

# Research on the Influence of Amount of Fly Ash and Recycled Coarse Aggregate to the Performance of Recycled Concrete

Jiacheng Li, Dezhi Wang, Yuchuan Feng

School of Civil and Water Conservancy Engineering, Ningxia University, Yinchuan Ningxia  
Email: 497073316@qq.com

Received: Aug. 15<sup>th</sup>, 2019; accepted: Aug. 30<sup>th</sup>, 2019; published: Sep. 6<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

The effects of two kinds of recycled coarse aggregate replacement rates (80% and 100%) and three fly ash additions (0%, 15% and 30%) on the compressive strength and frost resistance to recycled concrete were researched and tested its compressive strength and mass loss rate. Simultaneously, the microstructure of the recycled concrete was tested by XRD. The results indicated that: 1) The compressive strength of recycled concrete showed a trend of increasing first and then decreasing with the raise of fly ash amount. When the fly ash content was 15% and the recycled coarse aggregate replacement rate was 80%, the 28-day compressive strength of specimens highest. 2) After 75 freeze-thaw cycles, the mass loss rate of all specimens was less than 5%. When the fly ash amount and the recycled coarse aggregate substitution rate were 15% and 100%, the mass loss rate of specimens was the lowest. 3) The increase in recycled coarse aggregate resulted in a raise in the internal structural defects of recycled concrete, and an appropriate amount of fly ash can effectively improve these defects.

## Keywords

Recycled Coarse Aggregate, Fly Ash, Compressive Strength, Frost Resistance, XRD

# 粉煤灰和再生粗骨料掺量对再生混凝土性能的影响研究

李嘉诚, 王德志, 冯玉钊

宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川  
Email: 497073316@qq.com

## 摘要

研究了两种再生粗骨料取代率(80%和100%)，三种粉煤灰掺量(0%，15%和30%)对再生混凝土抗压强度和抗冻性能的影响，测试了其抗压强度和质量损失率，并且通过XRD对其微观结构进行了试验分析。试验结果表明：1) 再生混凝土的抗压强度随粉煤灰掺量的增加呈现出先增后减的趋势，粉煤灰掺量为15%，再生粗骨料取代率为80%时，试件的28天抗压强度最高；2) 75次冻融循环后，所有试件的质量损失率均小于5%，粉煤灰掺量和再生粗骨料取代率为15%和100%时，试件质量损失率最低；3) 再生粗骨料的增多会导致再生混凝土内部结构缺陷的增多，而适量的粉煤灰可以有效改善这些缺陷。

## 关键词

再生粗骨料，粉煤灰，抗压强度，抗冻性能，XRD

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在过去的几十年里，随着社会经济的发展和人们生活水平的逐渐提高，各种新型建筑物如雨后春笋般拔地而起，这导致了砂、石等天然骨料的迅速枯竭。同时，旧建筑的拆迁改造产生了大量的建筑垃圾，而我国对于建筑垃圾普遍采取露天堆放或填埋处理，造成了严重的环境污染和资源浪费，给社会和环境带来了很大压力[1] [2] [3] [4]。将废弃混凝土块经过破碎、清洗、筛分后，按照一定比例混合而成骨料，用以部分或全部取代天然骨料配制而成的混凝土称为再生骨料混凝土(Recycled aggregate concrete, RAC) [5]，再生混凝土技术的研发与推广既能改善日益恶化的生态环境，又能缓解天然骨料日趋匮乏的压力。另外，随着电力工业的发展，我国的粉煤灰排放量也逐年增加，是我国当前主要的工业废料之一。将粉煤灰回收利用，如作为混凝土的矿物掺合料取代水泥，不仅能节约成本，减少生产水泥对环境所造成的污染，还能改善混凝土的整体性能。因此可见，废弃混凝土和粉煤灰的循环再生利用具有显著的社会效益、环境效益和经济效益，是解决建筑垃圾和工业废料问题的有效途径[6] [7] [8] [9] [10]。

