

再生细集料对水泥混凝土物理力学性能的影响

孙家瑛^{1,2}, 车乘乘²

(1. 浙江大学宁波理工学院绿色建材与废弃物资源化研究中心, 宁波 315100;

2. 上海大学土木工程系, 上海 20072)

摘要:废弃混凝土通过一系列再生工艺可以得到再生混凝土细集料, 将其部分或全部替代天然砂配制混凝土可以达到变废为宝的目的, 但是再生混凝土细集料特殊的性质会使得掺再生细集料的混凝土性能与普通混凝土之间存在较大的差异。在研究再生混凝土细集料的粒径和物理特性对水泥混凝土物理力学性能影响的基础上, 探讨再生混凝土细集料对混凝土的抗气渗性能、抗氯离子渗透性能、抗碳化性能的影响。研究结果发现, 再生细集料在破碎制备过程中产生了大量缺陷和粉料, 采用一定量的再生细集料替代天然细集料配制混凝土, 其物理力学性能、抗氯离子渗透性能和抗碳化能力均与基准混凝土有明显差异。如再生细集料最小粒径从 0.16 mm 及以下提高到 2.36 mm 就可以明显改善混凝土物理力学性能。

关键词:再生细集料; 最小粒径; 物理力学性能; 抗气渗性能; 氯离子渗透性能;

中图分类号: TU522.09 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2011)03-0143-04

Influence of Fine Recycled Aggregate on Physical and Mechanical Properties of Concrete

SUN Jia-ying^{1,2}, CHE Cheng-cheng²

(1. Research Center of Green Building Materials and Waste Resources Reuse, Ningbo Institute of Technology Zhejiang University, Ningbo 315100, P. R. China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, P. R. China)

Abstract: Based on a series of recycle process, waste concrete can be made into fine recycled aggregate which can be used completely or partly to compound concrete as a substitute for natural sand. But the special properties of fine recycled aggregate make the performance of concrete with fine recycled aggregate different from normal concrete. Characteristics of fine recycled aggregate and its influence on physical and mechanical properties of concrete are studied. On this basis, the influence of fine recycled aggregate on gas permeation properties, chloride permeability, and carbonation resistance of concrete are also studied. It is found that fine recycled aggregate produces a lot of defects in crushing preparation. And the compressive strength, the chloride permeability and the carbonation resistance of the concrete with fine recycled aggregate as substitution show difference from that of normal concrete.

Key words: fine recycled aggregate; the smallest aggregate size; physical and mechanical properties; gas permeation properties; chloride permeability

再生细集料是由废弃混凝土经过清洗、破碎、分级和筛选制得。由再生细集料部分或全部替代天然

集料配置混凝土可以实现废弃混凝土充分地利用, 达到变废为宝的目的, 对于环境保护、节约资源、发

收稿日期: 2010-12-15

基金项目: 科技部国际合作重大项目(2010FA24590); 国家自然科学基金(50808160)

作者简介: 孙家瑛(1960-), 男, 教授, 主要从事建筑材料研究, (E-mail) jakys@163.com.

展生态建筑更具有重要意义^[1-4]。但由于废弃混凝土来源复杂造成再生细集料品性等与天然细集料相差很大,这些就会影响采用再生细集料所配制的混凝土的性能,目前对再生集料的研究更多是集中于再生粗集料,对再生细集料及相关混凝土材料性能还缺乏深入的、系统的研究。针对再生细集料特性分析了掺再生细集料对混凝土力学性能、工作性能、气渗性能、氯离子渗透性能和碳化性能的影响。为改善再生细集料混凝土性能,实现再生细集料的资源化利用提供理论依据。

1 实验方法

1.1 实验材料

水泥:采用海螺牌 P. O42.5 普通硅酸盐水泥,其物理力学性能见表 1。

表 1 水泥的物理力学性质

| Setting time /min | | Compressive strength /MPa | | Flexural strength/MPa | |
|-------------------|-------|---------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
| Initial | Final | 7 th d | 28 th d | 7 th d | 28 th d |
| 70 | 145 | 39.1 | 52.2 | 7.2 | 8.7 |

