

# 高强再生混凝土干缩特性

曾力, 赵伟

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要:**研究了再生粗细骨料对混凝土干缩性能的影响, 试验结果表明, 再生骨料对混凝土的干缩影响显著, 尤其是再生细骨料。重点研究了高强再生粗骨料混凝土的干缩特性, 通过高强再生混凝土配合比优化设计, 再生粗骨料混凝土的干缩率仅稍大于天然粗骨料混凝土, 与其基本相当。在再生混凝土中掺膨胀剂具有很好的补偿收缩效果, 达到高强再生混凝土微干缩的目的。研究表明, 干燥环境养护对再生混凝土强度的影响明显大于普通混凝土, 因此, 再生混凝土更需注意保湿养护。还从界面结构和骨料特性分析了再生混凝土的干缩机理。

**关键词:** 高强混凝土; 干缩; 再生骨料; 混凝土配合比; 混凝土

**中图分类号:** TU 528.31   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1674-4764(2010)04-0125-06

## Dry Shrinkage Features of High-strength Recycled Concrete

ZENG Li, ZHAO Wei

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, P. R. China)

**Abstract:** At first, the influence of recycled coarse and fine aggregate on dry shrinkage features of concrete was studied. It is indicated that the recycled aggregate makes significant impact on dry shrinkage features of concrete, particularly the fine aggregate. Through the optimization of the mix of recycled high-strength concrete, the dry shrinkage rate of coarse aggregate concrete was only slightly larger than that of the natural one. Bulking agent used in recycled concrete could compensate the shrinkage effectively to achieve the objective of micro-shrinkage. At the same time, it is shown that the impact of conservation in dry environment on recycled concrete strength is greater than that of ordinary one. Thus, more attention should be paid to the moisture in the conservation of recycled concrete. In addition, the shrinkage mechanism of recycled concrete was analyzed from the perspectives of interface structure and aggregate features.

**Key words:** high strength concrete; dry shrinkage; recycled aggregate; concrete mix proportion; concrete

再生混凝土是指将废弃混凝土经清洗、破碎、筛分后制成混凝土骨料, 部分或全部代替天然骨料配制的新混凝土<sup>[1-2]</sup>。影响再生混凝土干缩的因素除与普通混凝土一样主要是水泥品种、掺合料、配合比、外加剂及养护条件等外, 还与再生骨料特性密切相关<sup>[3-4]</sup>。由于再生骨料含有一部分老水泥砂浆, 其

表面的孔隙特征和吸水特性等性质与天然骨料存在很大差异, 导致中低强度的再生混凝土的干缩率比普通混凝土大的多<sup>[5-6]</sup>, 成为再生混凝土广泛应用的限制因素之一。目前针对高强再生混凝土干缩的研究仍很少, 干缩研究大多局限在中低强再生混凝土, 为降低再生混凝土的干缩率采用的主要措施有改善

收稿日期: 2009-12-20

作者简介: 曾力(1962-), 男, 副教授, 博士, 主要从事混凝土、水泥及工业废渣等材料研究, (E-mail) zenglw@163.com。

再生骨料表面特性(如加以研磨,减少再生骨料表面的砂浆含量)或掺矿物掺合料等,尽管其干缩量有不同程度减小,但仍难达到与天然骨料混凝土类似的干缩量<sup>[7-9]</sup>。由于高强再生混凝土采用低水胶比、水泥用量大及选用相对坚固的再生骨料,其干缩特性与中低强再生混凝土存在一定差异,采用掺矿物掺合料和外加剂应成为改善高强再生混凝土干缩的主要手段<sup>[10-11]</sup>。因此,该文通过再生混凝土干缩特性的研究及配合比的优化,配制与天然骨料高强混凝土

干缩相当的高强再生混凝土,打破高强和干缩 2 大技术问题限制再生混凝土应用的瓶颈。

## 1 试验

### 1.1 原材料

**1.1.1 水泥及掺合料** 采用 42.5 普通硅酸盐水泥,其物理性能见表 1,水泥、粉煤灰及硅粉的化学成分见表 2。其中粉煤灰的需水量比为 94%,45  $\mu\text{m}$  筛余为 6.8%,抗压强度比为 80%,属 I 级灰。