再生骨料因其吸水性高，强度低等特点[11] [12] [13]导致再生混凝土存在一些性能上的缺陷，因此很多学者就粉煤灰对再生混凝土的改善作用进行了相关研究。Sumer M [14]研究发现，粉煤灰能够提高再生混凝土的抗压强度。王晨霞[15]的试验结果表明，再生混凝土的抗压强度随着粉煤灰掺量的增加呈先增大后降低的趋势，并且粉煤灰掺量为15%时抗压强度达到最大。Rafat Siddique 和 Nonavinakere [16] [17]通过研究发现，掺加粉煤灰的再生混凝土早期强度较低，但其后期强度有较大的提升。胡琼等[18]从微观层面分析了再生混凝土的界面结构，发现粉煤灰能有效地填充再生混凝土中的孔隙和裂缝，改善其均质性和密实性。然而，汤文秀[19]的研究却表明，再生混凝土抗压强度随粉煤灰掺量的增加而减小。

再生粗骨料和粉煤灰对再生混凝土抗冻性能的机制尚不清楚, 一般而言, 随着再生粗骨料取代率的增加, 再生混凝土的抗冻性变差[20]。然而 Kolay P K 等[21]的研究却表明, 再生混凝土的抗冻性能要优于普通混凝土。Hansen [22]和 Li X [23]的试验结果表明, 相对于力学性能, 再生粗骨料对再生混凝土抗冻性能的影响更大。谢静静等[24]通过试验研究发现, 再生粗骨料掺量为 50% 的试样在 75 次冻融循环后的冻融损伤最轻微。本文通过试验, 研究了不同掺量的再生粗骨料和粉煤灰对再生混凝土抗压强度和抗冻性能的影响, 以便为掺粉煤灰的再生混凝土在实际工程的设计和应用提供依据。

## 2. 试验概况

### 2.1. 原材料

水泥: 宁夏赛马牌 32.5 级普通硅酸盐水泥; 天然粗骨料: 粒级为 5~10 mm 的普通碎石, 天然细骨料: 粒级为 0.16~4.75 mm 的天然河砂; 再生粗骨料: 由废弃混凝土经颚式破碎机破碎后筛分所得, 粒径为 5~10 mm; 粉煤灰: 宁夏区宝德电力投资集团公司生产的 II 级灰; 减水剂: 萘系高效减水剂; 水: 实验室自来水。骨料的主要性能指标见表 1 和表 2。

**Table 1.** Physical characteristics of natural aggregate

**表 1.** 天然骨料的物理性能

骨料种类	紧密堆积密度/kg·m <sup>-3</sup>	松散堆积密度/kg·m <sup>-3</sup>	表观密度/MPa	筒压强度/MPa	细度模数	吸水率/%
碎石	1392	1263	2563	6.46	2.72	12.6
天然河砂	1540	1455	2527	5.23	—	1.42

**Table 2.** Physical characteristics of recycled aggregate

**表 2.** 再生骨料的物理性能

骨料种类	堆积密度/kg·m <sup>-3</sup>	表观密度/kg·m <sup>-3</sup>	含泥量/%	筒压强度/MPa	吸水率/%
再生粗骨料	1345	2582	0.30	5.28	6.62

### 2.2. 配合比设计

本文以再生粗骨料取代率和粉煤灰掺量为变量共设计了 6 种配合比, 预制备设计强度为 C20 的再生混凝土, 其中再生粗骨料取代率为 80% 和 100%; 粉煤灰掺量为 0%, 15% 和 30%。胶凝材料总用量恒定为 450 kg/m<sup>3</sup>, 水胶比为 0.4, 砂率为 34%。具体配合比见表 3。

**Table 3.** Mix proportions of recycled concrete (kg·m<sup>-3</sup>)

**表 3.** 再生混凝土配合比(kg·m<sup>-3</sup>)

编号	水泥	粉煤灰	再生粗骨料	碎石	天然河砂	用水量
RA100FA0	450	0	1201	0	619	180
RA80FA0	450	0	961	240	619	180
RA100FA15	382	68	1201	0	619	180
RA80FA15	382	68	961	240	619	180
RA100FA30	315	136	1201	0	619	180
RA80FA30	315	136	961	240	619	180

