

# 高品质再生粗骨料混凝土配合比优化

郭远新,李秋义,李倩倩,岳公冰

(青岛理工大学土木工程学院,山东 青岛 266033)

**摘要** 目的 研究胶凝材料用量、胶水质量比和再生粗骨料取代率对高品质再生粗骨料混凝土工作性和力学性能的影响,对其配合比进行优化后,以实现再生骨料的最大化工程应用.方法 采用线性回归拟合方法,依次考虑再生粗骨料混凝土的抗压强度和原材料成本,保证再生粗骨料混凝土在不同强度等级下可以满足力学性能以及原材料最低成本要求.结果 再生粗骨料混凝土的用水量-取代率以及抗压强度-胶凝材料用量/胶水质量比均表现出较好的线性关系;相比较天然粗骨料混凝土,其用水量最大增幅仅为7.1%,28d抗压强度最大差值仅为6.4MPa,且配合比优化后的原材料成本最大降幅达31.3%,可用于制备强度等级为C20~C40的再生粗骨料混凝土.结论 优化后的高品质再生粗骨料混凝土配合比具有很好的工程适用性和经济性,有效地扩大了再生粗骨料的使用范围.

**关键词** 再生粗骨料混凝土;抗压强度;原材料成本;配合比优化

中图分类号 TU528.01 文献标志码 A

## Mix Proportion Optimization of High Quality Recycled Coarse Aggregate Concrete

GUO Yuanxin, LI Qiuyi, LI Qianqian, YUE Gongbing

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, China, 266033)

**Abstract:** The effect of cementitious material content, cement/water ratio and replacement rate of recycled coarse aggregate on workability and mechanical properties of recycled coarse aggregate concrete was researched to attain the optimization of the mix proportion of the recycled aggregate to the maximum engineering application. By linear regression method the recycled coarse aggregate concrete compressive strength and the cost of raw materials were considered to make sure the mechanical properties and the lowest cost requirements in different strength grades of recycled coarse aggregate concrete. It is found that the water consumption-replacement rate and compressive strength-cementitious materials content or cement/water ratio of recycled coarse aggregate concrete all showed good linear relationship; compared with the natural aggregate concrete, the maximum increase of water consumption is only 7.1%, and the maximum difference of 28d compressive

收稿日期:2016-09-28

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51378270;51578297)

作者简介:郭远新(1989—),男,博士研究生,主要从事再生建筑材料的应用研究.

sive strength is only 6.4MPa, and the largest decline in the cost of raw materials up by 31.3% after optimization of mix proportion. The class I recycled coarse aggregate can be used to prepare the recycled coarse aggregate concrete which strength grade in a range of C20 ~ C40. Moreover, the optimum mix proportion of high quality recycled coarse aggregate concrete can bring a good engineering applicability and economy, and effectively expand the scope of the use of recycled coarse aggregate.

**Key words:** recycled coarse aggregate concrete; compressive strength; raw material cost; mix proportion optimization

相比较日本、德国和美国等发达国家,我国的再生混凝土技术<sup>[1]</sup>研究起步较晚,并且建筑垃圾<sup>[2-3]</sup>来源复杂、品质波动性较大,再生混凝土的性能<sup>[4-6]</sup>要求很难得以保证,故而在应用上只能用于强度较低的混凝土制品。但相关研究表明,利用这些品质较差的再生骨料制备的再生混凝土制品的性能要远远低于普通混凝土制品,主要表现在用水量较多、弹性模量较低、强度降低幅度较大,而抗冻性、抗碳化性、抗渗性和抗硫酸盐腐蚀性等耐久性能<sup>[7-10]</sup>更要低于天然骨料混凝土。

考虑到再生骨料的品质要远远低于天然骨料,并且使得再生骨料和再生混凝土的推广与应用<sup>[11]</sup>受到严重地限制。故笔者采用青岛理工大学李秋义教授提出的颗粒整形强化工艺来制备高品质(国家 I 类骨料品质标准)再生粗骨料<sup>[12-14]</sup>,以此拌制高品质再生粗骨料混凝土,重点研究高品质再生粗骨料对再生混凝土工作性及力学性能<sup>[15-16]</sup>的影响规律,并在此数据基础之上采用线性回归拟合方法对再生粗骨料混凝土的 28 d 抗压

