

文章编号:1673-2049(2016)01-0008-07

# 再生骨料混凝土配合比设计参数研究

高丹盈,张丽娟,芦静云,闫兆强

(郑州大学 新型建材与结构研究中心,河南 郑州 450002)

**摘要:**通过再生骨料混凝土配合比试验,研究再生粗骨料材料性质对再生骨料混凝土配合比设计中水灰比、单方用水量和砂率等参数的影响;通过对试验结果的统计分析,建立了考虑再生骨料取代率影响的水胶比计算公式,考虑再生骨料吸水率和取代率影响的再生混凝土单方用水量计算公式,以及考虑再生骨料空隙率、取代率和表观密度影响的再生混凝土砂率计算公式。结果表明:再生骨料取代率、空隙率和吸水率对再生骨料混凝土配合比设计参数的影响较大;所得公式形式简单,反映了再生粗骨料的特点,提高了再生骨料混凝土配合比设计的精度,为再生混凝土配合比设计提供依据和参考。

**关键词:**再生骨料混凝土;配合比;水灰比;单方用水量;砂率;抗压强度

**中图分类号:**TU528 **文献标志码:**A

## Research on Design Parameters of Mix Proportion for Recycled Aggregate Concrete

GAO Dan-ying, ZHANG Li-juan, LU Jing-yun, YAN Zhao-qiang

(Research Center of New Style Building Material & Structure, Zhengzhou University,  
Zhengzhou 450002, Henan, China)

**Abstract:** The influences of properties of recycled coarse aggregate on the key parameters of mix proportion design for recycled aggregate concrete, including water-cement ratio, unit water content and sand ratio, were discussed through the mixture proportion tests. The formulas for calculating the key parameters of mix proportion for recycled aggregate concrete were established through the statistical analysis of test results, which considered the influences of replacement ratio of recycled aggregates in the water-binder ratio formula, water absorption and replacement ratio in the unit water content formula, and void fraction, apparent density and replacement ratio in the sand ratio formula. The results indicate that the replacement ratio, void fraction and water absorption of recycled aggregates have significant effect on the mix proportion of recycled aggregate concrete. The obtained formulas have simple forms, and reflect the characteristics of recycled aggregate, enhance the mix proportion design accuracy, and can provide reference for mix proportion design of recycled concrete.

**Key words:** recycled aggregate concrete; mix proportion; water-cement ratio; unit water content; sand ratio; compressive strength

收稿日期:2015-07-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51179434)

作者简介:高丹盈(1962-),男,河南三门峡人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:gdy@zzu.edu.cn。

0 引 言

据估算,到 2020 年中国将新增建筑面积  $3 \times 10^{10} \text{ m}^2$ ,由此产生的废弃混凝土等建筑垃圾约为  $134 \times 10^8 \text{ t}$ ,若单纯堆存将占地  $2.33 \times 10^9 \text{ m}^2$ <sup>[1]</sup>,中国建筑垃圾的再生利用任重道远。再生骨料混凝土(Recycled Aggregate Concrete,RAC)是指以破碎加工后的废弃混凝土为骨料的混凝土。利用废弃混凝土做骨料可节省石灰石资源 61%,减少 15%~20%的 CO<sub>2</sub> 排放量<sup>[2]</sup>,从根本上解决废弃混凝土的处理问题,还能节约天然骨料,具有显著的经济、社会和环境效益。由废弃混凝土破碎得到的再生骨料表面往往包裹一层水泥砂浆,棱角多,针状物材料所占比例大,且破碎过程中会使再生骨料产生大量的内部横向裂纹。与天然骨料相比,再生骨料的吸水率大、空隙多。用普通混凝土配合比设计方法进行再生骨料混凝土配合比设计时,在相同的配合比下,再生骨料混凝土强度比天然骨料混凝土强度低 5%~24%<sup>[3-6]</sup>,塌落度与流动性也远低于普通混凝土,同时耐久性明显降低<sup>[7-8]</sup>。

再生骨料混凝土配合比设计方法多是在普通混凝土配合比的基础上进行修正。对再生混凝土水灰比的研究表明<sup>[9-12]</sup>,再生骨料混凝土抗压强度与水灰比基本符合 Bolomey 公式的关系,由于再生骨料