注: “RA”代表再生粗骨料取代率; “FA”代表粉煤灰掺量, 例如“RA100FA0”代表再生粗骨料取代率为 100%, 粉煤灰掺量为 0%。

### 2.3. 试验方法

#### 2.3.1. 抗压强度试验

再生混凝土抗压强度试验根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2002), 混凝土试件在宁夏大学试验室制作完成, 试件为  $100 \times 100 \times 100$  mm 的立方体试件, 每组 3 块, 在标准养护条件下养护 28 天后取出, 然后在微机伺服万能试验机进行抗压强度试验, 加载速度  $0.3 \sim 0.5$  MPa/s, 记录试件破坏时的载荷并经标准换算得到试验结果。

#### 2.3.2. 抗冻性能试验

再生混凝土抗冻性试验参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082-2009)进行, 采用快速冻融法。试件为  $100 \times 100 \times 400$  mm 的棱柱体试件, 每组 3 块; 每进行 25 次冻融循环后测取试件的饱和面干质量, 然后绘制质量损失率与冻融循环次数的关系曲线进行分析。当质量损失率超过 5% 时, 即认为试件已发生冻融破坏[25]。

## 3. 试验结果与分析

### 3.1. 抗压强度

粉煤灰掺量对再生混凝土不同龄期抗压强度的影响如图 1 所示。从图可以看出, 未掺粉煤灰的试件达到了较高的早期强度, RA80FA0 和 RA100FA0 的 7 天抗压强度为 25.1 MPa 和 23.5 MPa, 高于所有具有掺了粉煤灰的试样; 当粉煤灰掺量为 30% 时, 试件的抗压强度仅为 12.1 MPa 和 14.3 MPa。RA80FA15 和 RA100FA15 的 28 天抗压强度分别达到了 31.7 MPa 和 30.1 MPa, 高于未掺粉煤灰的试件。这两个原因, 首先, 粉煤灰的粒径远小于水泥, 它能填充混凝土内部的孔隙和裂缝, 改善了再生混凝土的致密性, Saha A K [26] 的研究得出了相似的结论。其次, 随着养护龄期的延长, 粉煤灰的活性作用逐渐被激发, 通过与

