

# 再生粗骨料混凝土配合比简易设计方法

郭远新<sup>1</sup>,李秋义<sup>1</sup>,单体庆<sup>1</sup>,刘桂宾<sup>2</sup>,高嵩<sup>1</sup>,徐庆宝<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学土木工程学院,山东 青岛 266033;2. 青岛青建新型材料集团有限公司,山东 青岛 266108)

**摘要** 目的 研究再生混凝土的配合比,提出科学的再生混凝土的配合比设计方法,为大力推广再生骨料和再生混凝土的生产与应用.方法 通过分析再生粗骨料混凝土用水量的复杂性,系统研究再生粗骨料的品质和取代率等因素对再生粗骨料混凝土工作性能、力学性能的影响规律,以及不同用水量和水胶质量比在配合比设计时所带来的影响大小.结果 再生粗骨料混凝土的各个用水量与再生粗骨料的品质和取代率均呈现出较好的线性关系,其强度与各胶水质量比之间也均呈现出较好的线性关系,但其工作性能和力学性能受再生粗骨料品质和取代率的影响存在着较大的差别.结论 所提出的再生粗骨料混凝土配合比简易设计方法采用有效用水量原则和绝对水胶质量比原则,具有很好的工程适用性和推广性,可为推动再生混凝土及其制品应用提供坚实的理论基础.

**关键词** 配合比设计;再生粗骨料混凝土;有效用水量;绝对水胶质量比;强度

中图分类号 TU528.01 文献标志码 A

## Simplified Design Method for Mix Proportion of Recycled Coarse Aggregate Concrete

GUO Yuanxin<sup>1</sup>, LI Qiuyi<sup>1</sup>, SHAN Tiqing<sup>1</sup>, LIU Guibin<sup>2</sup>, GAO Song<sup>1</sup>, XU Qingbao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, China, 266033; 2. Qingdao Qingjian New Materials Co., Ltd, Qingdao, China, 266108)

**Abstract:** In order to vigorously promote the production and application of recycled concrete, the design method of mix proportion of recycled concrete is studied, and the scientific design method of mix proportion of recycled concrete is put forward. The method is through the analysis of recycled coarse aggregate concrete with content complexity, and systematic study on the influence of recycled coarse aggregate quality and replacement rate on the performance and mechanical properties of recycled coarse aggregate concrete, and different effects in the mix proportion design caused

收稿日期:2017-08-25

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51378270,51578297);山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2017ZC0737);山东省博士后创新项目专项资金项目(201502003);青岛市拆除建筑垃圾高效资源化关键技术与产业化应用研究项目(402019201700013)

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与理论研究.

by water consumption and water/cement ratio. The result shows that, the recycled coarse aggregate concrete with water consumption and recycled coarse aggregate quality and replacement rate showed a good linear relationship, and the strength-cement/water ratios is also. However, the influence of quality and replacement rate of recycled coarse aggregate on the working performance and mechanical properties of recycled coarse aggregate concrete is different greatly. So, the simplified design method for mix proportion of using effective water consumption principle and the absolute water/cement ratio principle with recycled coarse aggregate concrete is proposed; it has good engineering applicability and popularization, and can provide a solid theoretical foundation for the application of recycled concrete and its products.

**Key words:** mix proportion design; recycled coarse aggregate concrete; effective water consumption; absolute water/cement ratio; strength

近年来,随着建筑业大力发展,建筑垃圾的出现给世界各国带来了一系列严峻问题<sup>[1-3]</sup>. 针对这一现状,国内外学术界、工程界等针对再生骨料的应用<sup>[4]</sup>与再生混凝土的配合比设计方法<sup>[5]</sup>进行了广泛研究. 高丹盈等<sup>[6]</sup>针对再生骨料混凝土的配合比设计参数进行了研究;李俊<sup>[7]</sup>、Ge Z<sup>[8]</sup>等分别采用正交试验设计方法对再生黏土砖粉或再生骨料混凝土的配合比进行了试验设计;王彦等<sup>[9]</sup>提出基于骨架原则的再生骨料多孔混凝土配合比设计方法;赵玉青<sup>[10]</sup>、邢振贤<sup>[11]</sup>等通过正交设计分析了粉煤灰再生混凝土的最佳配合比. 但多数研究<sup>[12-14]</sup>都是针对特定的再生骨料而进行的,并没有涵盖所有品质的再生骨料,难以形成普遍适用的再生混凝土配合比设计理论.

另外,我国住房和城乡建设部在2011年12月1日发布实施的行业标准《再生骨料应用技术规程》(JGJ/T 240—2011)<sup>[15]</sup>中只给出了再生混凝土的配制原则,并不利于再生骨料的工程应用. 基于此,笔者在系统研究再生粗骨料品质、再生粗骨料取代天然粗骨料的方式及取代率、不同水胶质量比等因素对再生粗骨料混凝土用水量和28 d抗压强度<sup>[16-17]</sup>的影响规律,在此基础上科学建立再生粗骨料混凝土的配合比简易设计方法,从而让再生混凝土的配合比设计实现简易化和规范化,这对于推广再生混凝土的工程应用

和确保工程质量具有十分重要的意义.