集料:天然粗集料采用 5~31 mm 的石灰岩。再生混凝土细集料采用中冶集团十三冶有限公司生产的 0~5 mm 的再生混凝土细集料。

天然砂采用细度模数为 2.5 的天然河砂。

粉煤灰采用宁波北仑电厂二级粉煤灰。

矿渣微粉:采用上海宝田新型材料有限公司生产的矿渣粉,比表面积为 400 m²/kg。

1.2 实验方法

抗压强度采用 15 cm×15 cm×15 cm 试件,按《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T 50081-2002)成型,标养后分别测定其 7 d、28 d 抗压强度。混凝土氯离子渗透试验按照 ASTM1202 方法进行。混凝土气渗试验按照 RILEM TC116—PCD 试验方法进行。混凝土碳化性能试验按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GBJ82—85)进行。

基准混凝土配合比为水泥 270 kg/m³;粉煤灰 90 kg/m³;矿渣粉 90 kg/m³;砂 743 kg/m³;碎石 1027 kg/m³;水 180 kg/m³。再生混凝土细集料掺量为 RS0;0%,RS20;20%,RS40;40%,RS60;60%,RS80;80%,RS100;100%。

2 结果与讨论

2.1 再生混凝土细集料的特性

再生细集料与天然河砂外观形貌特征如图 1 所示。如该图所示,图 1b 天然河砂是由岩石经长期风化或水流磨损作用下形成,因此其颗粒分布较为均匀,颗粒多为近似球状,且表面少棱角、较光滑、有明显光泽,坚固度较好。图 1a 再生细集料由于是经机械破碎而成,且其母体材料以废弃混凝土为主,因此颗粒尺寸差异较大,粉料多,且表面多棱角、有裂缝,同时易团聚。



图 1 细集料颗粒外观特征

再生细集料与天然河砂的级配及各种物理性能测试结果列于表 2

表 2 各种细集料级配与性质

| Samples | Apparent density | Bulk density | 4.75 mm | 2.36 mm | 1.18 mm | 0.6 mm | 0.3 mm | 0.15 mm | Fineness modulus | Gradation range | Water absorption | mud content |
|-------------------------|------------------|--------------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|------------------|-----------------|------------------|-------------|
| Fine recycled aggregate | 2 470 | 1 260 | 0.20 | 22.20 | 41.20 | 60.20 | 70.20 | 84.00 | 2.80 | medium sand | 7.0 | 15.6 |
| Natural sand | 2 600 | 1 470 | 3.14 | 10.96 | 24.18 | 59.74 | 95.06 | 99.37 | 2.80 | medium sand | 1.6 | 1.0 |

由表中实验结果可知,与天然砂相比,再生细集料的细度模数与之相同,均为 2.8,但是累计筛余结果可见,再生细集料颗粒级配呈两端大,中间小的特征,其 1.18 mm 以上颗粒和 0.3 mm 以下粉料明显

多于天然河砂。

由表 2 给出的天然砂和再生细集料的物理性质实验表明,再生细集料吸水率显著高于天然砂,约为天然砂的 4 倍以上。吸水率增大的主要原因是由于细

集料是通过机械破碎而形成的,因此在其制备过程中存有大量由于硬伤累积形成的微裂缝,导致再生细集料表观密度下降,吸水率提高。此外再生细集料中,0.15 mm以下颗粒含量较多,由于再生细集料来源于废弃混凝土,因此这些粒径集料主要以硬化水泥浆体为主,这些水泥浆体破碎成粉状后,在表面积增大同时,其中还有一定的未水化相,其对水有较强的吸附力,因此进一步提高了再生细集料的吸水率。

2.2 再生混凝土细集料对水泥混凝土物理力学性能影响

再生混凝土细集料等量替代天然砂配制混凝土的工作性能,7 d抗压强度 28 d抗压强度试验结果如表3所示。

由表3再生细集料混凝土坍落度实验结果可知。在用水量一定的情况下,随着再生细集料掺量的增加,混凝土的坍落度逐渐减小,当其掺量由20%增大到40%时,混凝土的坍落度就已经开始明显的下降,当其掺量增加到80%时混凝土无任何流动性。同时分析混凝土的1 h经时坍落度损失可知,掺入再生细集料后混凝土经时坍落度损失较大。

由表3中再生细集料混凝土的抗压强度测试结果可知,再生细集料取代率对混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 存在一定影响,随着再生细集料掺量的增加,混凝土的7 d和28 d抗压强度均逐渐降低。当再生细集料掺量 $\leq 40\%$,混凝土的28 d立方体抗压强度下降幅度较小,但是当掺量 $> 40\%$ 时,混凝土的28 d抗压强度下降较为明显,再生细集料掺量为80%时,其28 d立方体抗压强度为29.7 MPa,与基准混凝土相比下降37.9%了,已不能满足C30混凝土技术要求。