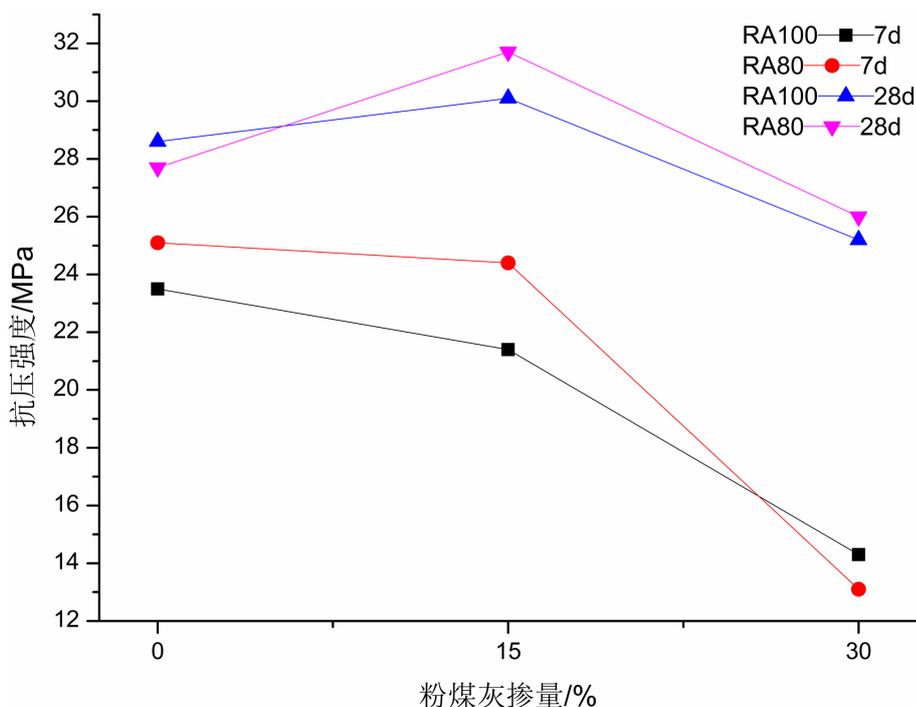


Figure 1. Effect of fly ash on compressive strength of recycled concrete at different curing ages  
图 1. 粉煤灰对再生混凝土不同养护龄期抗压强度的影响

水泥水化产物发生火山灰反应, 生成了 C-S-H(水化硅酸钙凝胶)等物质, 提高了再生混凝土界面过渡区的密实性, 所以再生混凝土的抗压强度有所增强。

但是, 无论养护时间和再生骨料掺量如何, 粉煤灰掺量为 30% 试件的抗压强度均低于粉煤灰掺量为 15% 的试件。这是因为掺入过多的粉煤灰导致混凝土中的水泥含量过低, 降低了初级水化产物氢氧化钙的产量, 从而抑制了粉煤灰火山灰反应的进行。此时, 粉煤灰效应提升的强度无法补偿由于水泥减少导致的强度降低, 最终导致了再生混凝土强度的降低。试验结果表明, 再生粗骨料掺量为 80% 和 100% 的混凝土试件强度能够达到标准要求; 在一定范围内, 再生混凝土的抗压强度随粉煤灰掺量的增加先增后减; 当粉煤灰掺量和再生粗骨料取代率分别为 15% 和 80% 时, 试件的 28 天抗压强度最高。

### 3.2. 抗冻性能

#### 质量损失率

质量损失率与冻融循环次数的关系如图 2 所示。从图可以看出, 75 次冻融循环后, 所有试件的质量损失率均小于 5%。RA80FA30 的质量损失率最高, 为 3.5%; RA100FA15 的最低, 为 0.4%。无论粉煤灰掺量如何, 再生粗骨料掺量为 100% 的试件的质量损失率总比掺量为 80% 的低。原因可能是再生混凝土内部存在较多的孔隙和裂缝, 它们在冻融循环期间吸收了足够的水分, 从而抵消了试件表面混凝土剥落所造成的质量损失。此外, 当再生骨料掺量一定时, 粉煤灰掺量为 15% 的试件质量损失率最低, 而粉煤灰掺量为 30% 的试件质量损失率最高。试验结果表明, 15% 的粉煤灰对再生混凝土的抗冻性能有一定的改善作用; 再生粗骨料掺量为 100% 时试件的质量损失率相对较低, 但在一定程度上是受其高吸水性的影响, 因此, 应再生混凝土的抗冻性能应通过质量损失率和相对动弹性模量两个指标来一起衡量。

