

文章编号:1673-2049(2015)01-0021-06

再生混凝土长龄期强度与收缩徐变性能

肖建庄¹, 郑世同¹, 王 静²

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 上海城建(集团)公司, 上海 200232)

摘要:通过改变再生粗骨料取代率,并考虑引气剂的影响,对再生混凝土长龄期下的立方体抗压强度和收缩性能进行试验;采用不同的加载龄期,对再生粗骨料取代率为 50% 的再生混凝土徐变性能进行试验研究;建立了再生混凝土长龄期强度推算公式。结果表明:长龄期下再生混凝土的立方体抗压强度变化规律与普通混凝土基本一致,28 d 龄期再生混凝土的立方体抗压强度随再生粗骨料取代率的增加而降低;再生混凝土的收缩随再生粗骨料取代率的增加而增加,添加粉煤灰、矿粉等矿物外掺料可以使再生混凝土收缩降低;加载龄期对于再生混凝土徐变值有影响,加载龄期越早,再生混凝土徐变值越大;利用所建立的强度推算公式计算得到的强度值与试验结果比较吻合,并且优于欧洲 CEB-FIP Model Code 1990 规范建议公式的计算结果。

关键词:再生混凝土;引气剂;矿物外掺料;长龄期强度;收缩徐变;拟合曲线

中图分类号:TU528.79

文献标志码:A

Long-term Strength, Shrinkage and Creep Properties of Recycled Aggregate Concrete

XIAO Jian-zhuang¹, ZHENG Shi-tong¹, WANG Jing²

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Urban Construction Group, Shanghai 200232, China)

Abstract: The effects of the recycled coarse aggregate(RCA)replacement ratio and air-entraining agent on cube compressive strength and shrinkage of recycled aggregate concrete(RAC) were experimentally investigated. The creep of RAC with 50% RCA replacement ratio was also studied by varying the loading time. Meanwhile, the calculation formula for the compressive strength of RAC at various ages was established. The experimental results reveal that the long-term strength increasing rule of RAC is similar to that of natural aggregate concrete. The cube compressive strength of RAC at 28 d reduces whereas the shrinkage increases with the increase of RCA replacement ratio. In addition, adding reasonable amount of slag and fly ash can reduce the shrinkage of RAC. The loading time has an effect on the creep of RAC as the creep is greater when the specimens are loaded at an earlier age. The compressive strength values calculated by the proposed formula are in good agreement with the experiment results and more accurate than the outcomes deprived from the suggested formula in CEB-FIP Model Code 1990.

Key words: recycled aggregate concrete; air-entraining agent; mineral admixture; long-term strength; shrinkage and creep; fitted curve

收稿日期:2014-10-31

基金项目:国家自然科学基金项目(51438007);上海市科委创新行动计划项目(14231201303)

作者简介:肖建庄(1968-),男,山东沂南人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jzx@tongji.edu.cn。

0 引言

利用再生骨料作为部分或全部骨料配制的混凝土称为再生骨料混凝土(Recycled Aggregate Concrete,RAC),简称再生混凝土^[1]。再生骨料具有表观密度小、吸水率大、空隙率大等特点^[1],在等水灰比的情况下,再生混凝土的强度略低于普通混凝土^[2-3]。由于再生粗骨料的空隙率、含泥量以及骨料表面的粗糙性等因素,若要满足与普通混凝土同等的和易性要求,单位体积混凝土的水泥用量要比普通混凝土略大。添加引气剂的混凝土由于气泡增加了浆体体积,对拌合料起到润滑作用,混凝土工作性能有显著改善。杨全兵等^[4]的研究表明:在相同水灰比条件下,引气剂可以提高混凝土的流动性;在保持坍落度相同条件下,引气剂可以降低拌合用水量;引气剂还可以降低新拌混凝土的坍落度损失。杜婷等^[5]的研究表明,通过掺入粉煤灰、矿粉等微粒矿物掺料和加入高效减水剂,可以使再生混凝土获得良好的工作性能,实现高性能化。对于添加引气剂并且掺入适量粉煤灰、矿粉等矿物外掺料的再生混凝土,其工作性能以及长龄期立方体抗压强度的变化规律和收缩徐变性能中国还缺少相关的研究成果。本文针对这一问题,展开了一些试验研究。