表3 掺再生细集料混凝土物理力学性能

| NO. | Slump/mm | | Compressive strength/MPa | |
|-----------------|----------|-----|--------------------------|------|
| | Initial | 1 h | 7 d | 28 d |
| Normal concrete | 200 | 180 | 33.5 | 47.8 |
| RS20 | 195 | 120 | 30.9 | 40.6 |
| RS40 | 90 | | 29.4 | 39.5 |
| RS60 | 50 | | 27.7 | 33.7 |
| RS80 | | | 26.8 | 29.7 |
| RS100 | | | 25.2 | 27.7 |

2.3 再生混凝土细集料最小粒径对水泥混凝土物理力学性能影响

将再生细集料分级为:FJ0(0~5 mm)、FJ1(0.16 mm~5 mm)、FJ2(1.18 mm~5 mm)、FJ3(2.36 mm~5 mm),并取代天然砂40% RS40作为基准混凝土配合比,分别试配混凝土,物理力学性能见表4。

表4 掺再生细集料混凝土物理力学性能

| NO. | Slump/mm | | Compressive strength/MPa | |
|-----|----------|-----|--------------------------|------|
| | Initial | 1 h | 7 d | 28 d |
| Fj0 | 90 | | 29.4 | 39.5 |
| Fj1 | 120 | | 31.8 | 41.6 |
| Fj2 | 150 | 90 | 32.7 | 43.9 |
| Fj3 | 190 | 150 | 33.1 | 47.1 |

由表4中实验结果可知,在再生细集料取代量一定前提下,随着再生细集料的最小粒径减小,水泥混凝土的坍落度逐渐下降,主要原因在于再生混凝土细集料吸水率随最小粒径减小而增加,其中Fj0时初始坍落度仅为90 mm,而Fj3的初始坍落度为190 mm,两者相差100 mm,这就可以充分说明再生细集料的吸水率大主要是由粒径小于2.36 mm的颗粒所造成的。

此外从抗压强度测试结果还可以知道,再生细集料的最小粒径对混凝土强度影响非常大,随再生细集料最小粒径减小,混凝土7 d和28 d抗压强度均逐渐降低。当再生细集料颗粒尺寸从2.36~5 mm变为0~5 mm,混凝土28 d抗压强度从47.1 MPa降低至39.5 MPa,下降了20%左右。这可能是由于再生细集料最小粒径减小,再生细集料中废弃水泥混凝土粉料增加,表面积增大,从而使再生细集料缺陷和需水量增加所造成的。

2.4 再生混凝土细集料对混凝土气体渗透性能的影响

采用0~5 mm再生细集料配制的混凝土的气渗试验结果见表5。

表5 掺再生细集料混凝土的气渗试验结果

| NO. | Amount of fine recycled aggregate /% | Gas permeation coefficient / $\times 10^{-16} \text{ m}^2$ |
|------|--------------------------------------|--|
| RS0 | 0 | 10.61 |
| RS20 | 20 | 10.02 |
| RS40 | 40 | 17.85 |
| RS60 | 60 | 20.62 |

与天然细集料相比,再生细集料不仅表面粗糙、棱角较多,并且还含有相当数量的水泥砂浆(水泥砂浆孔隙率大、表面积增大、吸水率高),因此掺再生细集料混凝土孔隙率较大,集料—浆体界面结构更为复杂,界面增多。而混凝土中水泥浆体与集料间的界面区是其最薄弱的1个环节,常常成为侵蚀离子的渗透通道,从而导致混凝土材料耐久性降低。

从表5实验结果可以看出,随着再生细集料掺量的增加,再生混凝土的气渗系数增加,抗气渗性能变差。例如,不加再生细集料的混凝土(RS0)的气渗系数为 $10.6 \times 10^{-16} \text{ m}^2$,而加入60%再生细集料的

混凝土(RS60)的气渗系数达到 $20.3 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, 气渗系数增加了近 1 倍, 抗气渗性能大幅度下降. 产生上述现象的主要原因是: 由于再生细集料孔隙率高和粉料多, 表面积大, 吸水率也大, 因此随着再生细集料掺量的增加, 再生细集料混凝土的孔隙率相应变大, 界面增多, 从而导致掺再生细集料混凝土的抗气渗性能下降.

