通过机械搅拌配制成混合粗骨料(简称 N-R 混合骨料),然后进行 C20 强度等级再生混凝土的室内试配并完成其配合比设计(详见表 2)。基于 3 个档次的配合比设计,每个档次制作 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 400\text{mm}$ 的再生混凝土棱柱体试件 45 件(为了测试 28d 抗压强度,同时每个档次也制作相同条件下的 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 100\text{mm}$ 立方体试件),并在标准养护环境下养护 28d 后全部移入室内环境下养护至 60d 备用。

表 2 再生混凝土配合比及其性能指标

Tab. 2 Mix proportions and performance index of recycled aggregate concrete

试件类型	水泥 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	水 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	粉煤灰 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	天然粗骨料 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	再生粗骨料 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	替代率 / %	细骨料 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	28d 平均抗压强度 f_{cu} / MPa
N-R-0	345	172.5	52	1148	0	0	469	24.6
N-R-30	345	180	52	800	348	30	469	21.5
N-R-50	345	188	52	575	575	50	469	19.3

1.3 试验方法与过程

(1) 弯曲应力的取值与实现

定义弯曲应力系数 k_w 为施加给简支棱柱体试件的最大弯曲应力值与棱柱体试件的极限弯曲应力平均值之比。

$$k_w = \frac{\sigma_p}{\sigma_u} \quad (1)$$

式中, k_w —弯曲应力系数; σ_p —在施加荷载 p 作用

下棱柱体试件底部纤维产生的最大拉应力值, MPa; σ_u —极限荷载 p_u 作用下棱柱体试件底部纤维产生的极限平均拉应力值, MPa。

分别从再生粗骨料替代率 $\rho = 0\%$ 、 $\rho = 30\%$ 和 $\rho = 50\%$ 3 组棱柱体再生混凝土试件(已养护至 60d)中各抽取 3 个棱柱体试件进行抗折破坏试验,并统计出 3 个试件所施加极限荷载的算术平均值,结合式(1)计算出在设计 k_w 下的 p 值(表 3)。

表 3 弯曲应力系数设计值

Tab. 3 Designed values of bending stress coefficients

k_{iw} 设计值	实际施加荷载 p/kN		
	$\rho_r = 0\%$	$\rho_r = 30\%$	$\rho_r = 50\%$
0.10	1.50	1.20	0.90
0.20	3.10	2.40	2.00
0.30	4.60	3.70	2.90
0.40	6.10	4.90	3.80

(2) 弯曲应力的实现

为了实现对再生混凝土棱柱体试件施加弯曲应力,设计了试件弯曲应力施加装置(详见图 1)。具体方法是:分别对 N-R-0、N-R-30 和 N-R-50 3 组再生混凝土棱柱体试件均按图 1 所示的组装方法进行就位组装,在完成试件组装后接着进行弯曲应力系数为 $k_{iw} = 0.1、0.2、0.3$ 和 0.4 时试件弯曲应力的施加。加载量可通过弹簧测力系统控制。

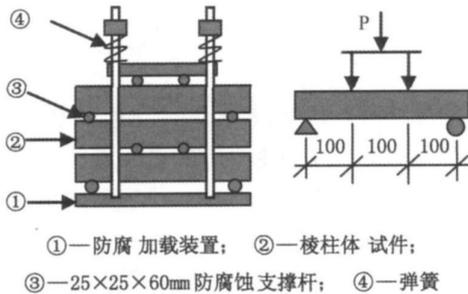


图 1 弯曲应力加载示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bending stress loading

(3) 腐蚀溶液的配制

研究发现海水环境对混凝土结构具有巨大的腐蚀性^[13],为了模拟海水环境介质对再生混凝土的腐蚀作用,本文依据文献[14]的配合比例配制了用于再生混凝土腐蚀试验的人工海水腐蚀溶液(各成分用量详见表 4)。

表 4 人工海水的主要成分

Tab. 4 Major components and amount of artificial seawater composition

主要成分	含量/($g \cdot L^{-1}$)
$MgCl_2$	12.70
$NaCl$	105.00
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	12.15
$CaCO_3$	0.50
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	7.70

(4) 腐蚀试验与超声波波速测试

将已养护至 60d 的再生混凝土棱柱体试件首先用清水浸泡 2d,然后移出并保持干燥状态 2d 后,采用混凝土超声波检测仪进行超声波波速的测试,环境温度控制在 $(40 \pm 5)^\circ C$ 。对完成了超声波波速测试的各组试件分别按设计要求进行弯曲应力施加,然后将试件连同加载装置移入到盛有人工海水溶液的防腐蚀容器之中,并保持人工海水溶液液面超出最上层试件顶部 20mm 以上,浸泡时间为 2d,而后将容器中人工海水溶液全部抽出,保持 2d 无溶液浸泡的干燥状态,环境温度控制在 $(40 \pm 5)^\circ C$,至此完成一次干湿交替循环。再生混凝土棱柱体试件的设计干湿交替循环次数 N 取为 0 次、10 次、20 次、30 次、40 次和 50 次,并在设计干湿交替循环次数完成之时进行超声波波速的测试。同时,在整个试验过程中注意监测施加荷载和人工海水腐蚀溶液浓度的变化,以保持施加荷载和溶液浓度的稳定性。