表 2 混凝土的配合比
Tab. 2 Mix Proportions of Concrete

序号	再生粗骨料 取代率/%	水胶比	各材料用量/(kg·m ⁻³)								
			水泥	水	砂	天然粗骨料	再生粗骨料	粉煤灰	矿粉	减水剂	引气剂
1	0	0.40	170	164	817	947	0	76	160	8.0	0.08
2	50	0.40	170	164	817	474	474	76	160	8.0	0.08
3	70	0.40	170	164	817	663	284	76	160	8.0	0.08
4	100	0.40	170	164	817	0	947	76	160	8.0	0.08

1.3 试件设计

每种配合比均制作 33 个 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试块,8 个 100 mm×100 mm×300 mm 棱柱体试块。对于每组的 8 个棱柱体试块,其中 3 个试块用于测量抗压强度以确定徐变试验持荷应力,3 个试块用于徐变试验(其中对 2 个试块施加荷载,1 个试块用于收缩参照),2 个试块用于收缩试验。

1.4 试验方法

再生混凝土抗压强度试验按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)进行。收缩和徐变试验参照《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。对于徐变试验,采用自制反力架对棱柱体试件

1 试验设计

1.1 试验原材料

水泥为 PO42.5 普通硅酸盐水泥;砂为普通中砂;拌合水为自来水;天然粗骨料为天然碎石,粒径为 5~25 mm;再生粗骨料最大粒径 25 mm,连续级配。为改善再生混凝土的工作性能,混凝土拌合物中加入 S95 级矿粉、Ⅱ级粉煤灰、904-3 减水剂,引气剂为皂角素。天然粗骨料与再生粗骨料的基本性能见表 1。

表 1 粗骨料的基本性能
Tab. 1 Basic Properties of Coarse Aggregates

骨料类型	堆积密度/ (kg·m ⁻³)	表观密度/ (kg·m ⁻³)	吸水率/%	压碎指标/%
天然骨料	1 430	2 840	0.2	4.04
再生骨料	1 304	2 583	1.1	10.50

1.2 混凝土的配合比

定义再生粗骨料取代率 r 为再生混凝土中再生粗骨料与全部粗骨料的质量比。本文中共考虑了 4 种再生粗骨料取代率,即 $r=0\%,50\%,70\%,100\%$,对应的试件编号分别为 NC,RC50,RC70,RC100; $r=0\%$ 时为普通混凝土,作为基准组。混凝土的配合比设计见表 2。

进行加载,通过螺旋千斤顶施加持续荷载。拉压传感器连接标定过的应变仪用以监测持荷荷载的变化,在加载后的 7,28,60,90 d 各校核一次,如荷载变化大于 2%,应予以补足。试件左右两侧各对称固定 1 只千分表测量收缩和徐变变形,测量标距 20 cm。试验环境恒温恒湿,平均相对湿度(60±5)%,温度为(20±2)℃。试验加载及测量装置见图 1。