表 1 水泥的物理性能

标准稠度需水量/ %	细度/ %	安定性	凝结时间/h:min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
			初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
26	2.0	合格	2:00	3:30	5.2	8.0	22.6	47.1

表 2 水泥、粉煤灰和硅粉的化学成分

名称	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Loss
水泥	22.75	4.03	7.92	55.56	2.09	2.82	0.51	0.82	3.16
粉煤灰	48.25	3.68	27.04	14.70	0.30	0.68	1.55	0.34	4.81
硅粉	90.25	0.91	0.47	0.43	0.93	2.82	1.30	0.10	5.72

**1.1.2 骨料** 再生骨料为公路路面废弃水泥混凝土经机械破碎、人工筛分而成,粗骨料最大粒径为 20 mm。天然细骨料(NS)、再生细骨料(RS)、石灰

岩天然粗骨料(NG)和再生粗骨料(RG)的物理性能检测指标见表 3、表 4,骨料颗粒级配见图 1、图 2。

表 3 天然粗骨料(NG)和再生粗骨料(RG)的物理性能指标

名称	松散堆积密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	紧密堆积密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	视密度/ (g·m <sup>-3</sup> )	松散空隙率/ %	紧密空隙率/ %	吸水率/ %	压碎指标/ %	针片状/ %
NG	1 390	1 500	2.66	48	44	1.4	10.6	7.6
RG	1 250	1 330	2.62	52	49	5.1	14.4	3.6

表 4 天然细骨料(NS)和再生细骨料(RS)的物理性能指标

名称	堆积密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	视密度/ (g·m <sup>-3</sup> )	空隙率/ %	吸水率/ %	细度模数	细粉含量/ %	含水率/ %
NS	1 440	2.66	46	1.3	2.6	2.8	0.2
RS	1 350	2.62	48	8.2	2.9	13.1	1.4

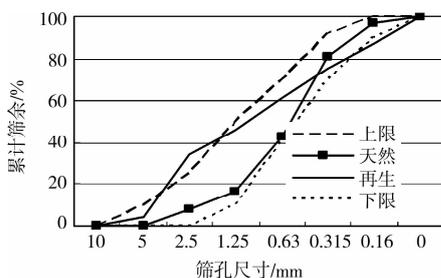


图 1 再生和天然细骨料颗粒级配曲线

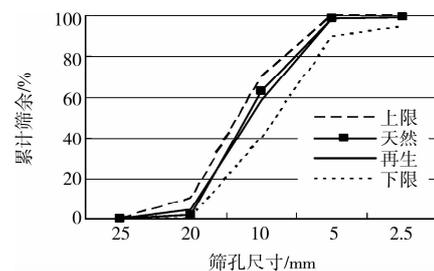


图 2 再生和天然粗骨料颗粒级配曲线

再生骨料的吸水率明显大于天然骨料,此外再生粗骨料具有堆积密度小,坚固性差的特点。天然和再生细骨料的累计筛余量基本落在同一区间,两者级配稍有差异。天然和再生粗骨料的颗粒级配基本相同,级配良好。试验中还使用了 FDN 高效减水剂及 FEA 膨胀剂等材料。

1.2 测试方法

混凝土的干缩率和强度按《水工混凝土试验规程》SL 352-2006 进行成型和测试<sup>[12]</sup>,并采用 SEM 等方法分析界面结构。

2 结果与讨论

2.1 再生骨料对混凝土干缩性能的影响

2.1.1 再生细骨料对砂浆干缩性能的影响 用再生细骨料分别按不同比例取代天然细骨料(见表 5),细骨料为饱和面干状态,砂浆配合比为 W/C=0.5,C/S=1/3,干缩率测试结果见图 3。

表 5 再生骨料取代率

编号	NS/%	RS/%	编号	NG/%	RG/%
RS0	100	0	RG0	100	0
RS15	85	15	RG15	85	15
RS30	70	30	RG30	70	30
RS50	50	50	RG50	50	50
RS70	30	70	RG70	30	70
RS100	0	100	RG100	0	100