强度进行线性回归拟合。根据得到的抗压强度-胶凝材料用量线性回归方程式对再生粗骨料混凝土不同强度等级的配合比进行初步优化,然后再依据再生粗骨料混凝土的原材料最低成本原则,对其配合比进行进一步地优化,使再生粗骨料混凝土在满足力学性能<sup>[17-18]</sup>的前提下达到经济利益和环境利益的最大化。

## 1 试验

### 1.1 原材料性能

细骨料采用细度模数为 2.4 的 II 级天然河砂;天然粗骨料采用 5 ~ 25 mm 连续级配的青岛产花岗岩碎石;外加剂采用江苏博特材料公司生产的聚羧酸高性能减水剂;拌合水采用市政饮用水;水泥采用青岛山水水泥厂生产的 P·O 42.5 水泥;高品质再生粗骨料是由青岛某拆迁现场的建筑垃圾在简单破碎后采用颗粒整形强化工艺制备而成,其性能指标的测定按照《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177—2010),具体数据见表 1。

表 1 再生粗骨料的基本性能

Table 1 Basic performance indexes of recycled coarse aggregate

骨料类别	表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	空隙率/%	吸水率/%	压碎指标/%	坚固性/%
I 类	2 475	1 407	43	1.7	9	3.1

### 1.2 试验方法

采用颗粒整形强化工艺制备高品质再生粗骨料,使其各项性能指标达到《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177—2010)中所要求的 I 类骨料标准。再生粗骨料混凝土拌合时

按照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2002)的要求,试件长宽高为 100 mm × 100 mm × 100 mm。在温度为 (20 ± 2) °C、相对湿度为 95% 以上的标准养护条件下分别养护至 3 d、7 d 和 28 d 龄期,

抗压强度的测定按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)的要求。

### 1.3 方案设计

再生粗骨料混凝土的试验配合比是按照《再生骨料应用技术规程》(JGJ/T 240—2011)的要求来进行计算的,其中配合比的变量因素设计为:①胶凝材料(水泥)的用量 $B$ : $300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $350 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $450 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;② I类再生粗骨料的取代率 $\lambda_g$ : $0\%$ 、 $20\%$ 、 $40\%$ 、 $60\%$ 、 $80\%$ 和 $100\%$ ;③再生粗骨料混凝土的砂率采用 $40\%$ ,外加剂用量为胶凝材料用量的 $1.2\%$ ;④通过控制再生粗骨料混凝土拌合物的坍落度在 $(180 \pm 20) \text{ mm}$ 来调整其用水量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 再生粗骨料混凝土的工作性能

当再生粗骨料混凝土拌合物达到相同的和易性时,其用水量如图1所示。

由图1可以看出,再生粗骨料的取代率越大,则相应混凝土拌合物的用水量越多,并且均呈现出较好的线性关系,线性相关度较高。当再生粗骨料混凝土的胶凝材料用量为 $300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,再生粗骨料的取代率达到 $100\%$ 时,其用水量达到最大值,为 $160.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,相比较天然粗骨料混凝土仅增加 $10.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,这是因为在试验过程中为了保证再生粗骨料混凝土与天然粗骨料混