性质与天然骨料不同,需要通过试验确定 Bolomey 公式的系数。目前,通过试验数据分析得到的再生骨料混凝土 Bolomey 公式的系数未能合理反映再生骨料性质的影响。对于再生骨料混凝土的单方用水量,多是在普通混凝土单方用水量基础上考虑再生骨料吸水率高而需要的附加用水量<sup>[13-14]</sup>,计算方法较为繁琐,并且再生骨料吸水饱和需要一定的时间,按照附加用水量方法进行设计会增加拌和物的实际用水量,影响再生骨料混凝土的水灰比和强度。有关再生混凝土砂率的计算方法还未发现相关的报道,因此,本文针对再生骨料特性,通过试验研究和理论分析,建立再生骨料混凝土水灰比、单方用水量和砂率的计算公式,以供再生骨料混凝土配合比设计时参考。

1 试验概况

1.1 试验材料

试验采用河南荥阳天瑞牌 P.O 42.5 水泥;粗骨料分为天然粗骨料和再生粗骨料,其中,天然骨料为石灰石碎石,粒径为 5~20 mm,连续级配;再生粗骨料为某检测站废弃的强度为 C20~C40 的商品混凝土,用颚式破碎机破碎后筛分而成,粒径为 5~20 mm,连续级配;细骨料为细度模数 2.67 的天然河砂。原材料实测性能指标见表 1~4。

表 1 水泥物理力学性能  
Tab. 1 Physical and Mechanical Properties of Cement

密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	比表面积/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	标准稠度用水量/%	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
			3 d	28 d	3 d	28 d
3 100	352	27	23.5	45.0	5.6	8.5

表 2 粗骨料的物理性能  
Tab. 2 Physical Properties of Coarse Aggregate

骨料类别	松散堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	紧密堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	空隙率/%	吸水率/%	压碎指标/%	表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
天然骨料	1 567.8	1 630.2	44.3	1.40	8.8	2 814
再生骨料	1 302.0	1 412.0	50.3	4.85	17.7	2 640

表 3 粗骨料级配  
Tab. 3 Gradation of Coarse Aggregate

筛孔尺寸/mm	26.50	19.00	9.50	4.75	2.36
天然骨料累计筛余/%	0.00	0.00	76.57	99.44	100.00
再生骨料累计筛余/%	0.00	0.65	65.33	99.35	99.90

表 4 砂的物理性能  
Tab. 4 Physical Properties of Sand

颗粒级配/mm	细度模数	表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	松散堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	紧密堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
0.16~5.00	2.67	2 556.2	1 486	1 611

1.2 试验设计

试验分为 3 个部分。第 1 部分研究水灰比  $k$  对再生骨料混凝土配合比的影响,以水灰比、再生骨料取代率  $\delta_g$  (再生骨料质量占粗骨料总质量的百分比)为主要参数,其中水灰比分别为 0.3,0.35,0.4,0.5,0.55, $\delta_g$  分别为 0%,50%,100%,砂率取 36%,单方用水量取 180 kg,再生骨料混凝土配合比及其抗压强度的试验结果见表 5。第 2 部分研究再生骨料混凝土塌落度与单方用水量的关系,单方用水量从 160 kg 增加到 220 kg,每次增加 10 kg, $\delta_g$  分别为

