

再生混凝土粘结性能试验研究

胡琼¹, 陈伟伟², 邹超英¹

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150080; 2. 温州市建筑设计研究院, 温州 325000, chenweiwei@live.com)

摘要: 为进一步在实际工程中推广应用再生混凝土, 通过再生混凝土拔出试验, 研究再生粗骨料、细骨料取代率, 水灰比及锚固条件对再生混凝土抗压强度、粘结性能的影响. 结果表明: 再生混凝土的粘结强度随再生粗骨料取代率增加而增加, 在粗骨料取代率约为 60% 时取得最大值, 随后降低; 再生混凝土的粘结强度随再生细骨料取代率增加而降低; 再生混凝土的粘结强度优于普通混凝土; 过多掺入再生粗、细骨料会降低再生混凝土抗压强度; 降低水灰比可提高再生混凝土抗压强度及粘结强度, 水灰比变化对再生混凝土抗压强度的影响较普通混凝土小; 适当增加保护层厚度 ($\leq 3d$) 及锚固长度可以提高再生混凝土粘结强度.

关键词: 再生混凝土; 粘结性能; 再生骨料取代率; 保护层厚度; 锚固长度

中图分类号: TU502 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2010)12-1849-06

Experimental study on bonding properties of recycled concrete

HU Qiong¹, CHEN Wei-wei², ZOU Chao-ying¹

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
2. Wenzhou Architecture Design & Research Institute, Wenzhou 325000, China, chenweiwei@live.com)

Abstract: To promote the use of recycled concrete in practical engineering, pull-out tests were carried out to study the influence of Coarse/Fine Recycled Concrete Aggregate (CRCA/FRCA) replacement rate, water-cement ratio and the anchoring conditions on the compressive strength and bonding properties of Recycled Aggregate Concrete (RAC). The results show that: the bond strength of RAC rises with the increasing of CRCA replacement rate, and arrives at the maximum when the rate = 60%, then reduces; the bond strength of RAC reduces while the FRCA replacement rate increases, and it is better than that of ordinary concrete; too much CRCA/FRCA replacement will reduce the compressive strength of RAC; lower water-cement ratio can improve the compressive strength and bond strength of RAC, and water-cement ratio variation has less influence on RAC than that of ordinary concrete; appropriate increase in the thickness of concrete cover ($\leq 3d$) and the anchorage length can increase the bond strength of RAC. In addition, by concerning the relationship between the bond strength of RAC and CRCA/FRCA replacement rate, water-cement ratio, compressive strength, anchorage length, a formula was established.

Key words: recycled concrete; bonding property; recycled aggregate replacement ratio; concrete cover thickness; anchorage development length

随着国民经济的高速发展, 一方面大量土木工程的兴建导致天然砂石过度开采, 造成生态环境破坏; 另一方面, 由于各种原因拆除的大量建

筑垃圾得不到有效处理, 造成环境污染^[1-3]. 将废弃混凝土经破碎、清洗、分级后, 按一定比例混合形成“再生骨料”, 部分或全部取代天然骨料配置而成的“再生混凝土”, 可以很好地解决这一问题^[3-6]. 目前对再生混凝土的研究多集中在再生混凝土基本力学性能上^[7-10], 而对再生混凝土与钢筋粘结性能的研究较少^[11].

本文通过拔出试验, 分别对再生粗、细骨料取

收稿日期: 2010-01-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50278025);

黑龙江省自然科学基金资助项目(D0314).

作者简介: 胡琼(1963—), 女, 博士, 副教授.

代率,灰水比及锚固条件对再生混凝土强度、粘结性能的影响开展研究^[4],为再生混凝土的进一步推广应用奠定基础.