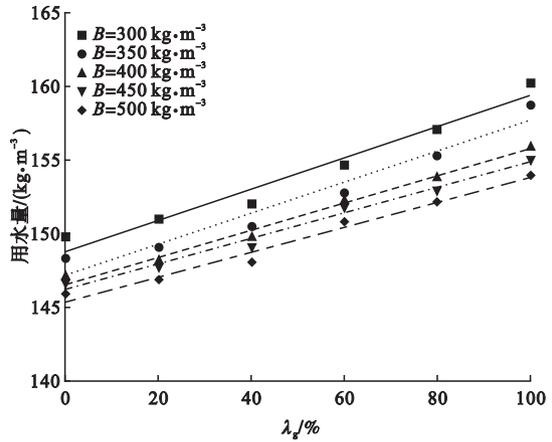


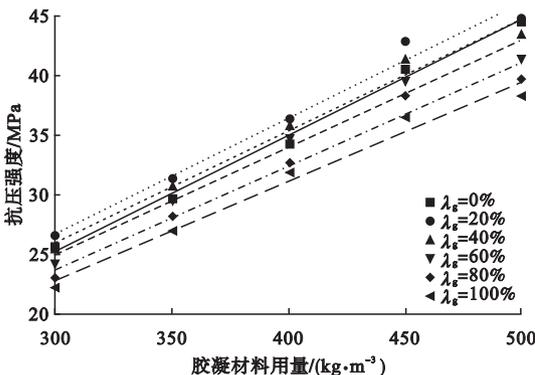
图1 再生粗骨料混凝土的用水量

Fig. 1 Water consumption of recycled coarse aggregate concrete

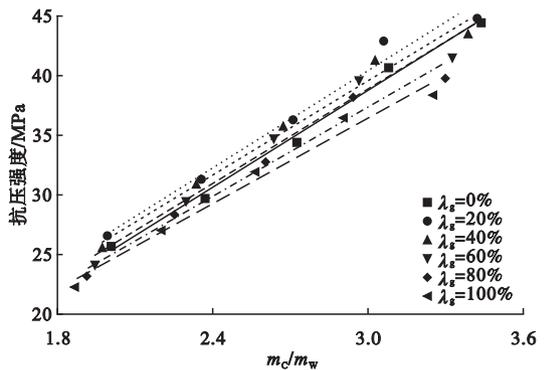
凝土达到相同的和易性,其用水量势必有所增多。与此同时,再生粗骨料混凝土的用水量随着胶凝材料用量的增加而呈现出减小趋势,并且随着再生粗骨料取代率的增大,用水量的差值越大,出现这种情况的原因是当再生粗骨料混凝土的胶凝材料用量较多时,其和易性更易达到相应的要求,故而拌合物所需用水有所减少,但此时部分水分会进入到再生粗骨料的裂纹内部,导致再生粗骨料混凝土用水量的差值加大。

### 2.2 再生粗骨料混凝土的力学性能

在不同的标准养护龄期条件下,再生粗骨料混凝土的抗压强度与胶凝材料用量、胶浆质量比的线性回归拟合关系如图2所示,其中28 d抗压强度与胶凝材料用量的线性回归方程式见表2。