表 5 再生骨料混凝土配合比及抗压强度试验结果

Tab. 5 Mix Proportions of RAC and Test Results of Compressive Strength

试件编号	各材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )					水灰比	再生骨料 取代率/%	抗压强度/MPa
	水	水泥	砂	天然骨料	再生骨料			
A1-0	180	600	602.5	1 072.5	0.0	0.30	0	75.2
A1-50	180	600	590.2	525.2	525.2	0.30	50	58.4
A1-100	180	600	578.6	0.0	1 030.0	0.30	100	55.3
A2-0	180	514	629.6	1 120.7	0.0	0.35	0	62.0
A2-50	180	514	616.7	548.8	548.8	0.35	50	59.6
A2-100	180	514	604.6	0.0	1 076.3	0.35	100	55.9
A3-0	180	450	649.7	1 156.5	0.0	0.40	0	56.4
A3-50	180	450	636.4	566.4	566.4	0.40	50	51.3
A3-100	180	450	624.0	0.0	1 110.7	0.40	100	49.2
A4-0	180	400	665.6	1 184.7	0.0	0.45	0	47.5
A4-50	180	400	651.9	580.2	580.2	0.45	50	45.7
A4-100	180	400	639.2	0.0	1 137.8	0.45	100	41.6
A5-0	180	360	678.3	1 207.3	0.0	0.50	0	43.6
A5-50	180	360	664.4	591.3	591.3	0.50	50	41.2
A5-100	180	360	651.4	0.0	1 159.5	0.50	100	37.4
A6-0	180	327	688.5	1 225.6	0.0	0.55	0	38.2
A6-50	180	327	674.4	600.2	600.2	0.55	50	35.3
A6-100	180	327	661.2	0.0	1 177.0	0.55	100	34.2

0%,50%,100%,水灰比取 0.4,砂率取 36%,再生骨料混凝土配合比及其抗压强度、塌落度的试验结果见表 6。第 3 部分研究新、旧砂率计算方法对再生骨料混凝土性能的影响,水灰比取 0.4,单方用水量取 180 kg。根据新砂率计算方法进行配合比设计的再生骨料混凝土抗压强度、塌落度的试验结果见表 7。

## 2 再生骨料混凝土的水灰比

根据中国现行《普通混凝土设计规程》(JGJ 55—2011),混凝土强度与水灰比的关系式为

$$f_{cu,0}=\alpha_a f_{ce}(k-\alpha_b)$$

(1)

式中: $f_{cu,0}$ 为混凝土的抗压强度; $f_{ce}$ 为水泥的 28 d 强度; $\alpha_a,\alpha_b$ 分别为主要由水泥、骨料类型和品质决定的系数,当粗骨料为碎石时, $\alpha_a=0.53,\alpha_b=0.2$ ,当粗骨料为卵石时, $\alpha_a=0.49,\alpha_b=0.13$ 。

根据表 5 中的试验结果,不同再生骨料取代率下,试验得到的再生骨料混凝土立方体抗压强度  $f_{cu}$  随水灰比的变化如图 1 所示。由图 1 可以看出:当水灰比相同时,再生骨料混凝土立方体抗压强度随再生骨料取代率  $\delta_g$  的增加而降低;再生骨料混凝土立方体抗压强度随水灰比的变化规律在  $\delta_g$  不同时略有不同; $\delta_g=0\%$ 时,粗骨料全部为天然骨料,随着水灰比的增加,混凝土立方体抗压强度不断减小;

$\delta_g=50\%,100\%$ 时,在水灰比大于 0.35 之后,随着水灰比的增大,再生骨料混凝土立方体抗压强度逐渐减小;当水灰比小于 0.35,随着水灰比的减小,再生骨料混凝土立方体抗压强度略有降低。这可能是由于本文试验的再生骨料属于 II 类骨料,压碎指标较大,当再生骨料混凝土强度超过 50 MPa 时,再生骨料混凝土由于再生骨料压碎而破坏,此时再生骨料混凝土强度主要由再生骨料强度决定,所以当水灰比小于 0.35 时,再生混凝土强度未随水灰比的降低而增加。

在  $\delta_g$  为 0%,50%,100%,水灰比在 0.35~0.55 范围时,试验得到的再生骨料混凝土立方体抗压强度和水灰比之比与水灰比关系见图 2。由图 2 可知,再生骨料混凝土立方体抗压强度和水灰比之比与水灰比之间呈线性关系,符合式(1)的规律。

再生骨料混凝土与天然骨料混凝土的最大差别在于粗骨料的品质,粗骨料的性能又与  $\delta_g$  密切相关,粗骨料的压碎指标随着  $\delta_g$  的增加而降低。因此,不同再生粗骨料的取代率应有不同的  $\alpha_a$  和  $\alpha_b$  值。按照式(1)对不同  $\delta_g$  的再生骨料混凝土抗压强度与水灰比进行统计分析,得到不同  $\delta_g$  下的  $\alpha_a$  和  $\alpha_b$  值,见表 8。