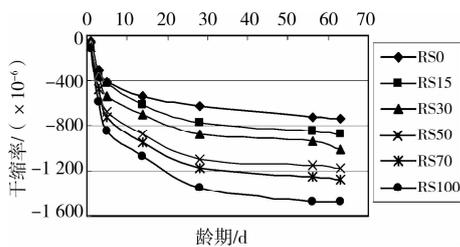


图 3 再生细骨料不同取代率砂浆干缩率

由图 3 可见,随着再生细骨料取代率的增加,砂浆干缩率增加显著,且早期的干缩率增长更快。

2.1.2 再生粗骨料对混凝土干缩性能的影响 同样,用再生粗骨料分别按不同比例取代天然粗骨料(见表 5),全部采用天然细骨料,粗、细骨料均为饱和面干状态,混凝土配合比为 W/C=0.4,C:NS:G=1:1.65:2.50,干缩率测试结果见图 4。

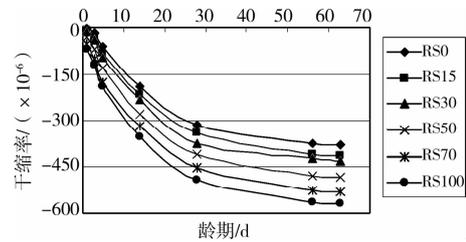


图 4 再生粗骨料不同取代率混凝土干缩率

由图 4 可见,随着再生粗骨料取代率的增加,混凝土干缩率也逐渐增加,但比砂浆的增长幅度减小。再生骨料可以大大增加混凝土干缩,尤其是再生细骨料更为显著。其主要原因是再生骨料不仅表面含有老水泥砂浆,且细粉含量也较高。高的干缩率极大的限制了再生混凝土的广泛应用,因此必须采取措施改善再生混凝土的干缩特性。

2.2 高强再生混凝土性能研究

2.2.1 高强再生混凝土设计及干缩试验 为了改善再生混凝土的干缩特性,采用高强混凝土进行对比试验,采取的措施主要是:混凝土配合比优化、原材料选用(掺合料和外加剂)及骨料采用饱和面干状态等方面开展试验,最终达到改善再生混凝土干缩的目的,其中天然粗骨料混凝土 NC 与再生粗骨料混凝土 RC 配比相同,补偿收缩再生粗骨料混凝土 RCF 掺膨胀剂。混凝土设计配合比见表 6。

表 6 再生混凝土配合比设计

编号	W/B	F/B/%	SF/B/%	RA/G/%	材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )							
					C	F	SF	W	NS	NG	RG	FEA
NC	0.25	30	10	0	322	161	54	133	689	1111	0	0
RC	0.25	30	10	100	322	161	54	133	689	0	1 111	0
RCF	0.25	30	10	100	268	161	54	133	689	0	1 111	54

注:F 为粉煤灰,SF 为硅粉,B 为胶材总量,FEA 为膨胀剂,掺 FDN 高效减水剂(1.2%)。

由图 5、图 6 及图 7 可见,3 种混凝土的劈拉强度和抗压强度相当,再生粗骨料混凝土 RC 比天然粗骨料混凝土 NC 的干缩率稍大,但已非常接近。而补偿收缩再生粗骨料混凝土 RCF 表现为先膨胀

后收缩,但即使到了 98 d 龄期时干缩也很小,具有微干缩特性。因此,通过常规措施设计的高强再生混凝土的干缩率可以明显减小,且掺膨胀剂同样可以达到很好的补偿收缩效果。