(a) 3 d抗压强度-胶凝材料用量



(b) 3 d抗压强度-胶浆质量比

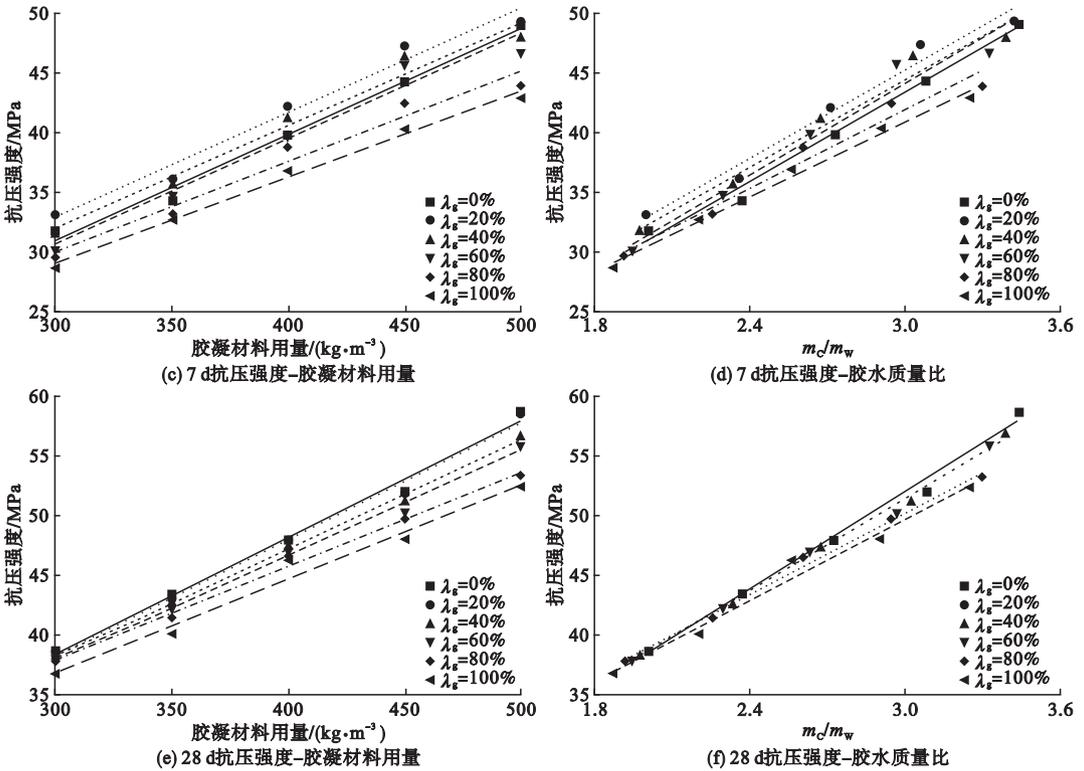


图2 再生粗骨料混凝土抗压强度-胶凝材料用量/胶水质量比线性回归拟合关系

Fig. 2 Linear regression fitting relationship between compressive strength and cementitious material content or cement/ water ratio of recycled coarse aggregate concrete

表2 再生粗骨料混凝土 28d 抗压强度与胶凝材料用量的线性回归方程式

Table 2 Linear regression equation of 28d compressive strength and cementitious material content of recycled coarse aggregate concrete

$\lambda_g/\%$	线性回归方程式
0	$f_{cu,0} = 0.097B + 9.26$
20	$f_{cu,0} = 0.097B + 9.16$
40	$f_{cu,0} = 0.091B + 10.68$
60	$f_{cu,0} = 0.088B + 11.56$
80	$f_{cu,0} = 0.078B + 14.44$
100	$f_{cu,0} = 0.078B + 13.38$

注:表中  $f_{cu,0}$  为再生粗骨料混凝土试验的抗压强度, MPa.

从图2可以得到以下结论:

(1)再生粗骨料混凝土在各个龄期的抗压强度随着胶凝材料用量的增加而逐渐升高,表现出非常好的线性关系,线性相关度非常高.这是因为胶凝材料用量的增加使得再

生粗骨料混凝土内部的水泥浆体变多,其与再生粗骨料之间的界面粘结强度得以增强,再生粗骨料混凝土在受压破坏时可以承受更多的荷载,抗压强度必然升高.

(2)随着胶水质量比的增大,再生粗骨料混凝土在不同龄期的抗压强度均逐渐升高,表现出非常好的线性关系,线性相关度非常高,并且当胶水质量比较小时,再生粗骨料混凝土的抗压强度与天然粗骨料混凝土的抗压强度差值较小.由此可以表明,影响再生粗骨料混凝土抗压强度的因素中:胶水质量比 > 取代率.

(3)随着标准养护龄期的延长,再生粗骨料混凝土的抗压强度逐渐升高,并且在较低的取代率时其抗压强度增长速率明显要快于天然粗骨料混凝土,这一点可以在3d或7d的抗压强度中体现出来.出现这种现象的原因是再生粗骨料混凝土中的再生粗骨料在

拌合过程中会吸收一部分水分进入其内部,但随着水泥水化反应过程的进行,这一部分水分会释放出来,从而加速了水泥水化的进程,使得再生粗骨料混凝土的早期强度发展加快。

(4)再生粗骨料混凝土在不同标准养护龄期的抗压强度均随着取代率的增大而逐渐降低,当再生粗骨料的取代率为100%,胶凝材料用量为 $500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,28 d抗压强度达到52.3 MPa,相比较同条件下的天然粗骨料混凝土仅减少10.9%。另外,再生粗骨料混凝土在受压状态下发生破坏时,大部分断裂面发生在粗骨料与水泥浆体之间的界面粘结处和水泥砂浆薄弱部位,仅有极少数的断裂面发生于再生粗骨料本身,这表明再生粗骨料混凝土的受压破坏形态与天然粗骨料混凝土比较相似,故I类再生粗骨料可以取代天然粗骨料用于混凝土中或其他相关的水泥制品。