1 再生骨料取代率的影响

1.1 试验设计

1.1.1 混凝土原材料

水泥为天鹅牌普通硅酸盐水泥(P. O 32.5),水为自来水.废弃混凝土取自哈尔滨道里区某拆除建筑,在实验室清除表面灰尘后,先人工破碎成大小合适的碎块,再通过鄂式破碎机破碎,用筛分机筛分,粒径 >4.75 mm 的为再生粗骨料,粒径 <4.75 mm 的为再生细骨料.天然石子和再生粗骨料的基本性能见表1,天然砂和再生细骨料的基本性能见表2,级配符合II区要求.

1.1.2 混凝土配合比及试件设计

为了考察再生粗、细骨料对再生混凝土粘结强度的影响,本文设计了两个系列的再生混凝土试件,如表3所示.其中粗(细)骨料取代率为再

生粗(细)骨料与全部粗(细)骨料的质量比.

表1 粗骨料的基本性质

粗骨料	级配	堆积密度 kg · m ⁻³	表观密度 kg · m ⁻³	吸水率 %
再生粗骨料	5 ~ 31.5	1 196	2 540	5.7%
天然石子	5 ~ 31.5	1 343	2 860	1.2%
再生/天然	—	0.89	0.89	4.75

表2 粗细骨料的基本性质

细骨料	细度模数	堆积密度 kg · m ⁻³	表观密度 g · cm ⁻³	吸水率 %
再生细骨料	2.71	1 260	2 270	12.10%
天然砂	2.40	1 560	2 630	2.04%
再生/天然	—	0.81	0.86	5.93

由表1,表2可以看出,再生骨料吸水率较天然骨料高出许多,是天然骨料的4~6倍,为了使再生混凝土的坍落度达与基准混凝土一致需适当增加用水量.这部分多加的水称为附加水,相对剩余的水称为自由水^[12].

表3 再生混凝土配合比

系列	分组	试件数	粗骨料取代率 r_1 %	细骨料取代率 r_1 %	附加水 kg	再生粗骨料 kg	天然石子 kg	再生细骨料 kg	天然砂 kg	坍落度 mm
系列一	NGS(基准)	6	0	0	0	0	1 184	0	637	26
	RGS33,0	3	33	0	9.5	371	793	0	637	24
	RGS66,0	3	66	0	19.0	742	403	0	637	26
	RGS100,0	3	100	0	28.9	1 125	0	0	637	25
系列二	RGS100,33	3	100	33	40.0	1 125	0	205	409	24
	RGS100,66	3	100	66	49.4	1 125	0	378	217	26
	RGS100,100	3	100	100	60.1	1 125	0	573	0	25

注:水泥用量均为394 kg,用水量均为185 kg,自由水灰比0.47^[3].

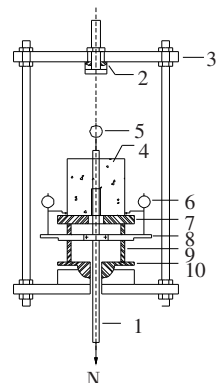
拔出试件设计参数如下:试件尺寸为150 mm × 150 mm × 150 mm,中心埋置直径 d 为16 mm 的HRB335级钢筋,无横向配筋,保护层厚度 c 为67 mm.在加载端设置70 mm 硬质PVC套管形成钢筋与混凝土间的无粘结区,以消除试验时加载端与垫板间的局部挤压影响,有效锚固长度 $l_a = 5d = 80$ mm.钢筋的力学性能见表4.

表4 钢筋材料性能

钢筋类型	直径 mm	屈服强度 MPa	极限强度 MPa	伸长率 %	弹性模量 MPa
HRB 335	16	376	588	31	2.0×10^5

拔出试验在100 kN 的试验机上进行.试验加载采用全自动闭环控制,在上升段加载至极限荷载80%前采用力控制,加荷速度100 N/s,之后转为位

移控制,速度为0.3 mm/min.试验装置如图1所示.



1—钢筋;2—上球铰;3—吊篮;4—试件;5—机电百分表;6—机电百分表;7—垫板;8—夹持架;9—槽钢垫块;10—下球铰.