2.5 再生混凝土细集料对混凝土抗氯离子渗透性能影响

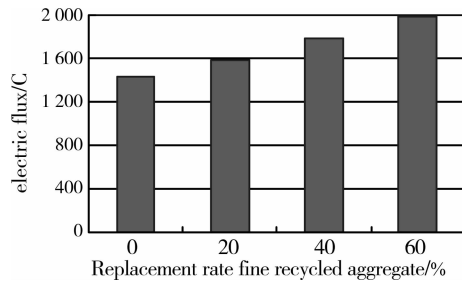


图 2 再生细集料对混凝土氯离子渗透性的影响

再生细集料对混凝土的氯离子渗透性影响试验结果如图 2 所示. 从图中可以看出, 随着再生细集料掺量的增加, 混凝土的通过电量增加, 混凝土抗氯离子渗透性能变差. 由实验结果可知, 不加再生细集料的混凝土(RS0)的通电量为 1432.8 C, 而加入 60% 再生细集料的混凝土(RS60)的电量达到 1984C, 电量增加了近 40%, 抗氯离子渗透性能大幅度下降. 产生上述现象的主要原因是: 由于再生细集料孔隙率高、缺陷多、吸水率大, 因此随着再生细集料掺量的增加, 混凝土的孔隙率相应变大, 界面增多, 与迁移有关的性能均变差, 从而造成掺再生细集料混凝土的抗氯离子渗透性能下降.

2.6 再生混凝土细集料对混凝土抗碳化性能的影响

表 6 所示再生细集料对混凝土抗碳化性能的影响

表 6 掺再生细集料混凝土的碳化试验结果

| NO. | Amount of fine recycled aggregate/% | Carbonation depth /mm | | | |
|------|-------------------------------------|-----------------------|-----|------|------|
| | | 3 d | 7 d | 14 d | 28 d |
| RS0 | 0 | 0.5 | 1.4 | 3.1 | 3.7 |
| RS20 | 20 | 1.1 | 2.1 | 3.6 | 3.9 |
| RS40 | 40 | 1.4 | 2.8 | 4.1 | 4.7 |
| RS60 | 60 | 1.9 | 3.7 | 5.9 | 6.4 |

从表中可以看出, 同气渗试验结果一样, 随着再生细集料掺量的增加, 混凝土在各个龄期内的碳化深度均有不同程度的增大, 即混凝土的抗碳化能力下降. 再生细集料掺量为 60% 时, 再生混凝土(RS60)的碳化深度最大, 28 d 达到了 6.4 mm, 远远高于基准混凝土(RS0)的 28 d 碳化深度 3.7 mm. 此现象产生的原因是再生细集料的孔隙率高、缺陷多,

由此制得的混凝土的孔隙率也高, 抗渗性差之故.

另外, 与普通混凝土一样, 各种掺量再生细集料配制的混凝土碳化速度随着碳化时间的延长均逐渐减小. 在碳化初期, 再生细集料混凝土内部可供碳化反应的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 充足, 当 CO_2 渗透至混凝土内部, 便会和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生化学反应, 此时, 碳化速度取决于 CO_2 在混凝土内部的渗透能力, 碳化反应剧烈. 随着碳化反应的不断进行, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 不断被消耗, CO_2 渗透至混凝土后, 能与之发生反应的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 不断减少, 化学反应速度降低. 此外当再生细集料混凝土发生碳化反应后, 生成的 CaCO_3 填充于空隙内, 使得完全碳化区内的孔隙率减少, CO_2 扩散能力减少, 也促使碳化反应速度降低. 当然, 随着时间的延长, 掺再生细集料混凝土内部的水化不断进行, 混凝土的内部结构随之得到改善, 也在一定程度上抑制了碳化反应的进行.

3 结 论

1) 再生细集料混凝土的工作性能和力学性能随再生细集料最小粒径尺寸减小而迅速劣化, 再生细集料的最小粒径越小, 其配制的混凝土坍落度越小, 强度越低.

2) 再生细集料的掺入会导致混凝土工作性变差, 同时经时坍落度损失较大, 随再生细集料掺量增加和最小粒径减小, 混凝土坍落度变小和经时坍落度损失更加明显.

3) 再生细集料的孔隙率较高, 在破碎制备过程中产生了大量缺陷, 因此掺再生细集料混凝土抗压强度、抗氯离子渗透性能和抗碳化能力均较基准混凝土差.

参考文献:

- [1] 李秋义, 李云霞, 姜玉丹. 再生细骨料质量标准及检验方法的研究[J]. 青岛理工大学学报, 2005, 26(5): 6-9. LI QIU-YI, LI YUN-XIA, JIANG YU-DAN. On the quality criterion and test measure of the recycled fine aggregate [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2005, 26(5): 6-9.
- [2] 程海丽. 废混凝土粉在建筑砂浆中的应用研究[J]. 再生资源研究, 2004, (4): 19-22. CHENG HAI-LI. Applicable research about recycled concrete powder using in cement mortar[J]. Renewable Resources Research, 2004, (4): 19-22.
- [3] 孙家瑛. 再生混凝土集料用于水泥稳定碎石研究与应用[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(5): 581-584.