### 3 配合比优化

#### 3.1 依据力学性能对试验配合比进行初次优化

根据《再生骨料应用技术规程》(JGJ/T 240—2011)的规定,I类再生粗骨

表4 配合比初次优化后再生粗骨料混凝土的胶凝材料用量

Table 4 Cementitious material content used for recycled coarse aggregate concrete after the initial optimization

强度等级	胶凝材料用量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )					
	$\lambda_g = 0\%$	$\lambda_g = 20\%$	$\lambda_g = 40\%$	$\lambda_g = 60\%$	$\lambda_g = 80\%$	$\lambda_g = 100\%$
C20	177	180	175	171	156	169
C25	245	248	248	246	241	254
C30	296	300	303	303	305	319
C35	363	368	376	379	390	404
C40	414	420	431	435	454	468

#### 3.2 依据原材料成本进一步优化配合比

再生粗骨料混凝土的试验配合比在初次优化后,同一强度等级下I类再生粗骨料的取代率由0%递增到100%均可,但此时每一个配合比所对应的原材料用量均不相同,且

料可用于配制各种强度等级的混凝土,其取代率可不受限制,再生粗骨料混凝土配制强度为

$$f_{\text{cu},0} \geq f_{\text{cu},k} + 1.645\sigma. \quad (1)$$

式中: $f_{\text{cu},0}$ 为再生粗骨料混凝土的配制强度,MPa; $f_{\text{cu},k}$ 为再生粗骨料混凝土的设计强度等级值,MPa; $\sigma$ 为再生粗骨料混凝土的强度标准差,MPa,其推荐值见表3。

表3 再生粗骨料混凝土抗压强度标准差推荐值

Table 3 Standard deviation recommendation of compressive strength of recycled coarse aggregate concrete

强度等级	$\sigma$ /MPa
$\leq \text{C20}$	4.0
C25、C30	5.0
C35、C40	6.0

根据式(1)和表2中再生粗骨料混凝土28 d抗压强度与胶凝材料用量的线性回归方程式,可以计算出在各个取代率下不同强度等级(C20~C40)的再生粗骨料混凝土的胶凝材料用量(见表4),即为根据再生粗骨料混凝土力学性能对试验配合比进行初次优化后的胶凝材料用量,配合比中的其他组分量便可依次计算出来。

原材料的成本也相差很多。故在此根据再生粗骨料混凝土的原材料成本对初步优化后的配合比进一步优化。优化原则是当强度等级相同时,以再生粗骨料混凝土的原材料成本最低为首选。

再生粗骨料混凝土用原材料价格分别为:①天然河砂:45元·t<sup>-1</sup>;②天然碎石:35元·t<sup>-1</sup>;③聚羧酸高性能减水剂:4500元·t<sup>-1</sup>;④P·O 42.5水泥:320元·t<sup>-1</sup>;⑤ I类再生粗骨料:为实现再生骨料的资源化利用,以0元·t<sup>-1</sup>计。经计算后,各取代率下再生粗骨料混凝土在不同强度等级时的原材料成本如图3所示。