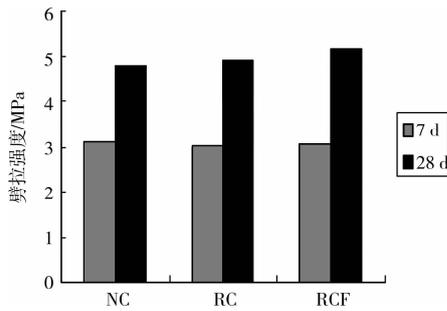


图 5 混凝土劈拉强度

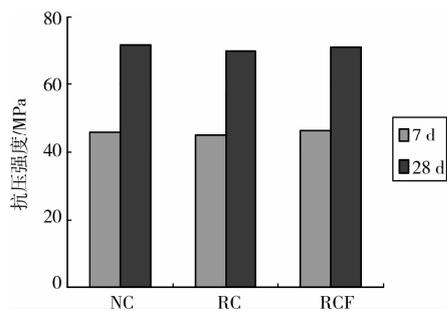


图 6 混凝土抗压强度

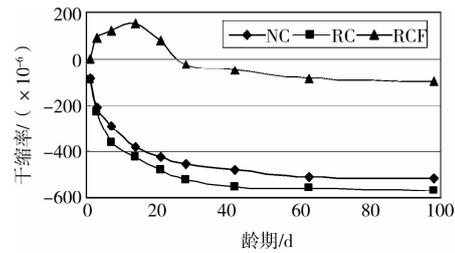


图 7 混凝土干缩率

**2.2.2 养护环境对再生混凝土性能的影响** 受再生骨料表面特征的影响,养护环境条件不同对再生混凝土性能的影响通常大于普通混凝土。为了减小干缩对混凝土的影响,通常增加湿养护时间,表 7 为试件成型湿养 2 d 后拆模测初长,然后湿养时间分别为 0 d、7 d 和 28 d 后放入干燥环境下的混凝土干缩试验结果。

由表 7 可见,增加湿养护时间可以起到减小混凝土干缩率的作用,而再生混凝土的干缩率减小效果更显著;随着湿养护时间的增长,减小干缩率的效果也随之减小;RCF(掺膨胀剂)湿养 7 d 后,膨胀率已足够补偿干缩,湿养超过一定时间后,补偿效果增

表 7 养护环境对再生混凝土干缩率的影响

编号	28 d 干缩率/( $\times 10^{-6}$ )			干缩减小率/%		
	湿养 0 d	湿养 7 d	湿养 28 d	湿养 0 d	湿养 7 d	湿养 28 d
NC	-452	-353	-338	100	78	75
RC	-520	-362	-341	100	70	66
RCF	-25	237	271	/	/	/

加已不大。因此,保证足够的早期湿养护对控制混凝土的干缩意义重大,尤其是再生混凝土。

同样在干燥环境中,由于水分的逐渐散失,混凝

土的强度增长将随之减小,直到最后停止<sup>[13-14]</sup>。表 8 为 3 种混凝土先湿养护 2 d 后再在干燥环境条件下(温度 20℃、相对湿度 60%)养护的强度试验结果。

表 8 养护环境对再生混凝土强度的影响

编号	抗压强度 MPa			劈拉强度/MPa		
	干养/28 d	标养/28 d	降低率/%	干养/28 d	标养/28 d	降低率/%
NC	62.2	71.7	13.2	4.52	4.80	5.8
RC	58.8	71.0	17.2	4.33	4.93	12.2
RCF	57.8	72.0	19.7	4.63	5.18	10.6

由表 8 可见,干燥养护环境对混凝土强度有很大影响,尤其是对再生混凝土影响更大。且随着龄期的延长,干养造成强度的降低率还会加大。由此可见,养护条件对再生混凝土强度的影响比普通混凝土更大。

### 2.3 机理分析

再生粗骨料混凝土与普通混凝土的主要区别在于再生骨料表面含有部分老砂浆,改变了骨料特性

和界面结构,导致再生混凝土干缩特性的改变。

**2.3.1 微观结构分析** 再生混凝土较低的强度和较高的干缩值是由再生骨料表面的多孔结构所决定的。再生骨料的多孔结构将显著影响水分在界面过渡区的传输过程,进而改变界面过渡区水化产物的微观结构<sup>[15-17]</sup>。当吸水能力较大的再生骨料含水过高或过低时,这些骨料的周围可能因为水膜过厚或大量失水而造成界面区微结构的多孔性,并导致劈