由表 8 可知,由于再生骨料的品质较天然骨料

表 6 再生骨料混凝土配合比及抗压强度、塌落度试验结果

Tab. 6 Mix Proportions of RAC and Test Results of Compressive Strength and Slump

试件编号	各材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )					再生骨料 取代率/%	塌落度/mm	抗压强度/MPa
	水	水泥	砂	天然骨料	再生骨料			
B1-0	160	400	685.1	1 219.5	0.0	0	6	47.8
B1-50	160	400	671.1	597.2	597.2	50	4	45.5
B1-100	160	400	658.0	0.0	1 171.2	100	2	45.0
B2-0	170	425	667.5	1 188.2	0.0	0	13	51.9
B2-50	170	425	671.1	597.2	597.2	50	7	48.2
B2-100	170	425	658.0	0.0	1 171.2	100	5	45.7
B3-0	180	450	649.7	1 156.5	0.0	0	32	56.4
B3-50	180	450	636.4	566.4	566.4	50	21	51.3
B3-100	180	450	624.0	0.0	1 110.7	100	13	49.2
B4-0	190	475	632.3	1 125.5	0.0	0	60	49.6
B4-50	190	475	619.4	551.2	551.2	50	46	52.1
B4-100	190	475	607.3	0.0	1 081.0	100	29	53.2
B5-0	200	500	614.7	1 094.2	0.0	0	96	50.2
B5-50	200	500	602.1	535.9	535.9	50	78	48.7
B5-100	200	500	590.4	0.0	1 051.0	100	49	51.2
B6-0	210	525	597.1	1 062.9	0.0	0	130	47.4
B6-50	210	525	584.9	520.6	520.6	50	121	46.4
B6-100	210	525	573.5	0.0	1 020.0	100	106	46.0
B7-0	220	550	579.6	1 031.6	0.0	0	175	47.2
B7-50	220	550	567.7	505.2	505.2	50	168	44.5
B7-100	220	550	556.6	0.0	909.7	100	159	42.8

表 7 采用新计算方法的再生骨料混凝土配合比及抗压强度、塌落度试验结果

Tab. 7 Mix Proportions of RAC and Test Results of Compressive Strength and Slump Using New Calculation Method

试件 编号	各材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )					再生骨料 取代率/%	砂率/%	塌落度/mm	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	抗压强度/MPa
	水	水泥	砂	天然骨料	再生骨料					
C1-0	180	450	650.1	1 155.7	0.0	0	36.0	34	2 435.8	56.9
C1-25	180	450	664.2	841.2	280.4	25	37.2	30	2 415.8	55.7
C1-50	180	450	678.1	544.2	544.2	50	38.4	29	2 396.5	54.4
C1-75	180	450	690.9	264.6	793.8	75	39.5	28	2 379.3	52.6
C1-100	180	450	701.9	0.0	1 030.7	100	40.5	26	2 362.6	51.2

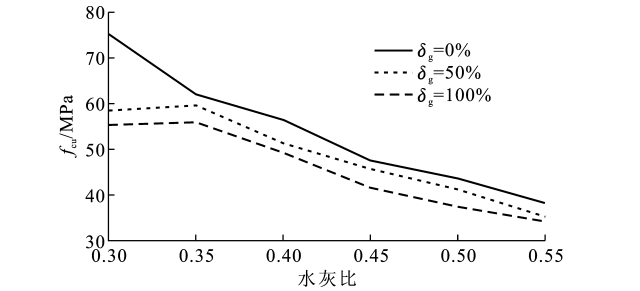


图 1 再生骨料混凝土强度与水灰比的关系

Fig. 1 Relations Between Compressive Strength and Water-cement Ratio of RAC

有所降低,再生骨料混凝土的水泥强度转化系数 $\alpha_a$ 值降低,虚拟水灰比系数 $\alpha_b$ 则增加, $\alpha_a,\alpha_b$ 与 $\delta_g$ 之间均具有线性关系,即