2 试验结果与分析

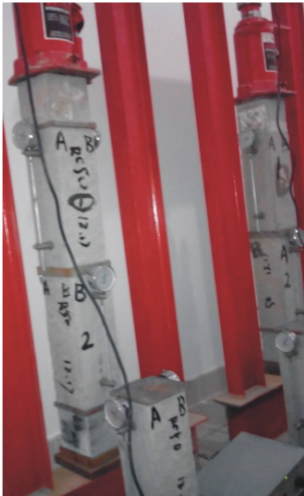
2.1 再生混凝土的抗压强度发展规律

根据本次试验目的和要求,不同试验分组的养护时间不同,分别为 3,7,14,28,45,60,90,150,180,270,360 d。试验结果见图 2。

由图 2 可以看出,长龄期下再生混凝土的立方



(a) 收缩试验装置



(b) 徐变试验装置

图 1 试验装置

Fig. 1 Testing Devices

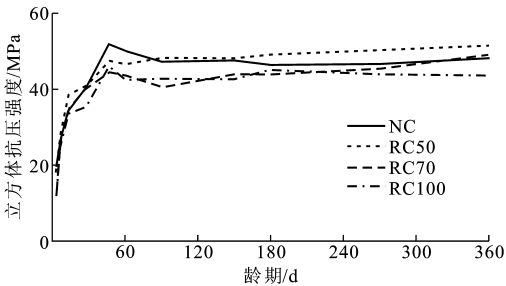


图 2 再生粗骨料取代率对再生混凝土抗压强度的影响

Fig. 2 Effects of RCA Replacement Ratios on Compressive Strength of RAC

体抗压强度变化规律与普通混凝土基本一致。28 d 龄期以前,抗压强度增长较快;28 d 龄期以后,抗压强度增长变缓;45 d 龄期时,再生粗骨料取代率为 50%,70%,100%的再生混凝土抗压强度较天然骨

料混凝土分别降低了 7.95%,13.81%,10.71%;45 d 龄期以后,抗压强度增长基本趋于稳定。180 d 龄期时,取代率为 70%,100%的再生混凝土强度分别降低了 4.67%,2.29%;270 d 龄期时,抗压强度分别降低了 2.97%,6.22%。对于再生粗骨料取代率为 50%的再生混凝土,在 90 d 龄期之前,抗压强度低于普通混凝土;在 90 d 龄期之后,出现抗压强度大于同龄期普通混凝土的变异现象,在 90,180,270,360 d 龄期时分别提高了 1.71%,6.04%,7.48%,6.97%。

将混凝土的龄期系数定义为某一龄期抗压强度与 28 d 龄期抗压强度的比值。表 3 给出了不同再生粗骨料取代率下混凝土在龄期分别为 3,7,14,28,45,61,90,150,180,270,360 d 时的龄期系数。从表 3 可以看出,在 28 d 龄期之前,普通混凝土的龄期系数比再生混凝土小;在 45 d 龄期之后,随着再生粗骨料取代率的增加,龄期系数越早趋于平缓阶段。

2.2 加引气剂再生混凝土收缩试验

试件养护 3 d 后进行收缩试验,再生粗骨料取代率为 0%,50%,100%的再生混凝土从试验开始至龄期 t 时的收缩变形如图 3 所示。

由图 3 可知:再生混凝土的收缩变形发展规律与普通混凝土比较接近;随着再生粗骨料取代率的提高,混凝土试件收缩发展加快,收缩变形增加。再生混凝土的收缩变形在 28 d 龄期之前发展较快,此后随混凝土与外界的湿度逐渐平衡而趋于平缓,90 d 龄期时试件 RC50,RC100 的收缩总变形值较试件 NC 分别增加了 6%,11%。

再生粗骨料取代率为 0%,50%,100%时混凝土的收缩率与相关研究^[6-7]的对比如图 4 所示。为了便于比较,本文的相关数据只选取了 120 d 龄期之前的试验结果。图 4 中 NC,RC50,RC100 表示本文试验结果;NC[6],RC100[6]表示文献[6]的试验结果;NC[7],RC50[7],RC100[7]表示文献[7]的试验结果。

由图 4 可知:本文试验的普通混凝土收缩率与

表 3 混凝土的龄期系数

Tab. 3 Age Coefficients of Concrete

试件编号	3 d 龄期	7 d 龄期	14 d 龄期	28 d 龄期	45 d 龄期	61 d 龄期	90 d 龄期	150 d 龄期	180 d 龄期	270 d 龄期	360 d 龄期
NC	0.48	0.65	0.85	1.00	1.28	1.24	1.17	1.18	1.14	1.16	1.19
RC50	0.44	0.69	0.94	1.00	1.16	1.14	1.17	1.18	1.20	1.23	1.26
RC70	0.34	0.69	0.87	1.00	1.11	1.08	1.01	1.09	1.10	1.13	1.22
RC100	0.34	0.70	0.95	1.00	1.30	1.20	1.21	1.22	1.28	1.24	1.23