图1 试验装置示意图

钢筋与混凝土间的粘结锚固强度可根据下式

求得:

$$\tau_u = \frac{N_u}{\pi d l_a}$$

式中: N_u 为荷载峰值, d 为钢筋直径, l_a 为钢筋的锚固长度.

1.2 试验结果与分析

1.2.1 试验结果

表 5 给出了系列一和系列二拔出试件的破坏形式、极限荷载、粘结强度和抗压强度值.

表 5 拔出试件试验结果

系列	试件组	试件编号	破坏形式	极限荷载 kN	τ_u MPa	$\tau_{u,m}$ MPa	$f_{cu,28}$ MPa
系列一	RGS33,0	1	拔出	73.0	18.2	16.9	37.3
		2	拔出	65.4	16.3		
		3	拔出	60.3	15.0		
		4	劈裂	72.7	18.1		
		5	拔出	69.0	17.2		
		6	拔出	67.0	16.7		
系列一	RGS66,0	1	劈裂	82.0	20.4	20.4	42.2
		2	劈裂	74.7	18.6		
		3	劈裂	88.8	22.1		
系列一	RGS100,0	1	劈裂	87.0	21.6	21.3	45.0
		2	劈裂	82.6	20.5		
		3	劈裂	88.1	21.9		
系列一	RGS100,33	1	劈裂	82.0	20.4	19.1	33.8
		2	劈裂	72.9	18.1		
		3	劈裂	75.5	18.8		
系列二	RGS100,66	1	劈裂	72.0	17.9	18.2	34.2
		2	劈裂	76.3	19.0		
		3	劈裂	70.8	17.6		
系列二	RGS100,100	1	劈裂	81.4	20.2	20.4(舍弃)	40.0(舍弃)
		2	劈裂	82.2	20.4		
		3	劈裂	82.4	20.5		
系列二	RGS100,100	1	劈裂	70.8	17.6	17.1	32.4
		2	拔出	67.7	16.8		
		3	拔出	68.0	16.9		

注: $\tau_{u,m}$ 为粘结强度平均值, $f_{cu,28}$ 为 28 天抗压强度.

系列一和系列二各组试件的平均粘结滑移曲线如图 2 所示. 由于大部分试件破坏形式为劈裂破坏, 粘结滑移曲线只有上升段. 可以看出, 掺入再生粗骨料后再生混凝土的粘结曲线的斜率(即粘结刚度)较基准混凝土有所提高, 而在 RGS100,0 的基础上掺入再生细骨料后, 粘结刚度又有所下降, 破坏形式也最后从劈裂变为拔出.

1.2.2 试验结果分析

1.2.2.1 粗骨料取代率对粘结强度的影响

由表 5 可以看出, 再生粗骨料混凝土的粘结强度随粗骨料 r_1 的增加先上升后有所下降, 但都高于基准混凝土.

再生混凝土试件粘结强度提高的原因是, 再生混凝土浇筑静置后, 再生骨料仍吸收了部分自由水, 使混凝土拌合物的有效水灰比降低, 这可由静置同样时间的再生混凝土坍落度损失幅度比普通混凝土更大, 且随着时间的增大而变得更大得

到间接证实^[13].

而在再生粗骨料取代率为 100% 时, 粘结强度提高幅度又有所下降, 其原因是: 在粗骨料用量较大时, 由有效水灰比降低带来的强度提高成为次要影响, 而由各种不利因素带来的强度降低成为主要影响. 这些不利因素包括: 质量离散性大、含泥量高、压碎指标高等^[14].

粘结强度变化公式拟合如下. 为了表达再生粗骨料取代率对再生混凝土粘结强度的影响程度, 定义参数

$$\beta_1(r_1, 0) = \frac{\tau_u(\text{RGS}r_1, 0)}{\tau_u(0, 0)}$$

式中: $\tau_u(\text{RGS}r_1, 0)$ 为再生粗骨料取代率为 r_1 、再生细骨料取代率为 0 时, 再生粗骨料混凝土的粘结强度; $\tau_u(\text{RGS}0, 0)$ 实际即为 NGS 组试件的粘结强度.