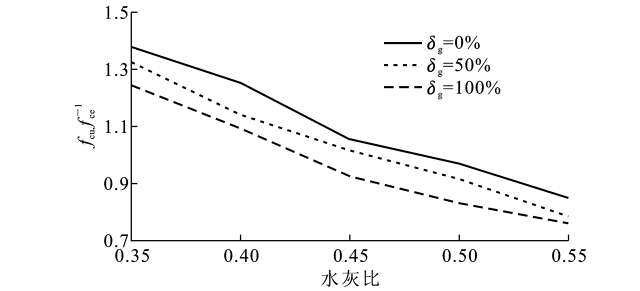


图 2  $f_{cu}/f_{ce}$ 与水灰比的关系

Fig. 2 Relations Between  $f_{cu}/f_{ce}$  and Water-cement Ratio

$$\left. \begin{aligned} \alpha_a &= 0.53(1 - A\delta_g) \\ \alpha_b &= 0.2(1 + B\delta_g) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $A,B$ 均为与再生骨料品质有关的系数,对于本文采用的混凝土建筑垃圾再生骨料,根据式(2)和

表 8 不同再生骨料取代率下的  $\alpha_a, \alpha_b$  值  
Tab. 8 Values of  $\alpha_a$  and  $\alpha_b$  Under Different Replacement Ratios of Recycled Aggregate

参数	$\delta_g=0\%$	$\delta_g=50\%$	$\delta_g=100\%$
$\alpha_a$	0.532	0.497	0.476
$\alpha_b$	0.204	0.218	0.244

表 8 中不同取代率下的  $\alpha_a, \alpha_b$ , 得到  $A=0.106, B=0.2$ 。

近似取  $A=0.1$ , 则有

$$\left. \begin{aligned} \alpha_a &= 0.53(1 - 0.1\delta_g) \\ \alpha_b &= 0.2(1 + 0.2\delta_g) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)适用于Ⅱ类再生骨料和水灰比大于 0.35 的情况,可配置抗压强度大于等于 C50 的再生混凝土。对于其他不同种类的再生骨料,可根据式(2)模型并通过对试验数据的回归分析,得到适合于具体骨料的  $\alpha_a, \alpha_b$  值,然后按式(1)计算水灰比。

3 再生骨料混凝土的单方用水量

普通混凝土单方用水量可根据粗骨料品种、最大粒径以及设定的拌和物塌落度查表或使用混凝土单方用水量定则计算确定,即

$$W = 10(0.1T + K) / 3 \quad (4)$$

式中: $W$  为混凝土单方用水量; $T$  为设定的塌落度; $K$  为常数,取决于石子的最大粒径和品种,随石子粒径的增大而减小,可查表得到<sup>[15]</sup>。

根据表 6 试验结果得到的再生骨料混凝土单方用水量与拌和物塌落度、再生骨料取代率的关系见图 3。由图 3 可以看出:单方用水量随着塌落度的增加逐渐增大;当塌落度不变时,单方用水量随着  $\delta_g$  的增加不断增大;当单方用水量相同时,塌落度随着  $\delta_g$  的增加不断减小。为了与普通混凝土单方用水量计算式(4)保持一致,再生骨料混凝土单方用水量的计算模型可表示为

$$W_g = C(0.1T + K_g) \quad (5)$$

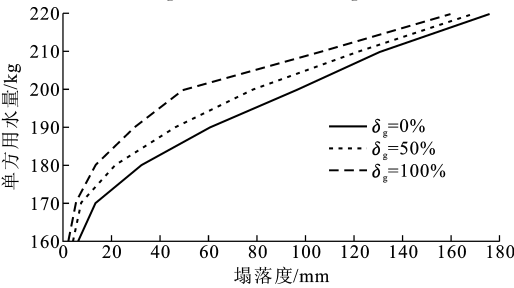


图 3 单方用水量与再生骨料混凝土拌和物塌落度的关系  
Fig. 3 Relations Between Unit Water Content and RAC Slump

式中: $W_g$  为再生骨料混凝土单方用水量; $C$  为系数; $K_g$  为与再生骨料的类型、粒径等有关的系数。

按照式(5)对不同  $\delta_g$  下的单方用水量  $W_g$  试验结果与 0.1T 进行拟合,得到不同  $\delta_g$  下的  $C, K_g$  拟合值,见表 9。