## 1 再生粗骨料混凝土用水量的复杂性

与天然粗骨料相比,再生粗骨料的品质较差. 但在使用再生粗骨料制备再生混凝土时,对再生粗骨料混凝土拌合物的工作性能影响最大的是再生粗骨料的吸水率. 因此,笔者针对再生粗骨料的的不同使用状态,将再生粗骨料混凝土拌合物的用水量定义为3种不同的情况.

①当再生粗骨料在使用时达到吸水饱和和面干状态,再生粗骨料混凝土拌合物的用水量定义为“有效用水量”,以“ $W_{g_0}$ ”来表示;则再生粗骨料混凝土的水胶质量比定义为“有效水胶质量比”,以“ $W_{g_0}/C$ ”来表示. 此时,再生粗骨料混凝土拌合物的用水量与普通混凝土之间的关系为

$$W_{g_0} = W. \quad (1)$$

式中: $W$ 为普通混凝土的用水量, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

②当再生粗骨料在使用时达到绝干状态,再生粗骨料混凝土拌合物的用水量定义为“绝对用水量”,以“ $W_{R_g}$ ”来表示;则再生粗骨料混凝土的水胶质量比定义为“绝对水胶质量比”,以“ $W_{R_g}/C$ ”来表示. 此时,再生粗骨料混凝土拌合物的用水量与普通混凝土之间的关系为

$$W_{R_g} = W + m_{R_g}\omega_a. \quad (2)$$

式中: $m_{Rg}$ 为再生粗骨料的用量,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $\omega_a$ 为再生粗骨料的吸水率,以小数来表示.

③当再生粗骨料在使用时为自然环境状态下,再生粗骨料混凝土拌合物的用水量定义为“外加用水量”,以“ $W_g$ ”来表示;则再生粗骨料混凝土的水胶质量比定义为“实际水胶质量比”,以“ $W_g/C$ ”来表示.此时,再生粗骨料混凝土拌合物的用水量与普通混凝土之间的关系为

$$W_g = W + m_{Rg}\omega_a - m_{Rg}\omega_c \quad (3)$$

式中: $\omega_c$ 为再生粗骨料的含水率,以小数来表示.

表1 再生粗骨料的基本性能指标

Table 1 Basic performance indexes of recycled coarse aggregate

骨料	颗粒级配	针片状颗粒质量分数/%	表观密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	堆积密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	空隙率/%	杂物质量分数/%	有害物质含量
SC-RCA	连续级配	6	2 430	1 360	44	0.8	符合要求
OP-RCA	连续级配	4	2 470	1 390	44	0.5	符合要求
DP-RCA	连续级配	1	2 480	1 410	43	0.1	符合要求
骨料	碱集料反应	微粉质量分数/%	泥块质量分数/%	吸水率/%	压碎指标/%	坚固性/%	骨料类别
SC-RCA	符合要求	1.9	0.6	3.7	18	8.9	Ⅱ类
OP-RCA	符合要求	1.1	0.2	2.3	15	5.7	Ⅱ类
DP-RCA	符合要求	0.8	0.1	1.7	9	3.1	I类

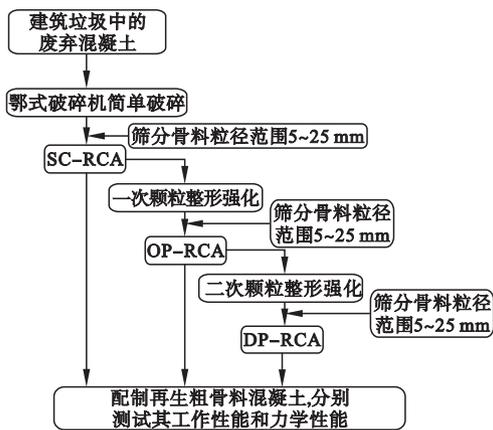


图1 再生粗骨料的制备工艺流程

Fig. 1 Preparation process of recycled coarse aggregate

## 2.2 其他原材料

水泥采用山东山水水泥厂生产的P. O 42.5水泥;天然细骨料采用Ⅱ类河砂,细度

## 2 试验设计

### 2.1 混凝土用再生粗骨料

笔者采用青岛理工大学提出的物理强化法——颗粒整形<sup>[18]</sup>强化工艺对简单破碎后再生粗骨料分别进行一次和二次强化处理,制备工艺流程如图1所示.强化处理后共得到3种不同品质的再生粗骨料,依次以“SC-RCA”、“OP-RCA”和“DP-RCA”来表示,然后参照《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177—2010)<sup>[19]</sup>分别测试其基本性能,具体性能指标见表1.

模数为2.4,含泥量为1.2%;天然碎石的来源为崂山产花岗岩,粒径范围为5~25mm的连续级配;外加剂采用聚羧酸减水剂,减水率在30%以上;水采用自来水.