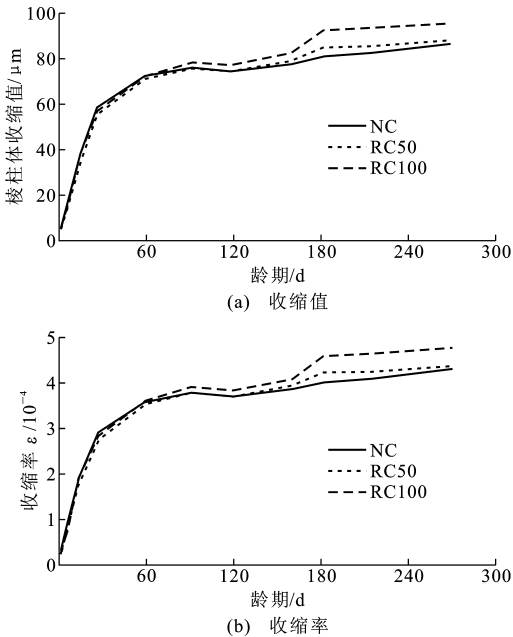


图 3 不同再生粗骨料取代率的再生混凝土收缩变形
Fig. 3 Shrinkage of RAC with Different RCA Replacement Ratios

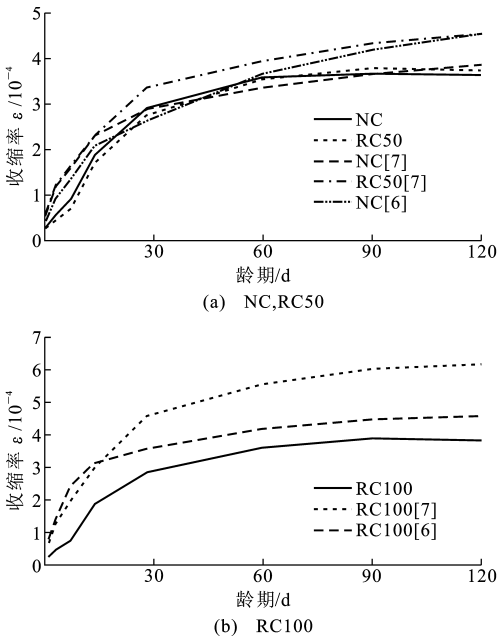


图 4 不同再生粗骨料取代率的再生混凝土收缩率对比
Fig. 4 Comparison Among Shrinkage Ratios of RAC with Different RCA Replacement Ratios

文献[6],[7]所得结果基本一致;再生粗骨料取代率为 50%时的再生混凝土收缩率略小于文献[6]的研究结果;再生粗骨料取代率为 100%时的再生混凝土收缩率与文献[6]的研究结果比较接近,但是明显小于文献[7]的研究结果。对于本次收缩率试验结果小于文献[6],[7]的研究结果,可以解释为此次试验的再生混凝土中掺入了粉煤灰,由于粉煤灰颗粒

的弹性模量明显高于水泥颗粒^[8-9],故能通过微集料效应抑制再生混凝土的收缩。同时,矿粉和粉煤灰的掺入会显著改善再生混凝土的微观结构,使水泥浆体的空隙率明显下降,强化了集料界面,提高了混凝土密实度,使得再生混凝土的收缩减小。

2.3 加引气剂再生混凝土徐变试验

图 5 为加载龄期为 7 d 和 28 d 时的试件总变形值与徐变值。从图 5 可以看出:荷载施加后开始一段时间,徐变发展得很快,随后徐变速率衰减得也快;7 d 龄期加载的再生混凝土比 28 d 加载的徐变变形更早地趋于稳定。