表 9 不同再生骨料取代率下的  $C, K_g$  值  
Tab. 9 Values of  $C$  and  $K_g$  Under Different Replacement Ratios of Recycled Aggregate

参数	$\delta_g=0\%$	$\delta_g=50\%$	$\delta_g=100\%$
$C$	3.337	3.337	3.334
$K_g$ 拟合值	49.7	50.7	51.9
$K_g$ 计算值	49.7	50.9	52.1

由表 9 可知:系数  $C$  基本保持在 3.33 左右,与普通混凝土单方用水量计算式(4)一致;系数  $K_g$  则随着  $\delta_g$  的增大而不断增加,说明再生骨料混凝土单方用水量与  $\delta_g$  相关,同时也受再生骨料吸水率  $\omega_g$  的影响。为了准确计算再生骨料混凝土单方用水量,将  $\delta_g$  和  $\omega_g$  引入  $K_g$  的计算公式中,即

$$K_g = K(1 + \omega_g \delta_g) \quad (6)$$

对于不同类型的骨料,式(6)中的  $K$  值可由试验得到,也可取与普通混凝土单方用水量计算中的相同值。根据《实用建筑材料试验手册》<sup>[15]</sup>,对于最大粒径为 20 mm 的碎石,  $K=53$ ;最大粒径为 40 mm 的碎石,  $K=48.5$ 。本文试验得到的  $K$  为 49.7,介于 48.5~53,可能与骨料的颗粒形状以及颗粒级配有关系。一般来说,骨料颗粒越大,  $K$  的取值越小。

由表 3 可知,本文试验中的再生骨料吸水率  $\omega_g=4.85\%$ ,代入式(6)得到采用混凝土建筑垃圾再生骨料的  $K_g$  计算公式为

$$K_g = K(1 + 4.85 \times 10^{-2} \delta_g) \quad (7)$$

由式(7)得到的  $K_g$  计算值与试验拟合值的比较见表 9,二者十分接近,最大相对误差只有 0.39%。因此,再生骨料混凝土单方用水量可由式(5),(6)计算得到。

4 再生骨料混凝土的砂率

在再生骨料混凝土中存在天然骨料和再生骨料 2 种粗骨料。由于再生骨料空隙率较大,使得再生骨料混凝土拌和物的空隙率相对天然骨料混凝土有所增大,再生骨料混凝土拌和物空隙率会随着再生骨料空隙率  $P_{RA}$ 、再生骨料取代率  $\delta_g$  的增加而增大,这些空隙需要由细骨料砂来填充。因此,每立方米再生骨料混凝土中砂的体积可表示为

$$V_s = \gamma(V_{NA}P_{NA} + V_{RA}P_{RA}) \quad (8)$$

式中: $V_s, V_{NA}, V_{RA}$  分别为每立方米再生混凝土中砂、天然骨料和再生骨料的体积; $P_{NA}$ 为天然骨料的空隙率; $\gamma$ 为砂浆富裕系数,是砂浆体积与拌和物空隙体积之比,可由试验测得,天然骨料混凝土的  $\gamma$  取值在 1.1~1.4 之间<sup>[15]</sup>。

再生骨料混凝土砂率和再生骨料取代率分别为

$$\beta_s = \frac{m_s}{m_s + m_{NA} + m_{RA}} \tag{9}$$

$$\delta_g = \frac{m_{RA}}{m_{NA} + m_{RA}} \tag{10}$$

式中: $\beta_s$  为再生骨料混凝土的砂率; $m_s, m_{NA}, m_{RA}$  分别为砂、天然骨料和再生骨料的质量,  $m_s = \rho_s V_s$ ,  $m_{NA} = \rho_{NA} V_{NA}$ ,  $m_{RA} = \rho_{RA} V_{RA}$ ,  $\rho_s, \rho_{NA}, \rho_{RA}$  分别为砂、天然骨料、再生骨料的表观密度。

联立式(8)~(10),得到再生骨料混凝土砂率的计算公式为

$$\beta_s = \frac{\gamma[(1-\delta_g)\rho_{RA}P_{NA} + \delta_g\rho_{NA}P_{RA}]\rho_s}{\gamma[(1-\delta_g)\rho_{RA}P_{NA} + \delta_g\rho_{NA}P_{RA}]\rho_s + \rho_{NA}\rho_{RA}} \tag{11}$$