### 2.3 试验方案

在不同的胶凝材料用量( $300 kg \cdot m^{-3}$ 、 $350 kg \cdot m^{-3}$ 、 $400 kg \cdot m^{-3}$ 、 $450 kg \cdot m^{-3}$ 和 $500 kg \cdot m^{-3}$ )体系下,采用3种不同品质的再生粗骨料以部分取代或全取代天然碎石的方式来制备再生粗骨料混凝土,取代率 $\lambda_g$ 的范围为0~100%,取代梯度为20%,试验过程中通过调整拌合物的用水量来控制再生粗骨料混凝土的坍落度在160~200mm,当再生粗骨料的取代率为0时,即为普通混凝土拌合物的用水量W.

## 3 试验结果与分析

### 3.1 再生粗骨料混凝土的用水量

#### 3.1.1 有效用水量

再生粗骨料混凝土的有效用水量与再生粗骨料取代率、品质之间的线性关系如图2所示。

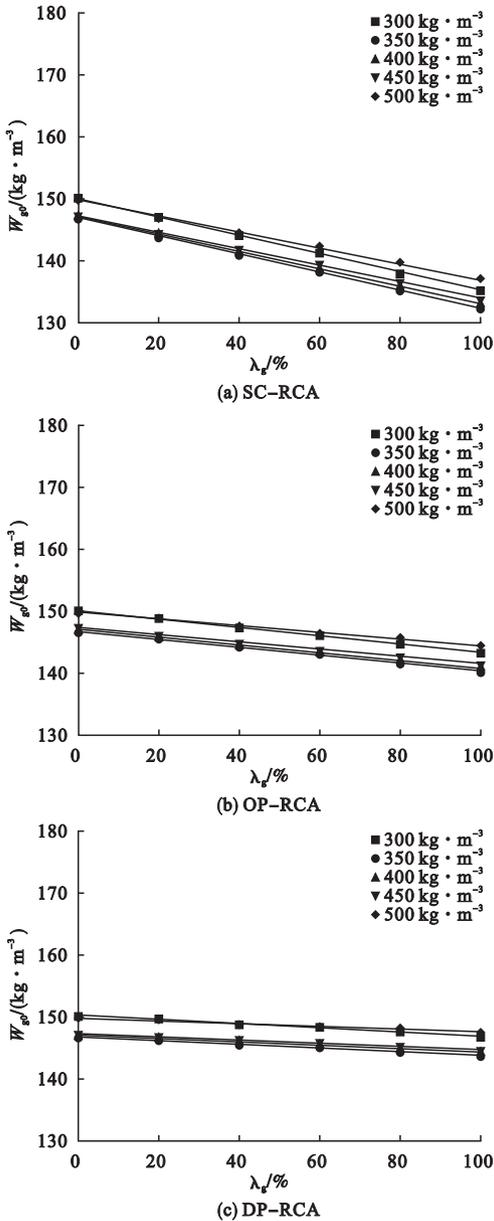


图2 取代率和品质对再生粗骨料混凝土有效用水量的影响

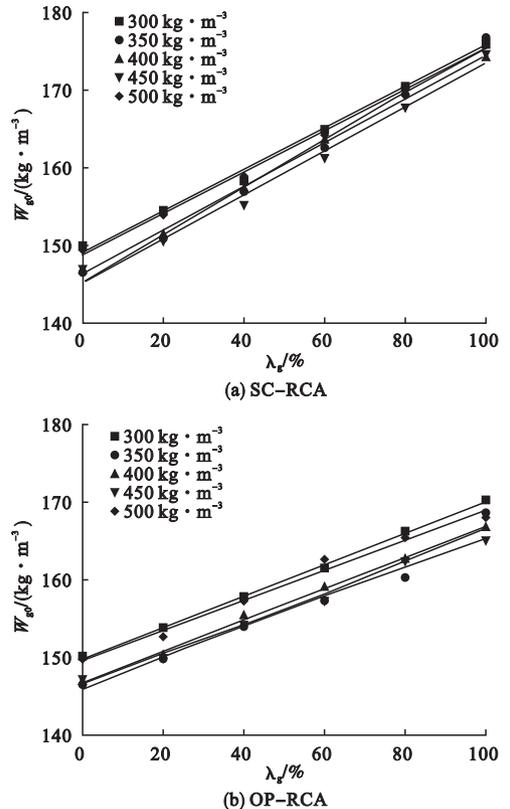
Fig.2 Influence of replacement rate and quality on effective water consumption of recycled coarse aggregate concrete

由图2可知,3种再生粗骨料混凝土的有效用水量均随着再生粗骨料取代率的增大而呈现降低的趋势,这是因为再生粗骨料的用量越大,从而导致再生粗骨料所吸收的水分越多,故在拌合再生粗骨料混凝土时所扣除的水分就越多.另一方面,随着再生粗骨料品质的提升,再生粗骨料的取代率对再生粗骨料混凝土拌合物的有效用水量影响越小,因为再生粗骨料品质的提升显著降低了其吸水率,使其性能逐渐接近于天然粗骨料,故再生粗骨料混凝土拌合物的有效用水量会逐渐接近于普通混凝土,从而使得再生粗骨料混凝土的配合比设计得以简化。