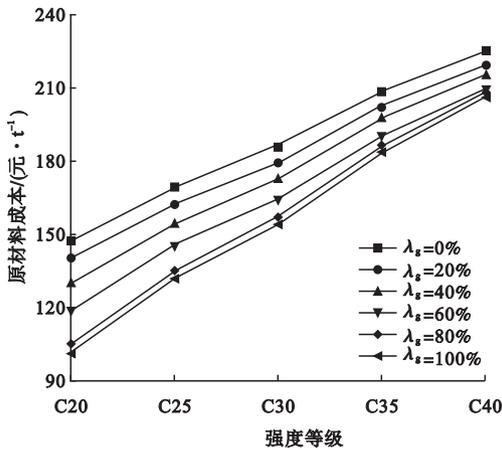


图3 再生粗骨料混凝土原材料成本

Fig. 3 Raw material costs of recycled coarse aggregate concrete

由图3可以看出, I类再生粗骨料在各个取代率下均可用于制备强度等级为C20~C40的再生粗骨料混凝土,其原材料成本随着取代率的增大而逐渐减少,并且在强度等级较低时其原材料成本差较大,即当再生粗骨料混凝土的强度等级为C20时,取代率为100%的原材料成本仅为101元·t<sup>-1</sup>,相比较天然粗骨料混凝土减少了31.3%。再生粗骨料混凝土的原材料成本随着强度等级的增加而显著变多,当取代率为100%,强度等级为C40时,其原材料成本达到206元·t<sup>-1</sup>,但仍要比天然粗骨料混凝土少19元·t<sup>-1</sup>。故在满足再生骨料最大利用率的条件下,可以利用 I类再生粗骨料100%取代天然粗骨料制备再生混凝土,优化后的配合比见表5,以此来促进再生骨料资源化利用所带来的经济效益和环境效益。

表5 再生粗骨料混凝土优化后配合比

Table 5 Optimum mix proportion of recycled coarse aggregate concrete

强度等级	优化后配合比用量/(kg·m <sup>-3</sup> )			
	胶凝材料	再生粗骨料	天然河砂	外加剂
C20	101	1 257	838	2.0
C25	131	1 187	791	3.0
C30	153	1 137	758	3.8
C35	183	1 073	716	4.8
C40	206	1 029	686	5.6

## 4 结论

(1)为实现再生粗骨料的工程应用最大化,可以控制建筑垃圾的来源制备不同品质的再生粗骨料,其中 I类再生粗骨料可以100%取代天然粗骨料用于制备C20~C40的再生粗骨料混凝土,并且原材料成本要低于天然粗骨料混凝土。

(2)随着胶凝材料用量的减少和 I类再生粗骨料取代率的增大,高品质再生粗骨料混凝土的用水量均逐渐增多,所呈现出的线性关系较好,其最大用水量相比天然粗骨料混凝土仅增加7.1%。

(3)高品质再生粗骨料混凝土的抗压强度随着胶凝材料用量的增加和胶水质量比的增大而逐渐升高,线性相关度非常高,且与天然粗骨料混凝土的28 d抗压强度最大差值仅为6.4 MPa。

(4)高品质再生粗骨料混凝土的抗压强度随着取代率的增大而逐渐降低,但影响较小,并且其早期抗压强度增长速率明显要快于天然粗骨料混凝土。

## 参考文献

- [1] 李秋义,高嵩,薛山.绿色混凝土技术[M].北京:中国建材工业出版社,2014.  
(LI Qiuyi, GAO Song, XUE Shan. Green concrete technology [M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2014.)
- [2] MONALISA B, BHATTACHARYYA S K, MINOCHA A K, et al. Recycled aggregate