2 试验结果与分析

2.1 人工海水侵蚀后再生混凝土的损伤

腐蚀后再生混凝土棱柱体试件的超声波波速测试应在完成设计干湿交替循环次数的条件下进行。并以每组试件超声波波速测试数据的算术平均值作为该组相应干湿交替循环次数下的评定值,并依据式(2)计算出腐蚀后棱柱体试件的内部损伤变量。

$$D_{sw} = 1 - \frac{V_{sw}^2}{V_0^2} \quad (2)$$

式中, V_0 —腐蚀前在纯净水浸泡 2d 再移入室内自然干燥 2d 后,棱柱体试件的超声波波速,取 3 个试件的算术平均值, m/s ; V_{sw} —腐蚀后棱柱体试件的超声波波速,取 3 个试件的算术平均值, m/s ; D_{sw} —再生混凝土的内部损伤变量, $0 \leq D_{sw} \leq 1$ (当 $D_{sw} < 0$ 时,表明试件无腐蚀损伤产生,可取 $D_{sw} = 0.00$)。

2.2 再生混凝土的耦合腐蚀

试验发现,在人工海水干湿交替循环与弯曲应力的耦合作用下再生混凝土试件的腐蚀过程基本上可以分为 3 个阶段,即:腐蚀的初期阶段、腐蚀的中期阶段和腐蚀的加速阶段。

(1) 腐蚀的初期阶段($N \leq 10$ 次)。在这一阶段,施加了弯曲应力系数 $k_w = 0.1, 0.2, 0.3$ 的再生混凝土试件在外观上均没有出现表面及棱角损伤痕迹,超声波波速检测结果显示与无损伤时相比较波速均有一定的提高。而只有 $k_w = 0.4$ 且 $N = 10$ 次的试件在超声波波速上与无损伤时相比,波速均略有减小,外观上有轻微棱角剥蚀现象出现。这主要是因为人工海水干湿交替循环作用的初期阶段,由于弯曲应力的作用使得试件底部处于受拉状态,这一状态不同程度地加速了再生混凝土底部的初始裂纹、孔隙、微孔通道部分被人工海水与水泥基的有效成分反应的生成物所堵塞的速度,从而加速了再生混凝土结构的密实化并随着腐蚀时间的推移,试件的初始缺陷被填实并导致混凝土基本性能的改善。

(2) 腐蚀的中期阶段($N > 10$ 次,且 $N \leq 30$ 次)。这一时期,在相同的干湿交替循环次数 N 下再生混凝土试件的外观剥蚀损伤程度随 k_w 值的增大而加重;在弯曲应力系数相同下,试件的外观剥蚀损伤程度随干湿交替循环作用次数的增加而加重。特别是 $k_w = 0.4$ 时随干湿交替循环作用次数的增加试件的外观剥蚀损伤比其它情况都要快。这主要是因为人工海水干湿交替循环作用的中期阶段,随着腐蚀时间的推移反应生成物继续增多并因此而引发体积膨胀的产生,同时体积膨胀应力又与弯曲应力叠加产生耦合效应。这一耦合效应会随干湿交替循环作用次数的增加而累积增大,并最终在试件截面的不同部位相继出现大于再生混凝土抗拉强度的现象并引发新的损伤不断生成^[15]。

(3) 腐蚀的加速与破坏阶段($N > 30$ 次)。在这一时期,随干湿交替循环作用次数的增加,试件表面及内部损伤速度加快。在 $N = 30 \sim 40$ 次期间,所有试件的部分边角处有骨料露出,且施加了 $k_w = 0.3, 0.4$ 的所有试件均发生了脆性断裂破坏现象。当 $N = 50$ 次时,剩余的试件也都发生了脆性断裂破坏。

2.3 腐蚀损伤分析

基于干湿交替循环次数 N 为 20、30 次时的试验数据,得到了 20、30 次干湿交替循环时不同弯曲应力系数下再生混凝土内部损伤变量与再生粗骨料替代率的相关关系(见图 2)。

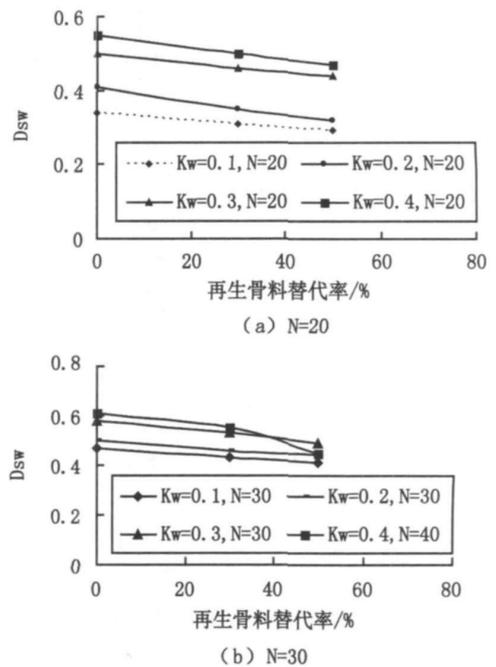


图2 弯曲应力对再生混凝土腐蚀损伤的影响

Fig.2 Effect of bending stress coefficient on corrosion damage of recycled aggregate concrete