#### 3.1.2 绝对用水量

再生粗骨料混凝土的绝对用水量与再生粗骨料取代率、品质之间的线性关系如图3所示。

由图3可知,随着再生粗骨料取代率的增大,3种再生粗骨料混凝土的绝对用水量均逐渐增加,但随着再生粗骨料品质的提升



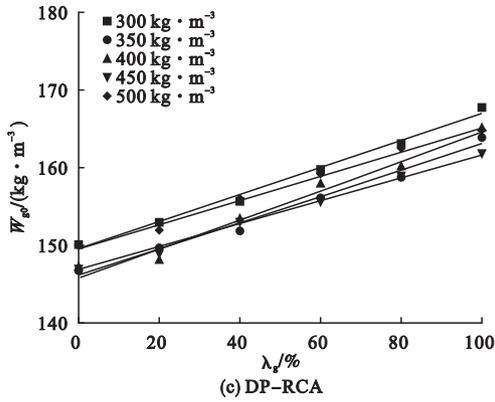


图3 取代率和品质对再生粗骨料混凝土绝对用水量的影响

Fig. 3 Influence of replacement rate and quality on absolute water consumption of recycled coarse aggregate concrete

增加趋势有所减缓. 与普通混凝土的用水量相比, 其绝对用水量最大增加幅度达 17.7%. 由此说明再生粗骨料混凝土的绝对用水量可以最大化地反映出普通混凝土与再生混凝土用水量的差别, 但在设计再生粗骨料混凝土的配合比时却较为麻烦, 并且在混凝土生产中这种差别反而增加了应用成本, 与实际利益产生冲突.

### 3.1.3 外加用水量

再生粗骨料混凝土的外加用水量与再生粗骨料取代率、品质之间的线性关系如图4所示.

由图4可知, 随着再生粗骨料的提升品质, 再生粗骨料混凝土的外加用水量与普通混凝土的用水量之差逐渐缩小, 且随着再生粗骨料取代率的增大而呈现出增加的趋势. 当在配制再生粗骨料混凝土时, 外加用水量的确定相对较为繁琐, 因为外加用水量不仅与再生粗骨料的吸水率有关, 还与当时大气环境的温湿度密切相关, 故而在设计再生粗骨料混凝土的配合比时非常繁琐, 且在实际生产应用中较难把控再生粗骨料混凝土的工作性能, 且误差较大.

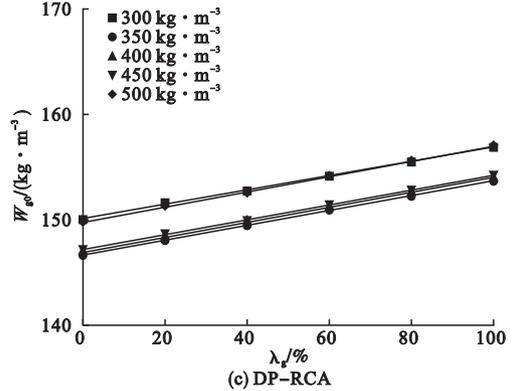
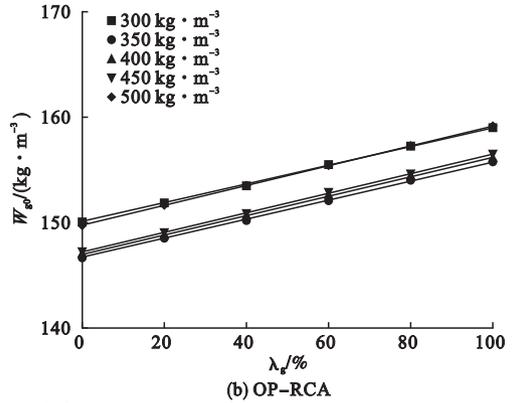
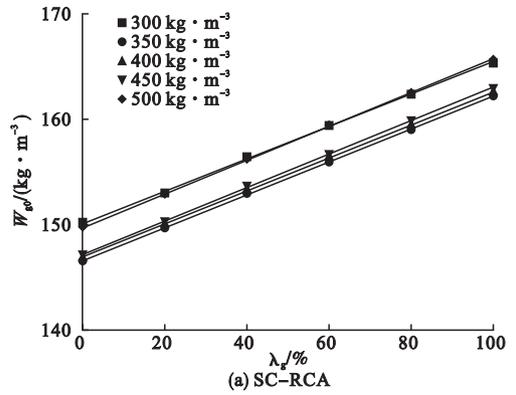


图4 取代率和品质对再生粗骨料混凝土外加用水量的影响

Fig. 4 Influence of replacement rate and quality on additional water consumption of recycled coarse aggregate concrete

综上所述, 3种再生粗骨料混凝土的有效用水量、绝对用水量和外加用水量均与再生粗骨料的取代率呈现出较好的线性关系, 且随着再生粗骨料品质的提升其各个用水量均有所降低. 但在配制再生粗骨料混凝土时, 所使用的再生粗骨料品质波动性较大, 为了缩小与普通混凝土的差别且配制过程更为方便简洁, 在准确掌控其工作性能的前提下使

用有效用水量是最佳的选择. 所以说,再生粗骨料混凝土的有效用水量是影响其工作性能的决定因素,即为再生粗骨料混凝土的有效用水量原则.