(下转第 152 页)

- geopolymer cementitious material [J]. Cement Engineering, 2008(2):6-9.
- [21] 付兴华,陶文宏,孙凤金,等.地聚物凝胶材料性能与聚合机理的研究[J].硅酸盐通报,2008,27(4):730-735.
FU XING-HUA, TAO WEN-HONG, SUN FENG-JIN, et al. Studies on properties and mechanisms of geopolymer cementitious material[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2008, 27(4):730-735.
- [22] 潘志华,杨南如.碱-矿渣-赤泥水泥的研究[J].硅酸盐通报,1999,(3):34-39.
PAN ZHI-HUA, YANG NAN-RU. Study on alkali-slag-red clay cement [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 1999, (3):34-39.
- [23] SHI C J, DAY R L. Some factors affecting early hydration of alkali-slag cements[J]. Cem. Concr. Res, 1996, 26(3): 439-447.
- [24] SHI C J, DAY R L. Selectivity of alkaline activators for the activation of slags[J]. Cem. Concr. Aggreg, 1996, 18(1): 439-447.
- [25] GONG C M, YANG N R. Effect of phosphate on the hydration of alkali-activated red mud-slag cementitious material[J]. Cem. Concr. Res, 2000, 30(7): 1013-1016.
- [26] BROUGH A R, ATKINSON A. Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars Part I. Strength, hydration and microstructure [J]. Cem. Concr. Res, 2002, 32(6):865-879.
- [27] FEMÁNDEZ-JIMÉNEZ A. Effect of activator mix on the hydration and strength behaviour of alkali-activated slag cements[J]. Advances in Cement Research, 2003, 15(3): 129-136.

(编辑 胡英奎)

(上接第 146 页)

- SUN JIA-YING. Research and application of recycled concrete aggregate for cement stabilized gravel [J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(5):581-584.
- [4] 潘昕. 废弃混凝土用作再生细集料研究[J]. 福建建筑, 2008, (7):121-122.
PAN XIN. Studied on waste concrete used as fine recycled aggregate [J]. Fujian Architecture & Construction, 2008(7):121-122.
- [5] 张虹,熊学忠. 废弃混凝土再生骨料特性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(3):64-66.
ZHANG HONG, XIONG XUE-ZHONG. Properties of recycled aggregate made by scrap concrete debris[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(3):64-66.
- [6] 陈云钢. 再生混凝土界面强化试验的微观机理研究[J]. 混凝土, 2007(11):53-57.
CHEN YUN-GANG. Microscopic mechanism research analysis about strengthening methods of interfacial zone in recycled-aggregate concrete[J]. Concrete, 2007(11): 53-57.
- [7] ILKER B T, SEI IM S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34:1307-1312.
- [8] TU TSUNG-YUEH, CHEN YUEN-YUEN, HWANG CHAO-LU NG. Properties of HPC with recycled aggregates[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36: 943-950.
- [9] LIN Y H, TYAN Y Y, CHANG T P, et al. An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(8):1373-1380.
- [10] 陈云钢,孙振平,肖建庄. 再生混凝土界面结构特点及其改善措施混凝土[J]. 混凝土, 2004, 2(172):10-13.
CHEN YUN-GANG, SUN ZHEN-PING, XIAO JIAN-ZHUANG. Characteristics and strengthening methods of interfacial zone between aggregate and cement paste in recycled aggregate concrete[J]. Concrete, 2004, 2(172):10-13.
- [11] RINGOT E, BASCOUL A. About the analysis of Micro cracking in concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2001, 23:261-266.
- [12] EVANGELISTA L, BRITO J DE. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregate[J]. Cement and Concrete Composites, 2007, 29: 397-401.
- [13] OTSUKI N, MIYAZATO S, YO W. Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2003, 9/10:443-451.
- [14] 孙家瑛,蒋华钦. 再生粗骨料特性及对混凝土性能的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2009, 36(1):30-32.
SUN JIA-YING, JIANG HUA-QIN. Study on properties of reclaimed coarse aggregate and its influence on properties of concrete[J]. New Building Materials, 2009, 36(1):30-32.

(编辑 胡玲)