裂强度的降低和干缩加剧。如果能够改善再生混凝土骨料的吸水特性,那么,再生骨料混凝土的强度和收缩特性可望得到改善。

由图 8 高强再生混凝土 28 d 基体微观结构可见,水泥石基体密实,孔隙少,且孔径也小。

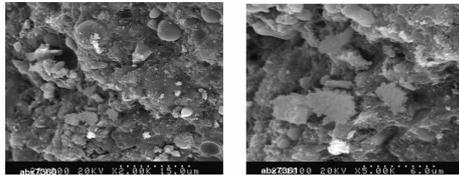


图 8 高强再生混凝土基体微观结构

由图 9 高强再生混凝土 28 d 界面微观结构可见,界面过渡区部位密实,无明显氢氧化钙的定向结晶和钙矾石晶体存在,水泥水化充分,水化硅酸钙胶体较多,形成一层薄膜覆盖在骨料周围。这主要是

由于再生粗骨料表面粗糙多棱角导致它与水泥砂浆能够更充分的接触,以及掺高活性掺合料等缘故,因而在过渡区内水泥的水化更充分,结合更致密。这也解释了为什么再生骨料的性能不如碎石的性能好而它所配制的再生混凝土抗压强度却与相应基准混凝土的抗压强度相当。

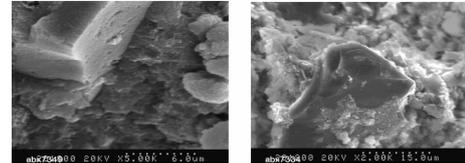


图 9 高强再生混凝土界面微观结构

**2.3.2 孔结构分析** 采用吸水动力学法测试混凝土的孔隙参数,同时采用压汞法测试取自相应混凝土内砂浆的孔隙参数,测试结果见表 9。

表 9 混凝土 28 d 龄期孔结构参数测试结果

编号	混凝土			砂浆		界面
	平均孔径参数 /λ	孔均匀性参数 /α	$P_c / \%$	比孔容 /( $\times 10^{-2} \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}$ )	$P_s / \%$	$P_j / \%$
NC	0.51	0.63	3.1	1.50	3.3	1.1
RC	0.54	0.59	3.0	1.59	3.5	0.9
RCF	0.40	0.70	2.4	1.45	3.2	0.5

平均孔径参数  $\lambda$  越小表明混凝土内孔隙越小,孔均匀性参数  $\alpha$  越大则孔大小越均匀。由表 9 可见,再生混凝土 RC 的孔隙结构与天然骨料混凝土相比可认为基本一致;再生混凝土 RCF 的孔结构趋于更好,表明添加膨胀组分对改善孔结构有利。总的来看,由于各混凝土强度高、密实,孔隙率均很小。造成再生骨料混凝土与天然粗骨料混凝土孔结构的差异应主要出现在界面,再生骨料表面包裹或部分包裹一层老砂浆,老砂浆的存在使再生混凝土的界面结构性能与天然粗骨料混凝土发生了变化。目前直接测试界面孔隙率尚有困难,但也可根据表 9 试验结果做如下分析:

1) 尽管再生混凝土 RC 的砂浆比孔容稍大于天然骨料混凝土的砂浆比孔容 ( $1.59 > 1.50 \times 10^{-2} \text{ ml/g}$ ),但总孔隙率却略小 ( $3.0\% < 3.1\%$ ),表明再生混凝土的界面已变的更密实。

2) 采用近似方法计算分析。假设骨料为无孔隙的密实状态,所有孔隙存在于砂浆本体内和界面处,则  $1 \text{ m}^3$  混凝土的体积组成为: $V_g$ (石体积) +  $V_{sj}$ (砂浆密实体积) +  $V_{sk}$ (砂浆内孔体积) +  $V_{jk}$ (界面孔体积),由此可得:

$$\text{混凝土孔隙率 } P_c = (V_{sk} + V_{jk}) / (V_g + V_{sj} + V_{sk}$$

$$+ V_{jk}) = (V_{sk} + V_{jk})$$

$$\text{砂浆孔隙率 } P_s = V_{sk} / (V_{sj} + V_{sk})$$

由上式解得: $V_{jk} = P_c - P_s V_{sj} / (1 - P_s)$ ,根据表 6 混凝土配合比计算得到  $V_{sj} = 0.58 \text{ m}^3$ ,并将比孔容换成砂浆孔隙率  $P_s$ ,又界面孔隙率  $P_j = V_{jk} / (V_g + V_{sj} + V_{sk} + V_{jk}) = V_{jk}$ ,则

$$P_j = P_c - 0.58 P_s / (1 - P_s)$$

将测试的  $P_c$  和  $P_s$  带入上式计算得近似界面孔隙率  $P_j$ ,见表 9。由结果可见再生混凝土界面孔隙率小,表明其界面结构比天然骨料混凝土密实,同样添加膨胀组分可使界面结构更加密实。分析其原因主要是再生骨料表面老砂浆孔隙发达,水化初期不仅可通过吸水减小界面处的水胶比,且其孔隙也为水泥的水化产物提供了发展空间,使新老浆体连接更好;到后期孔隙内的吸水又可反过来保证水泥的正常水化,膨胀组分在界面处可充分发挥其膨胀密实效果。

**2.3.3 骨料的弹性性质分析** 骨料的弹性性质不同对干缩的抑制程度也不同<sup>[17]</sup>。由于再生骨料表面含有砂浆,其弹性通常大于天然骨料,导致再生混凝土的干缩比普通混凝土大。但由于高强再生混凝土界面结构由原多孔状态变为致密状态,再生骨料

弹性性质随之发生改变,对干缩的抑制大大加强,使高强再生混凝土的干缩与普通高强混凝土的差异大大减小。

### 3 结论

1)再生粗细骨料均对普通混凝土和砂浆的干缩影响显著,随着再生骨料取代率的增加,干缩越来越大。

2)通过优化设计的高强再生混凝土抗压强度达到 70 MPa,其干缩率已很接近天然骨料高强混凝土。同时通过掺膨胀剂可以补偿收缩,达到微干缩的目的。

3)增加湿养护时间,再生混凝土的干缩减小效果明显大于普通混凝土;相反,干燥环境养护降低再生混凝土强度的程度又大于普通混凝土。

#### 参考文献:

- [1] 刘数华,冷发光. 再生混凝土技术[M]. 北京:中国建材工业出版社,2007.
- [2] 张虹,熊学忠. 废弃混凝土再生骨料的特性研究[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.
- [3] EGUCHI K, TERANISHI K, NARIKAWA M. Study on mechanism of drying shrinkage and water loss of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Structural and Construction Engineering, 2003, 573:1-7.
- [4] 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.
- [5] HANSEN T C, BOEGH. Elasticity and drying shrinkage of recycled aggregate concrete [J]. ACI Journal, 1985, 82(5):648-652.
- [6] 崔正龙,大芳贺羲喜,北迁政文,等. 再生混凝土耐久性的试验研究(Ⅲ):再生混凝土的干燥收缩试验[J]. 科学技术与工程,2006,6(23):4801-4805.  
CUI ZHENG-LONG, OHANG YOSHIKI, KITATSUJI MASAHUMI, et al. Durability test investigation on recycled aggregate concrete Part 3: drying shrinkage test on recycled aggregate concrete[J]. Science Technology and Engineering, 2006, 6(23):4801-4805.
- [7] 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.
- [8] RAVINDRARAJAH R S, TAM C T. Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate [J]. Magazine of Concrete Research, 1985, 37(130):29-38.
- [9] ILKER B T, SEI IM S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34:1307-1312.
- [10] SHA-YAN A, XU A. Performance and properties of recycled concrete aggregate[J]. ACI Materials Journal, 2003, 100(5):371-380.
- [11] 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.
- [12] SL352-2006 水工混凝土试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [13] 内维尔 A M. 混凝土的性能[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1983.
- [14] 李亚杰,方坤河. 建筑材料[M]. 6版. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [15] 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):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):10-13.
- [16] RINGOT E, BASCOUL A. About the analysis of microcracking in concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2001, 23:261-266.
- [17] 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.

(编辑 胡英奎)