由图 2 可以得知,在相同的干湿替换条件下,当施加的弯曲应力相同时,再生混凝土内部损伤会随再生骨料替代率的增大而减小;当再生骨料替代率相同时,再生混凝土内部损伤会随施加的弯曲应力的增大而增大;当再生骨料替代率和施加的弯曲应力都相同时,干湿替换次数从 $N = 20$ 次增加到 $N = 30$ 次,混凝土内部损伤都有较大的增长。

3 结论

(1) 再生混凝土的抗侵蚀性能要优于同条件下的普通混凝土。

(2) 弯曲应力对人工海水侵入再生混凝土材料中的化学反应具有一定的加速作用,且加速作用随着弯曲应力系数的增大影响作用也越来越显著。

(3) 在相同的弯曲应力系数和干湿交替循环次数下,再生混凝土内部损伤变量将随再生骨料替代率的增大而减小。

参考文献:

- [1] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] DILLIVIAIVN R. Concrete with recycled concrete aggregate

- [C]/ Proceedings of the International Symposium on Sustainable Construction: use of Recycled Concrete aggregate, London, UK: 1998, 239– 253.
- [3] SALEM R M, BURDETTE E G, JACKSON N M. Resistance to freezing and thawing of recycled aggregate concrete [J]. ACI Materials Journal, 2003, 100(3): 216.
- [4] OLORUNSOG F T, PADAYACHEE N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32: 179– 185.
- [5] DHIR R K, LIMBACHIYA M C. Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1999, 134(3): 257– 274.
- [6] SALOMON L M, HELENE P. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable developments [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(11): 1975– 1980.
- [7] MANDAL S, CHAKRABORTY S, GUPTA A. Some studies on durability of recycled aggregate concrete [J]. Indian Concrete Journal, 2002, 76(6): 385– 388.
- [8] 安新正, 易成, 刘燕, 等. 硫酸盐环境下再生混凝土性能试验研究[J]. 混凝土, 2010, (7): 31– 33.
- [9] 戴薇原, 孙伟民, 缪汉良. 再生混凝土的抗冻融性试验研究[J]. 混凝土, 2007, (8): 69– 72.
- [10] 王军强, 陈年和, 蒲琪. 再生混凝土强度和耐久性性能试验[J]. 混凝土, 2007, (5): 53– 56.
- [11] 陈爱玖, 章青, 王静, 等. 再生混凝土冻融循环试验与损伤模型研究[J]. 工程力学, 2007, (5): 53– 56.
- [12] 安新正, 易成, 刘燕, 等. 再生混凝土与钢筋的粘结性能试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2010, 27(3): 1– 4.
- [13] 李树枕, 张峰, 祝金鹏. 海水侵蚀环境下混凝土力学性能劣化试验[J]. 公路交通科技, 2009, 26(12): 35– 38.
- [14] 张玉敏, 王铁成. 人工海水对混凝土侵蚀性的研究[J]. 混凝土, 2001, (11): 48– 50.
- [15] 安新正, 易成, 王晓虹. 钢筋与混凝土耦合腐蚀 RC 梁性能研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2009, 26(3): 15– 18.

(责任编辑 马立)

(上接第 4 页)

- [5] 汪梦浦, 周锡元. 结构动力方程的更新精细积分法 [J]. 力学学报, 2004, 36(2): 191– 195.
- [6] 钟万勰. 应用力学对偶体系[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [7] 侯瑞珀. 基于并联剪弯梁模型的高层建筑结构协同分析[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2006.
- [8] 高洪俊, 王美农, 闫亚光. 框剪结构协同分析的状态空间法[J]. 西安科技大学学报, 2007, 27(4): 573– 574.
- [9] 钟万勰. 应用力学的辛数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [10] 胡启平, 李张苗, 侯瑞珀. 铁摩辛柯梁弯曲问题的对偶求解体系[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2006, 23(3): 1– 4.
- [11] 包世华. 高层建筑结构计算[M]. 北京: 高等教育出版社, 1991.
- [12] 汪梦浦, 周锡元. 结构动力方程的高斯精细时程积分法[J]. 工程力学, 2004, 21(4): 13– 16.
- [13] 胡启平, 刘鹏, 吕铭. 考虑部分楼板变形时框-剪结构的协同分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2009, 26(3): 4– 7.
- [14] 胡启平, 孙良鑫, 高洪俊. 铁摩辛柯梁弯曲问题的精细积分法[J]. 工业建筑, 2007, 37(s1): 268– 270.

(责任编辑 马立)