### 3.2 再生粗骨料混凝土强度与各胶水量比之间的关系

#### 3.2.1 有效胶水量质量比

再生粗骨料混凝土的28 d抗压强度与有效胶水量质量比、再生粗骨料取代率和品质之间的线性关系如图5所示.

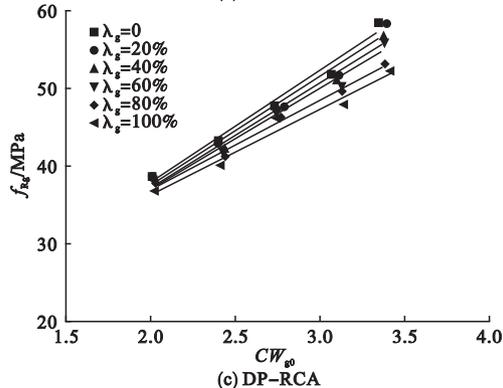
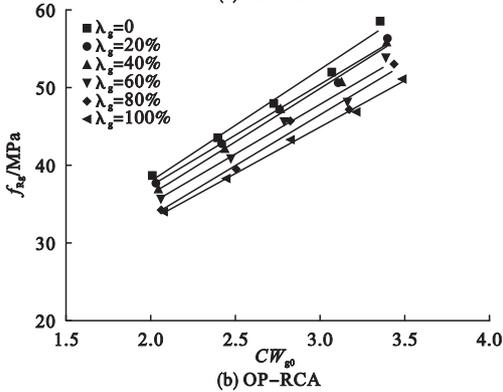
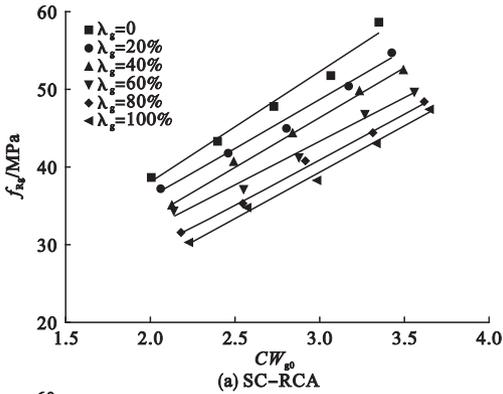


图5 再生粗骨料混凝土的强度-有效胶水量比

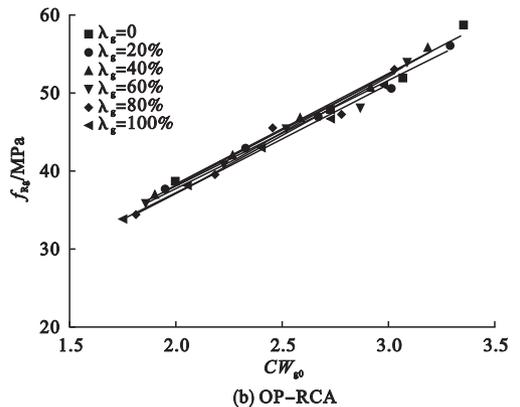
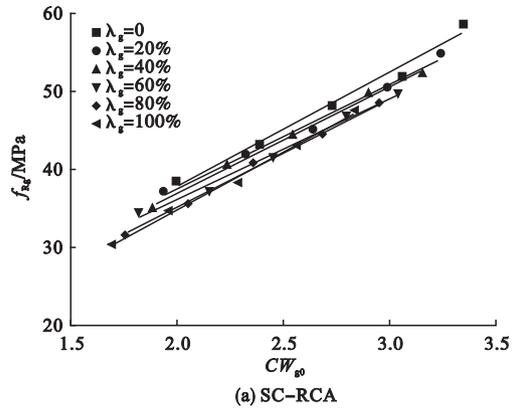
Fig. 5 Strength-effective cement/water ratio of recycled coarse aggregate concrete

由图5分析可知,再生粗骨料混凝土的28 d抗压强度随着有效胶水量质量比的增加均逐渐增强,且呈现出很好的线性关系,相关系数 $R^2$ 介于0.963~0.996.随着物理强化次数的增加,再生粗骨料的品质逐渐得到提升,不同取代率之间的混凝土强度差距有所减小,但与普通混凝土相比还是呈现出较大地强度损失.由此可以说明,在考虑有效胶水量质量比的情况下,再生粗骨料品质和取代率对再生粗骨料混凝土的抗压强度影响较大,这种情况对于再生粗骨料混凝土的配合比简易设计起到了反作用.