β_1 实际反映了掺入再生粗骨料后混凝土粘

结强度的提高系数. 用二次多项式对试验数据进行拟合, 结果见式(1)及图3.

$$\beta_1 = -0.7596(r_1 - 0.5871)^2 + 1.2606 \quad (0 \leq r_1 \leq 1). \quad (1)$$

相关系数 $R = 0.9996$, 可见拟合公式与试验结果吻合较好.

由式(1)可知, 当再生粗骨料掺入量在 60% 左右时再生混凝土的粘结强度最大, 较基准混凝土提高 26%.

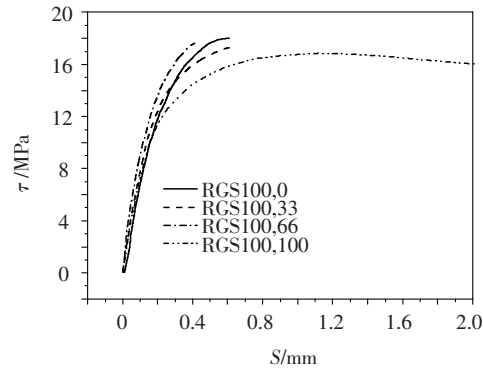
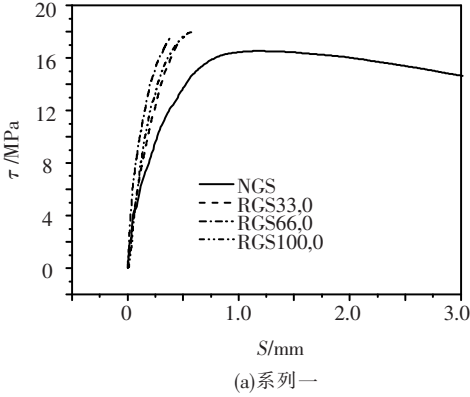


图2 两个系列试件的粘结滑移曲线

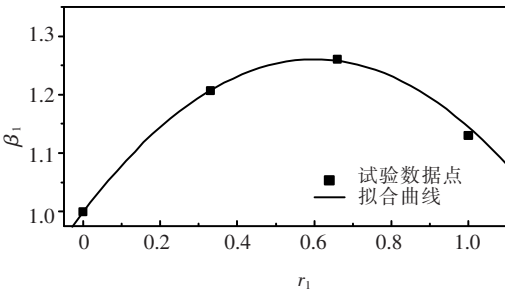


图3 β_1 随粗骨料取代率的变化

1.2.2.2 细骨料取代率对粘结强度的影响

由表5可以看出, 总体上再生混凝土粘结强度随着细骨料取代率 r_2 的增大逐渐下降.

公式拟合如下.

为了表达再生细骨料取代率对再生混凝土粘结强度的影响, 定义参数

$$\beta_2(100, r_2) = \frac{\tau_u(\text{RGS100}, r_2)}{\tau_u(\text{RGS100}, 0)}$$

式中: $\tau_u(\text{RGS100}, r_2)$ 为粗骨料取代率为 100%、细

骨料取代率为 r_2 时, 再生混凝土的粘结强度.

β_2 与 r_2 的关系见图4, 对试验点进行线性拟合 (RGS100.66 点较离散, 拟合时未考虑), 结果见式(2).

$$\beta_2 = 0.9946 - 0.10196r_2 \quad (0 \leq r_2 \leq 1). \quad (2)$$

相关系数 $R = 0.9908$, 试验数据线性程度较好.