- from C & D waste and its use in concrete-A break through towards sustainability in construction sector: A Review [J]. Construction and building materials, 2014, 68: 501 - 516.
- [ 3 ] XIAO J Z, LI W G, HUANG Y H. An overview of study on recycled aggregate concrete in China ( 1996—2011 ) [ J ]. Construction and building materials, 2012, 31: 364 - 383.
- [ 4 ] 谭红霞, 范志甫, 汪超平, 等. 再生混凝土基本性能试验研究 [ J ]. 湘潭大学学报 ( 自然科学版 ), 2011, 33 ( 3 ): 65 - 69.  
( TAN Hongxia, FAN Zhifu, WANG Chaoping. Experimental research on basic properties of recycled concrete [ J ]. Journal of Xiangtan university ( natural science ), 2011, 33 ( 3 ): 65 - 69. )
- [ 5 ] 汪振双, 崔正龙. 再生粗集料混凝土双变量强度公式研究 [ J ]. 沈阳大学学报 ( 自然科学版 ), 2013, 25 ( 1 ): 69 - 71.  
( WANG Zhenshuang, CUI Zhenglong. Bivariate strength formula for recycled coarse aggregate concrete [ J ]. Journal of Shenyang university ( natural science ), 2013, 25 ( 1 ): 69 - 71. )
- [ 6 ] LI J S, XIAO H N, ZHOU Y. Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete [ J ]. Construction and building materials, 2009, 23 ( 3 ): 1287 - 1291.
- [ 7 ] THOMAS C, SETIEN J, POLANCO J A, et al. Durability of recycled aggregate concrete [ J ]. Construction and building materials, 2013, 40: 1054 - 1065.
- [ 8 ] ZHU Y G, KOU S C, POON C S, et al. Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete [ J ]. Cement and concrete composites, 2013, 35 ( 1 ): 32 - 38.
- [ 9 ] KOU S C, POON C S, AGRELA F. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures [ J ]. Cement and concrete composites, 2011, 33 ( 8 ): 788 - 795.
- [ 10 ] 肖建庄, 林壮斌, 朱军. 再生骨料级配对混凝土抗压强度的影响 [ J ]. 四川大学学报 ( 工程科学版 ), 2014, 46 ( 4 ): 154 - 160.  
( XIAO Jianzhuang, LIN Zhuangbin, ZHU Jun. Effects of recycled aggregates gradation on compressive strength of concrete [ J ]. Journal of Sichuan university ( engineering science edition ), 2014, 46 ( 4 ): 154 - 160. )
- [ 11 ] LI X P. Recycling and reuse of waste concrete in China: Part II. Structural behavior of recycled aggregate concrete and engineering applications [ J ]. Conservation and recycling, 2009, 53 ( 3 ): 107 - 112.
- [ 12 ] 李秋义, 朱亚光, 高嵩. 我国高品质再生骨料制备技术及质量评定方法 [ J ]. 青岛理工大学学报, 2009, 30 ( 4 ): 1 - 4.  
( LI Qiuyi, ZHU Yaguang, GAO Song. Study on the preparation technique and quality evaluation method of high quality recycled aggregate [ J ]. Journal of Qingdao university of technology, 2009, 30 ( 4 ): 1 - 4. )
- [ 13 ] 王晓飞. 再生粗骨料品质和取代率对再生混凝土力学性能的影响 [ D ]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.  
( WANG Xiaofei. Influence of quality and substitution rate of recycled coarse aggregate on mechanical performances of recycled concrete [ D ]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2015. )
- [ 14 ] SUI Y W, MUELLER A. Development of thermo-mechanical treatment for recycling of used concrete [ J ]. Materials and structures, 2012, 45 ( 10 ): 1487 - 1495.
- [ 15 ] 张向冈, 陈宗平, 薛建阳. 再生混凝土的物理与力学性能试验研究 [ J ]. 硅酸盐通报, 2015, 34 ( 6 ): 1684 - 1689.  
( ZHANG Xianggang, CHEN Zongping, XUE Jianyang. Physical and mechanical performance of recycled aggregate concrete [ J ]. Bulletin of the chinese ceramic society, 2015, 34 ( 6 ): 1684 - 1689. )
- [ 16 ] 周静海, 何海进, 孟宪宏, 等. 再生混凝土基本力学性能试验 [ J ]. 沈阳建筑大学学报 ( 自然科学版 ), 2010, 26 ( 3 ): 464 - 468.  
( ZHOU Jinghai, HE Haijin, MENG Xianhong, et al. Basic mechanical properties of recycled concrete experimental study [ J ]. Journal of Shenyang jianzhu university ( natural science ), 2010, 26 ( 3 ): 464 - 468. )
- [ 17 ] CORINALDESI V. Mechanical and elastic behavior of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates [ J ]. Construction and building materials, 2010, 24 ( 9 ): 1616 - 1620.
- [ 18 ] DEBIEB F, COURARD L, KENAI S, et al. Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates [ J ]. Cement and concrete composites, 2010, 32 ( 6 ): 421 - 426.