在式(11)中,  $\rho_s, \rho_{NA}, \rho_{RA}, P_{NA}, P_{RA}$  均与材料性能有关,可由试验直接测得。根据选定的  $\delta_g$ , 由式(11)直接计算出相应的砂率  $\beta_s$ 。

为了探讨  $\delta_g$  对再生混凝土砂率、塌落度和抗压强度的影响,本文取水灰比为 0.4,单方用水量为 180 kg,由式(11)计算再生骨料混凝土的砂率,按照绝对体积法确定再生骨料混凝土各材料用量,配置再生骨料混凝土,进行塌落度和 28 d 抗压强度试

验,试验结果见表 7。

由表 7 可知,按照式(11)的砂率计算方法,砂率随着  $\delta_g$  的增加不断增大。 $\delta_g$  增加 25%,砂率增大 1.2%左右。这是由于再生骨料空隙率较大,随着再生骨料用量的增大,需要更多的细骨料来填充粗骨料之间的空隙。如采用普通混凝土砂率计算方法,3 种情况下砂率均为 36%。为了便于分析对比,将式(11)计算得到的砂率与普通混凝土砂率计算方法得到的砂率以及配置的再生骨料混凝土塌落度、抗压强度的试验结果见表 10。由表 10 可以看出,当  $\delta_g$  相同时,使用式(11)砂率计算方法得到的塌落度明显提高,尤其是当  $\delta_g = 100\%$  时塌落度由原来的 13 mm 提高到 26 mm。随着再生骨料取代率的增加,2 种计算方法得到的拌和物塌落度都在不断减小,但用式(11)砂率的计算公式时,再生骨料混凝土塌落度降幅较小,且抗压强度较高。由此可见,式(11)的砂率计算方法更适合再生骨料混凝土的配合比设计。同时,随着  $\delta_g$  的增大,再生骨料混凝土的单方用水量不断减小,这是由于再生骨料的表观密度远低于天然骨料,且再生骨料的表观密度受老、旧混凝土来源的影响较大,致使天然骨料混凝土假定单方用水量的配合比计算方法用于再生骨料混凝土配合比计算时必然引起较大的误差。因此,对再生骨料混凝土的配合比计算,建议采用绝对体积法计算再生骨料混凝土的各材料用量。

表 10 砂率及再生骨料混凝土塌落度、抗压强度的对比

Tab. 10 Comparison of Sand Ratio, Slump and Compressive Strength for RAC

再生骨料 取代率/%	砂率/%		塌落度/mm		抗压强度/MPa	
	普通方法	式(11)新方法	普通方法	式(11)新方法	普通方法	式(11)新方法
0	36	36.0	32	34	56.4	56.9
25	36	37.2	27	30	53.2	55.7
50	36	38.4	21	29	51.3	54.4
75	36	39.5	16	28	49.9	52.6
100	36	40.8	13	26	49.2	51.2

5 结 语

(1)在再生骨料混凝土配合比设计中,需首先测定再生骨料的空隙率、吸水率和表观密度等基本性能指标,然后根据选定的  $\delta_g$  确定其水灰比、单方用水量和砂率 3 个关键设计参数。

(2)再生骨料混凝土水灰比的计算模型与普通混凝土相同,但模型中的系数  $\alpha_a, \alpha_b$  与再生骨料品质和取代率有关,需要根据试验确定或按式(2)计算。

(3)再生骨料混凝土单方用水量与再生骨料取代率以及再生骨料吸水率有关。根据再生骨料混凝土和易性的要求选择塌落度,由式(5),(6)计算再生骨料混凝土单方用水量。

(4)再生混凝土砂率与骨料空隙率、表观密度以及再生骨料取代率等有关,可按式(11)计算。按照本文试验的材料参数计算,再生骨料取代率增加 25%,砂率增大 1.2%左右。