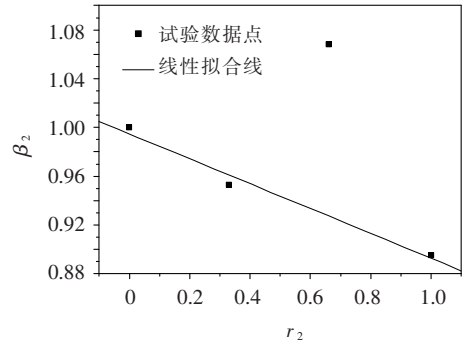


图4 β_2 随细骨料取代率 r_2 的变化

1.2.2.3 粗、细骨料取代率对再生混凝土抗压强度的影响

由表5可以看出, 再生混凝土的抗压强度随粗骨料 r_1 的增加先上升, 在粗骨料取代率为 60% 附近达最大值, 随后降低. 其原因应该同粘结强度变化一致. 此外, 文献[15]从再生粗骨料与水泥砂浆连接界面的微观结构入手研究其对再生混凝土抗压强度的影响, 认为再生混凝土颗粒与新拌水泥浆体结合更紧密, 但仍有待进一步研究. 再生混凝土抗压强度随细骨料取代率 r_2 增加而降低[16]. 其他文献大多只研究再生粗骨料对砼抗压强度的影响, 也得出了类似结论, 图5是部分研究结果的对比[16~20]. 考虑最大程度地利用再生骨料, 建议再生粗骨料的取代率可取 40% ~ 100%, 再生细骨料取代率 $\leq 33\%$.

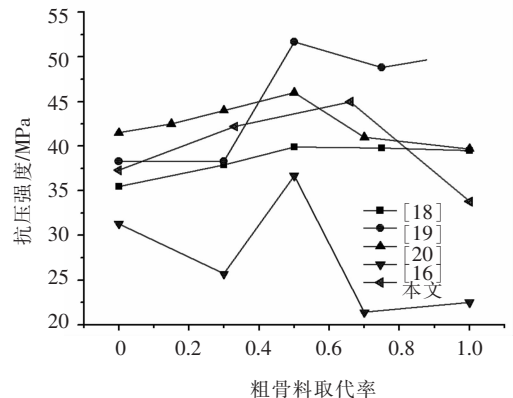


图5 抗压强度随粗骨料取代率的变化

2 水灰比的影响

2.1 试验设计

在粗骨料取代率为 100%, 细骨料取代率为

33%时,通过调整水灰比,设计了 4 组不同抗压强度的再生砼试件,每组 3 个试件,见表 6.

表 6 不同水灰比试件配合比

编号	水灰比	水/kg	水泥/kg	再生粗骨料/kg	砂/kg	再生细骨料/kg	附加水/kg
WC0.47	0.47	185	394	1125	409	205	40.0
WC0.43	0.43	185	430	1102	402	201	39.8
WC0.39	0.39	185	474	1075	391	196	39.5
WC0.35	0.35	185	529	1041	379	190	39.2

2.2 试验结果与分析

2.2.1 水灰比对再生混凝土抗压强度的影响

拔出试验和抗压强度试验结果见表 7.

表 7 不同水灰比试件试验结果

试件组	水灰比	极限荷载 平均值/kN	$\tau_{u,m}/\text{MPa}$	f_{cu}/MPa
WC0.47	0.47	73.0	18.2	34.2
WC0.43	0.43	86.2	21.4	39.9
WC0.39	0.39	86.3	22.6	43.9
WC0.35	0.35	95.1	23.7	49.1

由表 7 可见,再生混凝土强度随灰水比的提高而提高,与普通混凝土一致.我国《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55-2000)采用式(3)来描述普通混凝土 28 d 立方体强度与灰水比之间的关系.

$$f_{cu,28} = \alpha_a f_{ce} \left(\frac{m(C)}{m(W)} - \alpha_b \right). \quad (3)$$

式中: α_a 、 α_b 为回归系数, f_{ce} 为水泥 28 d 抗压强度实测值,本文 $f_{ce} = 45.5 \text{ MPa}$;对于普通碎石混凝土 $\alpha_a = 0.46$, $\alpha_b = 0.07$,卵石混凝土 $\alpha_a = 0.48$, $\alpha_b = 0.33$.