#### 3.2.2 绝对胶水量质量比

再生粗骨料混凝土的28 d抗压强度与绝对胶水量质量比、再生粗骨料取代率和品质之间的线性关系如图6所示.

由图6分析可知,再生粗骨料混凝土的28 d抗压强度随着绝对胶水量质量比的增加均逐渐增强,且呈现出非常好的线性关系,相



(b) OP-RCA

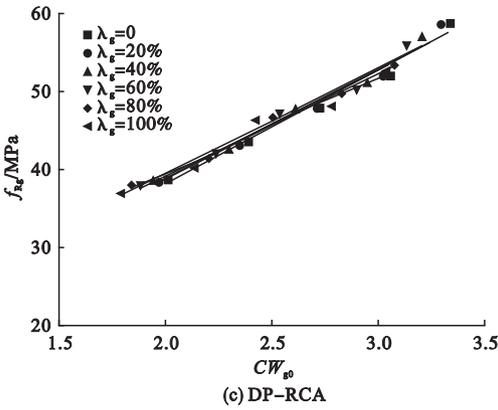


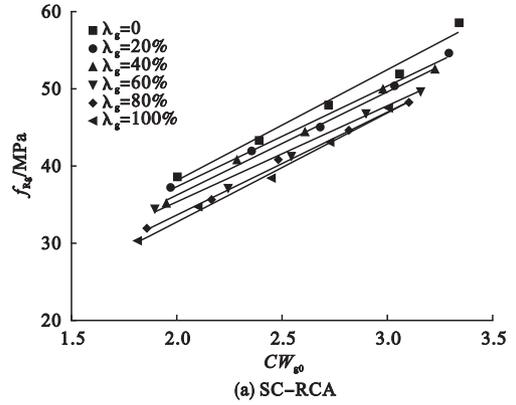
图6 再生粗骨料混凝土的强度-绝对胶水泥浆比  
Fig. 6 Strength - absolute cement/water ratio of recycled coarse aggregate concrete

关系数  $R^2$  介于 0.963 ~ 0.996, 线性相关度非常高. 当使用品质较高的二次物理强化再生粗骨料配制再生粗骨料混凝土时, 再生粗骨料不同取代率之间的强度差距逐渐趋向于零, 并且简单破碎再生粗骨料和一次物理强化再生粗骨料不同取代率之间的强度差距也非常. 所以笔者认为, 在考虑绝对胶水泥浆比的情况下, 再生粗骨料混凝土的抗压强度受再生粗骨料品质和取代率的影响较小, 故可以使用绝对水胶质量比这一定义来简化设计再生粗骨料混凝土的配合比.

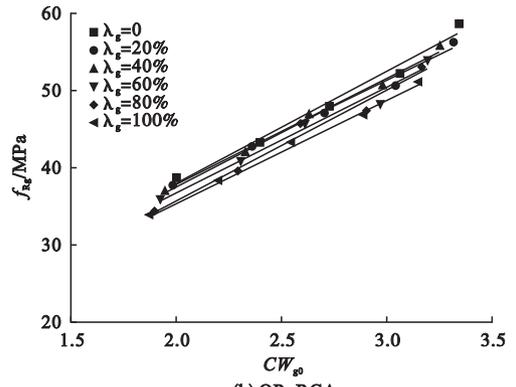
### 3.2.3 实际胶水泥浆比

再生粗骨料混凝土的 28 d 抗压强度与实际胶水泥浆比、再生粗骨料取代率和品质之间的线性关系如图 7 所示.

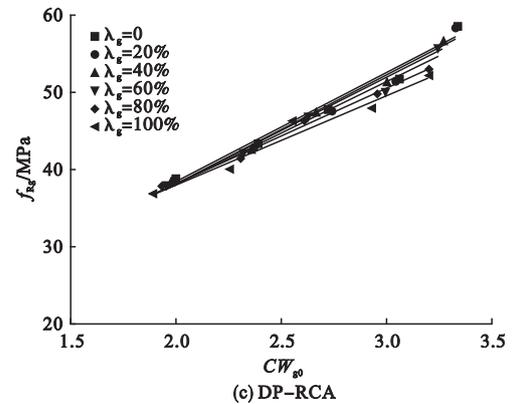
由图 7 分析可知, 再生粗骨料混凝土的 28 d 抗压强度随着实际胶水泥浆比的增加均逐渐增强, 且呈现出较好的线性关系, 相关系数  $R^2$  介于 0.961 ~ 0.996, 但此时, 随着再生粗骨料品质和取代率的变化, 其强度之间的差距逐渐缩小. 故可以说明, 在考虑实际胶水泥浆比的情况下, 再生粗骨料品质和取代率对再生粗骨料混凝土的抗压强度仍存在着一定的影响, 故在进行再生粗骨料混凝土配合比设计时可以起到一定的简化作用.