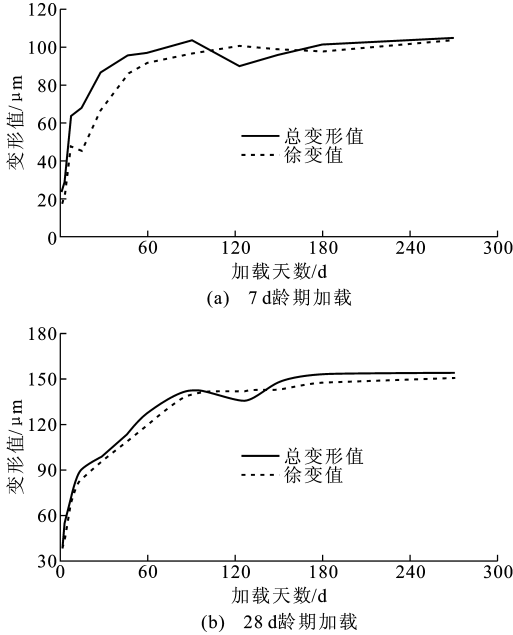


图 5 不同加载龄期下试件总变形值与徐变值
Fig. 5 Values of Total and Creep Deformations with Different Loading Ages

图 6 为加载龄期对再生混凝土徐变的影响。从图 6 可以看出:在持荷早期,7 d 龄期加载的再生混凝土徐变值比 28 d 龄期加载的徐变值小;随着加载时间的增加,7 d 龄期加载的再生混凝土徐变值比 28 d 加载的徐变值大,在持荷 90,180,270 d 时徐变系数分别增加 13.62%,8.64%,12.69%。

3 再生混凝土长龄期强度拟合公式

再生混凝土抗压强度的发展大致经历初始增长、加速增长及稳定增长 3 个阶段。由于混凝土抗压强度的增长对再生混凝土的设计和使用的至关重要,为了得到比较准确的抗压强度-龄期的数学描述,本文对试验结果进行了拟合,建立的拟合公式为

$$f_{cu}(t) = \frac{t}{0.11 + 0.002r + (0.02 + \alpha)t} \quad (1)$$

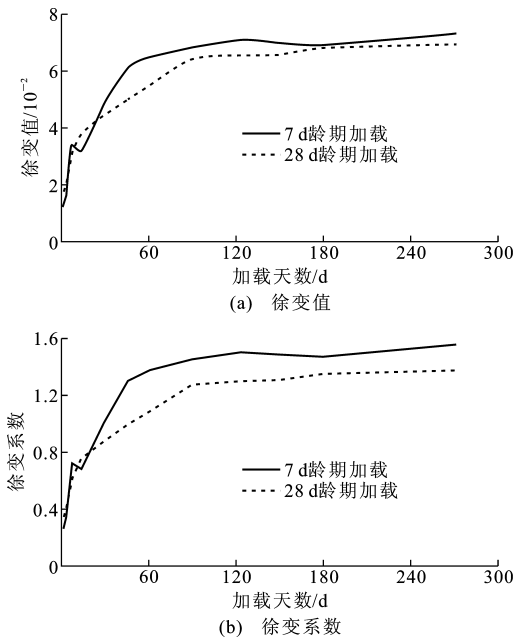


图 6 加载龄期对再生混凝土徐变的影响

Fig. 6 Effects of Loading Age on Creep of RAC

式中: $f_{cu}(t)$ 为龄期 t 时混凝土的立方体抗压强度; α 为与再生粗骨料取代率有关的系数, 当取代率不大于 50% 时 α 取 0, 当取代率为 100% 时 α 取 0.002 5, 中间按直线规律变化取值。

对于标准养护环境下的混凝土试件, 欧洲 CEB-FIP Model Code 1990 规范^[10] 给出的混凝土长龄期强度的推算公式为

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm} \quad (2)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left\{s\left[1 - \left(\frac{28}{t/t_1}\right)^{1/2}\right]\right\} \quad (3)$$