将式(3)进行线性拟合,结果见图 6.

$$f_{cu,28} = 0.437f_{ce} \left(\frac{m(C)}{m(W)} - 0.369 \right).$$

$\alpha_a f_{ce}$ 实际是 $f_{cu,28}$ 水灰比关系曲线的斜率,在使用相同的水泥时, α_a 的大小体现了单位水灰比变化引起抗压强度的变化幅度.本文再生混凝土的 α_a 小于普通混凝土的 α_a ,说明发生同样的灰水比变

化时,再生混凝土的抗压强度变化要小于普通混凝土,即灰水比变化对再生混凝土抗压强度的影响较普通混凝土要小些,但幅度不大.文献[5]也得出了类似的结论.

从图 6 可以看出,对于本文设计的再生骨料取代率(RGS100,33)情况,同样的水灰比下,再生砼抗压强度较普通砼有一定程度下降,在水灰比为 0.25 时,相比碎石砼和卵石砼分别下降约 16.7% 和 10.1%.

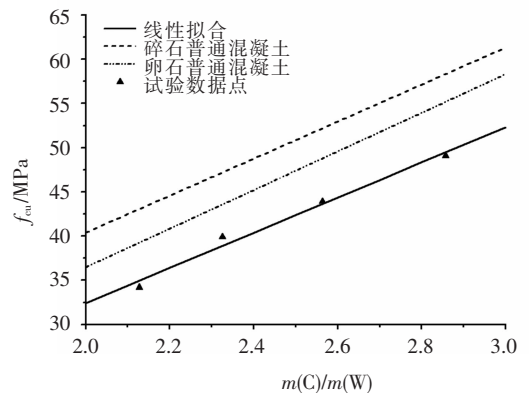


图 6 再生混凝土抗压强度与水灰比关系

3 锚固条件的影响

3.1 保护层厚度的影响

通过偏心置筋的方式改变钢筋混凝土保护层厚度以考察保护层厚度对再生混凝土粘结性能的影响,设计方案见表 8.

表 8 试验设计方案

试验组	试件尺寸 mm × mm × mm	锚固长度 mm	保护层厚度 mm	置筋方式
B1	150 × 150 × 150	80	32(2d)	偏心
B2	150 × 150 × 150		48(3d)	偏心
B3	150 × 150 × 150		67(4.2d)	中心
B4	200 × 200 × 150		80(5d)	偏心

注:配合比均采用 RGS100,33,钢筋直径 16 mm.

试验结果见表 9.由表 9 可以看出,保护层厚度由 2 d 增加到 3 d 时,粘结强度有显著提升,之后再增加保护层厚度,对混凝土粘结强度影响不大.所以对于再生混凝土,钢筋的保护层厚度建议控

制在 3 d 以内.

3.2 锚固长度的影响

通过改变 PVC 套管的长度,设计了锚固长度分别为 3 d, 5 d, 7.5 d 的三组试件,来考察锚固长

度对粘结强度的影响,试验结果见表10.

表9 不同保护层厚度试件试验结果

试件组	极限荷载平均值	$\tau_{u,m}$ MPa	f_{cu} /MPa
B1	56.7	14.1	34.2
B2	73.0	18.2	34.2
B3	73.0	18.2	34.2
B4	71.8	17.9	34.2

表10 试验结果

试件组	极限荷载 kN	$\tau_{u,m}$ MPa	f_{cu} /MPa
3 d	64.8	26.9	34.2
5 d	73.0	18.2	34.2
7.5 d	97.3	16.1	34.2

由表10可以看出,随着锚固长度的增加,极限荷载值增加,但平均粘结应力逐渐下降.这是由于锚固长度越长时,粘结应力分布不均匀,破坏时实际最大粘结应力与平均应力的差距越大.