(5)由于再生骨料表观密度较小,混凝土的单方用水量受再生骨料取代率影响较大,建议使用绝对

体积法计算再生骨料混凝土的各材料用量。

## 参考文献:

## References:

- [1] 胡曙光,何永佳. 利用废弃混凝土制备再生胶凝材料[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(5): 593-599.  
HU Shu-guang, HE Yong-jia. Preparation of Regenerated Binding Material Using Waste Concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(5): 593-599.
- [2] 张晓华,孟云芳,任杰. 浅析国内外再生骨料混凝土现状及发展趋势[J]. 混凝土, 2013(7): 80-83.  
ZHANG Xiao-hua, MENG Yun-fang, REN Jie. Preliminary Study of the Present Situation and Development for the Recycled Aggregate Concrete in Domestic and Foreign[J]. Concrete, 2013(7): 80-83.
- [3] RAHAL K. Mechanical Properties of Concrete with Recycled Coarse Aggregate[J]. Building and Environment, 2007, 42(1): 407-415.
- [4] MEYER C. The Greening of the Concrete Industry[J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(8): 601-605.
- [5] 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.
- [6] EVANGERLISTA L, DE BRITO J. Mechanical Behaviour of Concrete Made with Fine Recycled Concrete Aggregates[J]. Cement and Concrete Composites, 2007, 29(5): 397-401.
- [7] 郑建军,盛毅生,孔德玉,等. 再生混凝土技术与发展[J]. 浙江工业大学学报, 2006, 34(1): 1-7.  
ZHENG Jian-jun, SHENG Yi-sheng, KONG De-yu, et al. Technology and Development of Recycled Concrete[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2006, 34(1): 1-7.
- [8] 楼志辉. 钢纤维再生混凝土基本力学性能和断裂性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2007.  
LOU Zhi-hui. Experimental Research on Mechanical Properties and Fracture Properties of Steel Fiber Reinforced Recycled Concrete[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2007.
- [9] 邓寿昌,张学兵. 再生混凝土强度计算 Bolomey 公式回归系数  $\alpha'_a$ 、 $\alpha'_b$  的试验研究[J]. 混凝土, 2012(8): 24-26, 30.  
DENG Shou-chang, ZHANG Xue-bing. Experiment Research of Regression Coefficients  $\alpha'_a$  and  $\alpha'_b$  on Strength Calculation Formula of Recycled Concrete[J]. Concrete, 2012(8): 24-26, 30.
- [10] 张永娟,何舜,张雄,等. 再生混凝土 Bolomey 公式的修正[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(4): 538-543.  
ZHANG Yong-juan, HE Shun, ZHANG Xiong, et al. Modification of the Bolomey Formula in Recycled Aggregate Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(4): 538-543.
- [11] 周栋梁,周伟玲,林玮. 关于再生混凝土强度计算公式的试验研究[J]. 混凝土, 2009(12): 8-10.  
ZHOU Dong-liang, ZHOU Wei-ling, LIN Wei. Experimental Study on Formula for Calculating the Strength of Recycled Concrete[J]. Concrete, 2009(12): 8-10.
- [12] 孙跃东,肖详,庞俭,等. 再生骨料混凝土的配合比试验研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2009, 28(1): 25-29.  
SUN Yue-dong, XIAO Xiang, PANG Jian, et al. Research on the Mix Proportion of Concrete with Recycled Aggregates[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2009, 28(1): 25-29.
- [13] 盛黎. 再生混凝土水量和原料配比研究[J]. 浙江树人大学学报: 自然科学版, 2010, 10(1): 31-34.  
SHENG Li. On the Unit Water Use and Mix Proportion in Recycled Concrete[J]. Journal of Zhejiang Shuren University: Acta Scientiarum Naturalium, 2010, 10(1): 31-34.
- [14] 张学兵,邓寿昌,黄继承,等. 再生混凝土单位体积用水量的计算[J]. 中南林学院学报, 2005, 25(5): 102-104.  
ZHANG Xue-bing, DENG Shou-chang, HUANG Ji-cheng, et al. Calculation of Water Usage per Unit Volume of Recycled Concrete[J]. Journal of Central South Forestry University, 2005, 25(5): 102-104.
- [15] 张彩霞,宋福申,刘付林,等. 实用建筑材料试验手册[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
ZHANG Cai-xia, SONG Fu-shen, LIU Fu-lin, et al. Serial Handbooks of Building Construction [M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.