(a) SC-RCA



(b) OP-RCA



(c) DP-RCA

图7 再生粗骨料混凝土的强度-实际胶水泥浆比  
Fig. 7 Strength-actual cement/water ratio of recycled coarse aggregate concrete

综上所述, 3 种再生粗骨料混凝土的 28 d 抗压强度均与其有效胶水泥浆比、绝对胶水泥浆比和实际胶水泥浆比之间呈现出较好的线性关系, 即水胶质量比是影响再生粗骨料混凝土强度的主要因素, 这一结论与普通混凝土相一致. 故在此, 基于普通混凝土的 Bolomey 强度公式来计算 3 种再生粗骨料混凝土的强度及其强度误差, 笔者发现 3 种再生

粗骨料混凝土情况下所得到的结论一致,其强度计算误差由小到大依次为:绝对水胶质量比,实际水胶质量比,有效水胶质量比。故在配制再生粗骨料混凝土时,考虑到再生粗骨料的品质不一和由其带来的强度误差这两方面,使用再生粗骨料混凝土的绝对水胶质量比来确定其内部关系是配合比设计的最佳选择,即为再生粗骨料混凝土的绝对水胶质量比原则。

## 4 再生粗骨料混凝土配合比简易设计方法

### 4.1 配合比设计的基本思路

由于再生粗骨料混凝土的适用范围还仅限于非承重结构的低强度等级的混凝土制品,故在进行配合比设计时主要考虑有效用水量原则和绝对水胶质量比原则。但参照《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)<sup>[20]</sup>,普通混凝土用粗骨料的含水率应小于0.2%,考虑到品质不一的再生粗骨料吸水率过大,故在使用时可使再生粗骨料接近于吸水饱和面干状态,再生粗骨料吸水率与含水率之差可控制在小于0.5%。

### 4.2 配合比设计的具体步骤

(1)根据已有技术资料 and 混凝土性能要求,确定再生粗骨料的取代率 $\lambda_g$ 。

(2)确定再生粗骨料混凝土的强度标准差 $\sigma$ ,可按下列规定进行:①当仅使用Ⅰ类再生粗骨料或Ⅱ类、Ⅲ类再生粗骨料取代率 $\lambda_g$ 小于30%时, $\sigma$ 可按现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)<sup>[20]</sup>的规定取值。②当Ⅱ类、Ⅲ类再生粗骨料取代率 $\lambda_g$ 不小于30%时,其抗压强度标准差 $\sigma$ 可按现行行业标准《再生骨料应用技术规程》(JGJ/T 240—2011)的规定取值。

(3)再生粗骨料混凝土配制强度的确定:可按式(4)来计算。

$$f_{Rg} \geq f_{cu,k} + 1.645\sigma. \quad (4)$$

(4)再生粗骨料混凝土强度与绝对水胶质量比之间的关系如式(5)所示。

$$f_{Rg} = Af_{cc} [C / (W + m_{Rg}\omega_a) - B]. \quad (5)$$

(5)普通混凝土拌合物用水量 $W$ 的确定:在普通混凝土的试验过程中,为了保证拌合物的坍落度控制在工程具体需要的范围内,需要对普通混凝土拌合物的用水量进行调整,调整后的用水量即为普通混凝土拌合物的用水量 $W$ 。

(6)再生粗骨料混凝土拌合物有效用水量 $W_{g0}$ 的确定:基于普通混凝土拌合物的用水量 $W$ ,并根据再生粗骨料的使用状态和用水量来确定。

(7)胶凝材料、矿物掺合料和水泥用量的计算:1 m<sup>3</sup>再生粗骨料混凝土的胶凝材料用量应按式(6)来确定,如若掺加矿物掺合料,应根据其掺量计算矿物掺合料的用量和水泥用量。

$$m_{bg} = \frac{W_{g0} + m_{Rg}\omega_a}{W_{Rg}/C}. \quad (6)$$

(8)砂率的确定:应根据再生粗骨料的技术指标、混凝土拌合物的性能和施工要求来确定,但宜采用较低的砂率。

(9)粗、细骨料用量的计算:以普通混凝土配合比中的粗、细骨料用量为基础,根据已确定的再生粗骨料取代率 $\lambda_g$ 来计算再生粗骨料的用量,天然粗骨料用量为粗骨料与再生粗骨料的用量之差。

(10)配合比的试配:在计算配合比的基础上进行试拌,计算水胶质量比宜保持不变,通过调整配合比其他参数使再生粗骨料混凝土拌合物性能符合设计和施工要求,然后修正计算配合比,提出再生粗骨料混凝土的试拌配合比。

(11)配合比的调整与确定:在再生粗骨料混凝土试拌配合比的基础上,根据确定的水胶质量比调整用水量和外加剂用量,其他参数也应作相应调整,确定再生粗骨料混凝土的最终配合比。但在配制时,应根据工程具体要求采取控制再生粗骨料混凝土拌合物坍落度损失的相应措施。