式中: $f_{cm}(t)$ 为龄期 t 时混凝土的抗压强度平均值; f_{cm} 为 28 d 龄期时混凝土的抗压强度; $\beta_{cc}(t)$ 为与龄期 t 有关的系数; t_1 为常数, 等于 1 d; s 为与水泥品种有关的系数, 对于快硬性高强水泥, s 取 0.20, 对于普通快硬性水泥, s 取 0.25, 对于缓慢硬化水泥, s 取 0.38。

根据公式(1),(2)计算得到的结果与本文试验结果的比较如图 7 所示。决定系数 R^2 用以衡量试验数据与数学模型之间拟合度的高低, 该数值越接近 1 表示拟合得越好。从图 7 可以看出: 拟合曲线的决定系数 R^2 均大于 0.91, 说明拟合结果与试验结果吻合较好。同时可以看出, 拟合公式(1)的计算结果优于 CEB-FIP Model Code 1990 规范建议公式的计算结果。

拟合公式(1)考虑了再生粗骨料取代率 r 的影响, 该公式对工程实际中再生混凝土长龄期抗压强

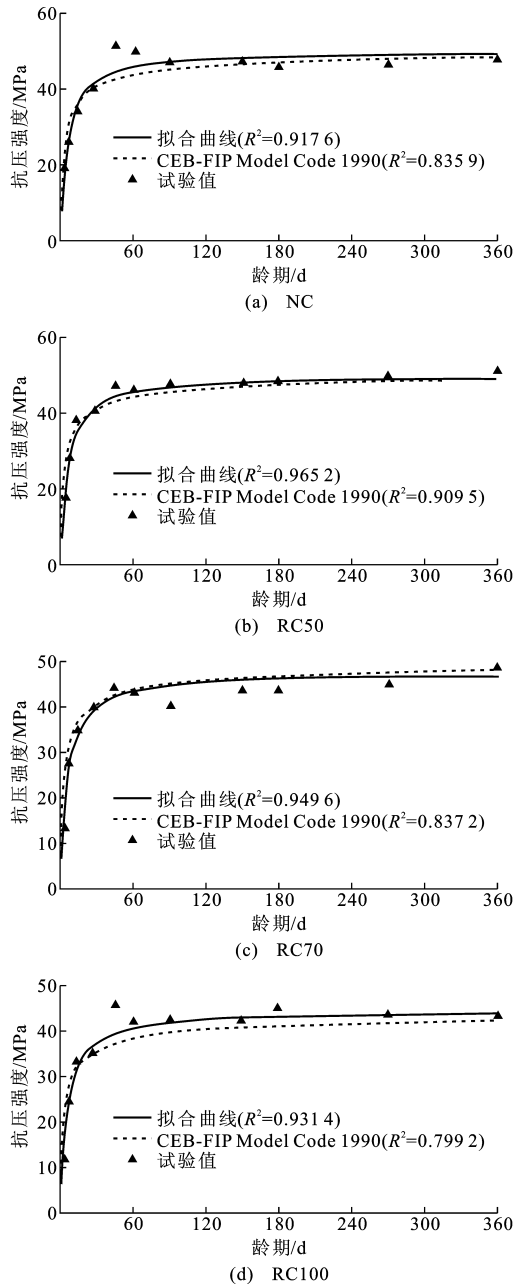


图 7 再生混凝土抗压强度与龄期的拟合关系曲线

Fig. 7 Fitted Curves of Compressive Strength-age of RAC 度的预测具有一定参考价值。

4 结 语

(1) 长龄期下再生混凝土的立方体抗压强度变化规律和普通混凝土基本一致; 45 d 龄期时, 再生粗骨料取代率为 50%, 70%, 100% 的再生混凝土抗压强度较天然骨料混凝土分别降低了 7.95%, 13.81%, 10.71%; 180 d 龄期时, 取代率为 70%, 100% 的再生混凝土强度分别降低了 4.67%, 2.29%; 在 90 d 龄期以后, 再生粗骨料取代率为 50% 的再生混凝土出现抗压强度高于同龄期普通混