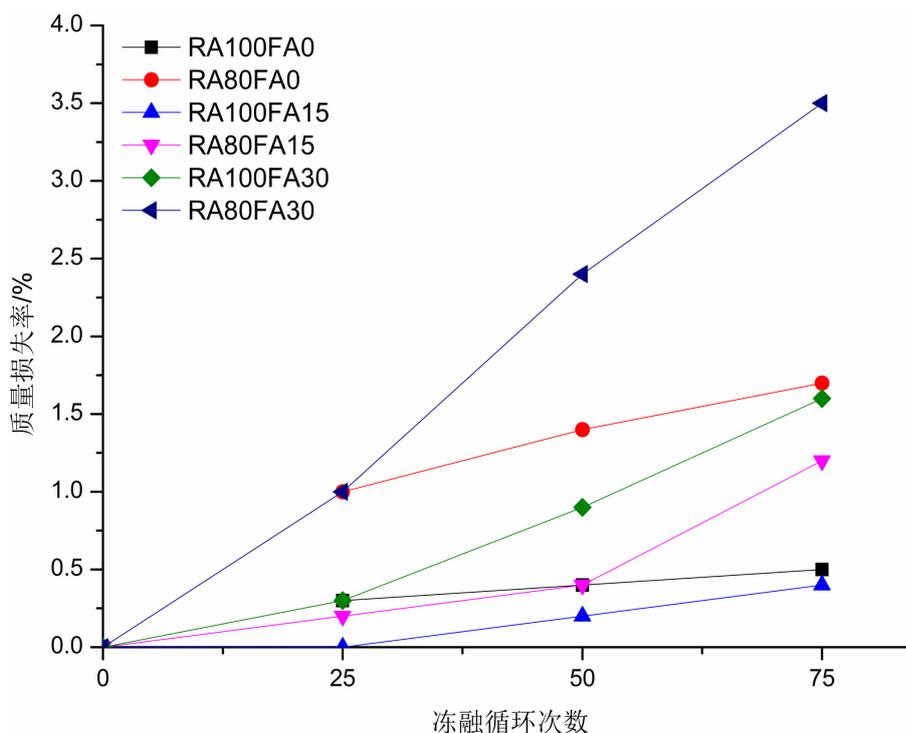


Figure 2. Relationship between mass loss rate and number of freeze-thaw cycles

图 2. 质量损失率与冻融循环次数的关系

### 3.3. XRD

再生混凝土水化产物的种类和数量对其性能有很大影响, 本文对再生混凝土样品进行了 X 射线衍射试验, 衍射图如图 3 所示, 其中 C 代表  $\text{CaCO}_3$ , Q 代表  $\text{SiO}_2$ , P 代表  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , A 代表 C-S-H, E 代表钙矾石(Erringite)。