## 5 结 论

(1) 针对再生粗骨料的的不同使用状态,再生粗骨料混凝土的用水量相比普通混凝土要复杂得多,可分为有效用水量、绝对用水量和外加用水量3种情况。

(2) 再生粗骨料混凝土的各个用水量均与再生粗骨料的品质和取代率呈现出较好的线性关系,但与普通混凝土相比,其用水量差距由小到大依次为:有效用水量,实际用水量,绝对用水量。

(3) 再生粗骨料混凝土的强度与各胶水质比之间均呈现出较好的线性关系,其强度受再生粗骨料品质和取代率的影响由小到大依次为:绝对水胶质量比,实际水胶质量比,有效水胶质量比。

(4) 再生粗骨料混凝土配合比在设计时采用有效用水量原则和绝对水胶质量比原则,这样不仅可以简化设计方法,而且可以使配制过程更为方便简洁,从而使得再生粗骨料混凝土的配合比设计实现规范化。

### 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] MEYER C. The greening of the concrete industry [J]. Cement and concrete composites, 2009, 31(8): 601-605.

[3] 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.

[4] PEDRO D, DE BRITO J, EVANGELISTA L. Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete [J]. Construction and building materials, 2014, 71: 141-151.

[5] 李俊,尹健,周士琼,等. 再生骨料混凝土配合比设计及改性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(6): 66-71.  
(LI Jun, YIN Jian, ZHOU Shiqiong, et al. Experimental research on the mix design and the modified of recycled aggregate concrete [J]. Journal of railway science and engineering, 2005, 2(6): 66-71.)

[6] 高丹盈,张丽娟,芦静云,等. 再生骨料混凝土配合比设计参数研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(1): 8-14.  
(GAO Danying, ZHANG Lijuan, LU Jingyun, et al. Research on design parameters of mix proportion for recycled aggregate concrete [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2016, 33(1): 8-14.)

[7] 李俊,尹健,周士琼,等. 基于正交试验的再生骨料混凝土强度研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(9): 43-46.  
(LI Jun, YIN Jian, ZHOU Shiqiong, et al. Study on the strength of recycled aggregate concrete based on orthogonal experiment [J]. China civil engineering journal, 2006, 39(9): 43-46.)

[8] GE Z, GAO Z L, SUN R J, et al. Mix design of concrete with recycled clay-brick-powder using the orthogonal design method [J]. Construction and building materials, 2012, 31: 289-293.

[9] 王彦,李传军,董波,等. 基于骨架原则的再生骨料多孔混凝土配合比设计方法探讨[J]. 中外公路, 2017, 37(2): 246-250.  
(WANG Yan, LI Chuanjun, DONG Bo, et al. Discussion on the design method of mix proportion of recycled aggregate porous concrete based on skeleton principle [J]. China and foreign highway, 2017, 37(2): 246-250.)

[10] 赵玉青,邢振贤. 超细粉煤灰配制碎砖骨料混凝土试验研究[J]. 混凝土, 2011, 264(10): 142-144.  
(ZHAO Yuqing, XING Zhenxian. Experimental study on application of double-doped technology to recycled concrete [J]. Concrete, 2011, 264(10): 142-144.)

[11] 邢振贤,刘利军,赵玉青,等. 碎砖骨料再生混凝土配合比研究[J]. 再生资源研究, 2006,

- (2);38-40.  
(XING Zhenxian, LIU Lijun, ZHAO Yuqing, et al. Research on the mixture of recycle brick aggregate concrete [J]. Renewable resources research,2006,(2):38-40.)
- [12] SUMAIYA B H, M. SHAHRIA ALAM. Mechanical behavior of three generations of 100% repeated recycled coarse aggregates concrete [J]. Construction and building materials, 2015,65:574-582.
- [13] CASUCCIO M, TORRIJOS M C, GIACCIO G, et al. Failure mechanism of recycled aggregate concrete [J]. Construction and building materials, 2008,22(7):1500-1506.
- [14] 郭远新,李秋义,李倩倩,等.高品质再生粗骨料混凝土配合比优化[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(1):19-25.  
(GUO Yuanxin, LI Qiuyi, LI Qianqian, et al. Experimental research on the mix proportion optimization of high quality recycled coarse aggregate concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33(1):19-25.)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.再生骨料应用技术规程:JGJ 240—2011 [S].北京:中国建筑工业出版社,2011.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for application of recycled aggregate: JGJ 240—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.)
- [16] RAHAL K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate [J]. Building and environment, 2007, 42(1):407-415.
- [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] 郭远新,李秋义,汪卫琴,等.再生粗骨料品质提升技术研究[J].混凝土,2015(6):134-138.  
(GUO Yuanxin, LI Qiuyi, WANG Weiqin, et al. Research on recycled coarse aggregate quality of enhancement technology [J]. Concrete, 2015(6):134-138.)
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.混凝土用再生粗骨料:GB 25177—2010 [S].北京:中国标准出版社,2011.  
(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Recycled coarse aggregate for concrete: GB 25177—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.)
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部.普通混凝土配合比设计规程:JGJ 55—2011 [S].北京:中国建筑工业出版社,2011.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for mix proportion of ordinary concrete: JGJ 55—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.)