凝土的变异现象。通过研究再生混凝土强度龄期系数可知,在 28 d 龄期以前,再生混凝土抗压强度的发展比普通混凝土快,超过 45 d 龄期以后,再生混凝土的抗压强度比普通混凝土更早地达到稳定。

(2)根据试验结果,考虑再生粗骨料取代率的影响,给出了再生混凝土长龄期下抗压强度的推算公式。该推算公式计算的强度值与试验结果吻合较好且优于欧洲 CEB-FIP Model Code 1990 规范的建议公式。

(3)再生混凝土收缩变形随再生粗骨料取代率的增加而增加,且随着再生粗骨料取代率的提高,收缩发展加快;再生混凝土的收缩变形在 28 d 内发展较快。与文献[6],[7]试验结果对比分析表明,本文收缩试验结果较小,说明拌合物中加入粉煤灰、矿粉的再生混凝土的工作性能得到有效改善,收缩减小。

(4)在加载早期,再生混凝土徐变发展较快,随后增长较慢;在持荷时间相同条件下,加载龄期较早时,再生混凝土徐变值偏大。

参考文献:

References:

- [1] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
XIAO Jian-zhuang. Recycled Concrete [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2008.
- [2] HANSEN T C. Recycling of Demolished Concrete and Masonry[M]. London:Spon Press,1992.
- [3] TOPCU I B,GUNEAN N F. Using Waste Concrete as Aggregate[J]. Cement and Concrete Research, 1995,25(7):1385-1390.
- [4] 杨全兵,朱蓓蓉,黄土元. 对混凝土引气剂的新认识[J]. 低温建筑技术,1998(3):33-35,50.
YANG Quan-bing, ZHU Bei-rong, HUANG Shi-yuan. New Views on Air-entraining Agents of Concrete[J]. Low Temperature Architecture Technology,1998(3):33-35,50.

- [5] 杜 婷,周玉峰,向卫平,等. 高性能再生骨料混凝土的基本性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报,2006,28(8):34-38.
DU Ting, ZHOU Yu-feng, XIANG Wei-ping, et al. Experimental Research on the Basic Behaviors of Recycled High Performance Concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(8): 34-38.
- [6] 张 建,杜 辉,张 财,等. 矿物掺和料和再生骨料对混凝土的收缩性能的影响[J]. 青岛理工大学学报,2009,30(4):145-149,153.
ZHANG Jian, DU Hui, ZHANG Cai, et al. Influence of Mineral Admixture and Recycled Aggregate on Shrinkage of Concrete[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2009, 30(4): 145-149, 153.
- [7] 肖建庄,许向东,范玉辉. 再生混凝土收缩徐变试验及徐变神经网络预测[J]. 建筑材料学报,2013,16(5):752-757.
XIAO Jian-zhuang, XU Xiang-dong, FAN Yu-hui. Shrinkage and Creep of Recycled Aggregate and Their Prediction by ANN Method [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(5): 752-757.
- [8] XIAO J Z, LI L, TAM V W Y, et al. The State-of-the-art Regarding the Long-term Properties of Recycled Aggregate Concrete[J]. Structural Concrete, 2014, 15(1):3-12.
- [9] 赵庆新,孙 伟,缪昌文. 粉煤灰掺量和水胶比对高性能混凝土徐变性能的影响及其机理[J]. 土木工程学报,2009,42(12):76-82.
ZHAO Qing-xin, SUN Wei, MIAO Chang-wen. Effect and Mechanism of Interaction Between Fly Ash Proportion and Water-binder Ratio on the Creep Characteristics of High Performance Concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(12): 76-82.
- [10] CEB Bulletin 203-205, CEB-FIP Model Code 1990 [S].