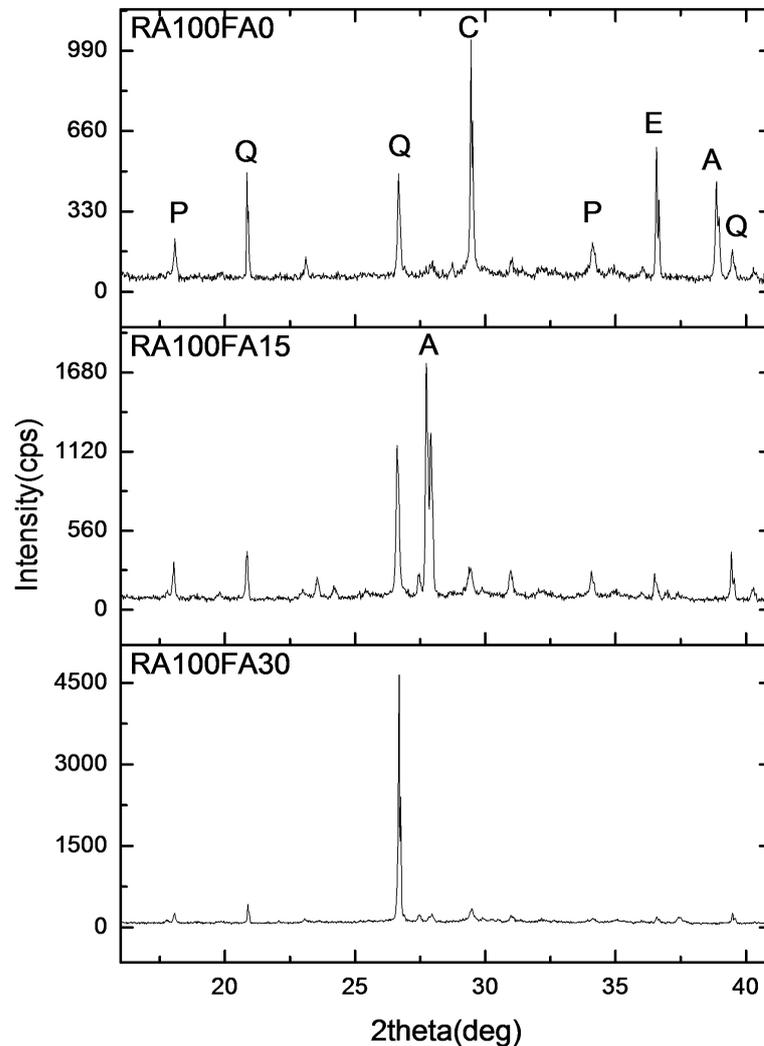


Figure 3. XRD image of recycled concrete

图 3. 再生混凝土的 XRD 图

从衍射图可以看出, RA100FA0 碳酸钙的衍射峰值比其它物质更高, 这是因为大量的再生粗骨料导致了试件的孔洞和裂缝增多, 更多的空气与其接触从而导致了碳化反应产物的增多。而另外两种试件的碳酸钙衍射峰值都较低, 原因是粉煤灰本身和它通过火山灰反应产生的胶凝物质有效填充了这些孔洞和裂缝, 在一定程度上抑制了碳化反应的发生。RA100FA15 的 C-S-H 具有高衍射峰值, 因为粉煤灰在养护后期会继续与水泥的水化产物反应形成 C-S-H 凝胶, 这也解释了 FA15 系列试件 28 天强度较高的原因。从图(c)可以看出, RA100FA30 的  $\text{SiO}_2$  衍射峰值最高, 远高于图(a)和图(b), 而其它物质的衍射峰值很低, 因为  $\text{SiO}_2$  是粉煤灰的主要成分之一, 这也表明过量的粉煤灰会抑制再生混凝土水化反应的进行, 从而导致强度和耐久性降低。

通过对再生混凝土试样的微观分析可以发现,再生粗骨料掺量的增大会使再生混凝土内部的孔洞和裂缝变多,这会导致其内部的结构缺陷也增多。适量的粉煤灰能有效改善再生混凝土的界面过渡区结构。

#### 4. 结论

本文研究了粉煤灰和再生骨料对再生骨料混凝土抗压强度和抗冻性能的影响,并得出以下结论:

1) 粉煤灰对再生混凝土的早期强度有不利影响,但对其后期强度有增强作用。在一定的范围内,再生混凝土的抗压强度随粉煤灰掺量的增加呈现出先增后减的趋势,当粉煤灰掺量为 15%,再生粗骨料取代率为 80%时,试件的 28 天抗压强度最高。

2) 经过 75 次冻融循环后,所有试件的质量损失率均小于 5%,符合防冻标准。15%的粉煤灰能有效改善再生混凝土的抗冻性能,并且,再生混凝土的抗冻性能应结合质量损失率和相对动弹性模量两个指标来评估。

3) 再生混凝土的 XRD 图像表明,再生粗骨料掺量的增大是导致再生混凝土内部结构缺陷增多的主要原因,而适量的粉煤灰能有效改善再生混凝土的界面过渡区结构。

试验研究结果表明,在配合比合适的情况下,掺量为 80%和 100%的再生粗骨料可以用来制备抗压强度和抗冻性能合格的再生混凝土,并且掺量为 15%的粉煤灰对再生混凝土的抗压强度和抗冻性能都有一定的改善作用。