以量纲一的 τ_u/f_{cu} 和 d/l_a 为变量,进行数据的线性拟合,得

$$\frac{\tau_u}{f_{cu}} = 8.0680 + 55.5000 \frac{d}{l_a}$$

相关系数 $R = 0.983$.

4 结论

1)再生混凝土的粘结强度要优于对比基准混凝土,但更容易发生劈裂破坏;再生混凝土粘结强度随粗骨料取代率的增加而增加,在粗骨料取代率为60%附近达最大值,随后降低;再生混凝土的粘结强度随再生细骨料取代率增加而降低;过多掺入再生粗、细骨料会降低再生混凝土抗压强度.

2)降低水灰比可提高再生混凝土抗压强度及粘结强度,水灰比变化对再生混凝土抗压强度的影响较普通混凝土小.

3)适当增加保护层厚度及锚固长度可以提高再生混凝土粘结强度.保护层厚度超过3d后,对粘结强度影响不大.

4)建立了再生混凝土粘结强度与再生粗细骨料取代率、水灰比、再生混凝土抗压强度、锚固长度的相关公式.

参考文献:

- [1] XIAO J Z, LI J B, ZHANG C. On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: An overview [J]. *Material and Structures*, 2006,39(290):655-664.
- [2] OIKONOMOU N D. Recycled concrete aggregates [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2005,27:315-318.
- [3] POON C S, CHAN D. The use of recycled aggregate in

concrete in Hong Kong [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2007,50(3):293-305.

- [4] 陈伟伟. 再生混凝土粘结性能试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [5] Kiyoshi Eguchi, Kohji Teranishi, Akira Nakagome, Hitoshi Kishimoto, Kimihiko Shinozaki, Masafumi Narikawa. Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction [J]. *Construction and Building Materials*,2007,21:1542-1551.
- [6] TU T Y, CHEN Y Y, HWANG C L. Properties of HPC with recycled aggregates [J]. *Cement and Concrete Research*, 2006,36:943-950.
- [7] HANSEN T C. Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete Second State - of - the - Art Report Development 1945-1985 [J]. *Material and Structure*, 1986,19(5):201-246.
- [8] OIKONOMOU N D. Recycled concrete aggregates [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2005,27:315-318.
- [9] RAHAL K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate [J]. *Building and Environment*, 2007,42:407-415.
- [10] AJDUKIEWICA A, KLISZCEWICZ A. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC [J]. *Cement & Concrete Composites*,2002,24:269-279.
- [11] XIAO Jianzhuang, FALKNER H. Bond behavior between recycled aggregate concrete and steel rebars [J]. *Construction and Building Materials*, 2007,21:395-401.
- [12] 史巍,侯景鹏. 再生混凝土技术及其配合比设计方法 [J]. *建筑技术开发*, 2001,28(8):18-20.
- [13] 邱怀中,何雄伟,万惠文,等. 改善再生混凝土工作性能的研究 [J]. *武汉理工大学学报*, 2003,25(12):34-37.
- [14] 徐亦冬,周士琼,肖佳. 再生混凝土骨料试验研究 [J]. *建筑材料学报*, 2004,7(4):447-450.
- [15] EVANGELISTA L, DE BRITO J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2007,29:397-401.
- [16] 李佳彬. 再生混凝土基本力学性能研究 [D]. 上海:同济大学,2004.
- [17] 王玉卫. 陶粒混凝土与钢筋粘结锚固性能的试验研究 [D]. 南宁:广西大学,2005.
- [18] 肖开涛. 再生混凝土的性能及其改性研究 [D]. 武汉:武汉理工大学,2004.
- [19] 李坤. 再生骨料及再生混凝土基本性能研究 [D]. 大连:大连理工大学硕士学位论文,2006.
- [20] 赵伟. 绿色高强高性能再生混凝土试验研究 [D]. 武汉:武汉大学硕士学位论文,2004.

(编辑 刘 彤)