#### 参考文献

- [1] Hansen, T.C. (1986) Recycled Aggregates and Recycled Aggregate Concrete Second State-of-the-Art Report Developments 1945-1985. *Materials and Structures*, **19**, 201-246. <https://doi.org/10.1007/BF02472036>
- [2] 吴从亮,高燕,谢国栋.再生粗骨料的研究与应用概述[J].混凝土世界,2017(11):54-57.
- [3] 范小平.废弃混凝土再生利用技术及其研究现状[J].建筑技术开发,2013,40(5):88-90.
- [4] 周宏敏,柴俊,柴华,等.再生骨料混凝土技术及其研究现状[J].混凝土,2008,30(12):75-76.
- [5] 肖建庄.再生混凝土[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [6] 王军强,陈年和,蒲琪.再生混凝土强度和耐久性能试验[J].混凝土,2007(5):53-56.
- [7] 唐春平,廖亮.绿色再生混凝土利用途径与评定思路[J].山西建筑,2004,30(22):83-84.
- [8] 史美东.绿色混凝土的发展与应用[J].特种结构,2004,21(4):80-82.
- [9] 徐卓,龙帮云.开发利用再生混凝土走可持续发展的道路[J].中外建筑,2004(2):197-199.
- [10] 周万良,龙靖华,詹炳根.熟料-无水石膏系统与粉煤灰-石灰-无水石膏系统的水化物[J].硅酸盐通报,2009,28(3):558-562.
- [11] 李金玉,彭小平,邓正刚,等.混凝土抗冻性的量化设计[J].混凝土,2000(9):61-65.
- [12] Tabsh, S.W. and Abdelfatah, A.S. (2009) Influence of Recycled Concrete Aggregates on Strength Properties of Concrete. *Construction & Building Materials*, **23**, 1163-1167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.06.007>
- [13] Limbachiya, M.C., Leelawat, T. and Dhir, R.K. (2000) Use of Recycled Concrete Aggregate in High-Strength Concrete. *Materials and Structures*, **33**, 574-580. <https://doi.org/10.1007/BF02480538>
- [14] Sumer, M. (2012) Compressive Strength and Sulfate Resistance Properties of Concretes Containing Class F and Class C Fly Ashes. *Construction & Building Materials*, **34**, 531-536. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.023>
- [15] 王晨霞,张杰,曹芙蓉.粉煤灰掺量对再生混凝土力学性能和抗冻性的影响研究[J].硅酸盐通报,2017,36(11):3778-3783+3809.
- [16] Siddique, R. (2004) Performance Characteristics of High-Volume Class F Fly Ash Concrete. *Cement & Concrete Research*, **34**, 487-493. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.09.002>
- [17] Nonavinakere, S. and Reed, B.E. (1995) Fly Ash Enhanced Metal Removal Process. In: Sengupta, A.K., Ed., *Hazardous and Industrial Wastes, Proceedings of the 27th Mid-Atlantic Industrial Waste Conference*, Technomart Publishing, Sydney, 588-594.
- [18] 胡琼,宋灿,邹超英.再生混凝土力学性能试验[J].哈尔滨工业大学报,2009,41(4):33-36.

- [19] 汤文秀. 再生混凝土的力学性能及微观形貌分析[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- [20] 伍君勇, 朱平华. 再生混凝土抗冻性研究进展[J]. 混凝土, 2013(4): 15-19.
- [21] Kolay, P.K., Sulaiman, S., Kumar, S., *et al.* (2017) Freeze-Thaw Durability of Air-Entrained Concrete Incorporating Natural and Recycled Concrete Aggregate Mixtures. In: *International Congress and Exhibition Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology*, Springer, Cham, 185-196.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-61633-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-61633-9_11)
- [22] Hansen, T.C. and Narud, H. (1983) Strength of Recycled Concrete Made from Crushed Concrete Coarse Aggregate. *Concrete International*, **5**, 79-83.
- [23] Li, X. (2008) Recycling and Reuse of Waste Concrete in China: Part I. Material Behaviour of Recycled Aggregate Concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, **53**, 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.09.006>
- [24] 谢静静, 朱平华. 基于抗冻性的混凝土再生粗骨料最优取代率试验研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(2): 35-38.
- [25] 崔正龙, 北迁政文, 田中礼治. 再生混凝土的冻融循环试验研究[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(5): 534-537.
- [26] Saha, A.K. and Sarker, P.K. (2017) Sustainable Use of Ferronickel Slag Fine Aggregate and Fly Ash in Structural Concrete: Mechanical Properties and Leaching Study. *Journal of Cleaner Production*, **162**, 438-448.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.035>