

再生混凝土物理力学性能试验研究*

郝 彤, 石 磊, 陈晶晶
(郑州大学土木工程学院, 郑州 450002)

摘要 采用废砖粗骨料、废混凝土细骨料完全替代天然骨料, 配制了 5 组不同配合比的再生混凝土试块。通过试验得到立方体试块的抗压强度、碳化深度以及棱柱体试块的轴心抗压强度、弹性模量、收缩等力学性能指标。经分析得出轴心抗压强度与立方体抗压强度、弹性模量与抗压强度的关系, 并对混凝土碳化收缩公式进行了拟合。

关键词 再生混凝土; 抗压强度; 碳化; 收缩; 弹性模量

中图分类号: TU528 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2013)01-0073-03

Experimental study on mechanical performances of recycled concrete

Hao Tong, Shi Lei, Chen Jingjing

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Preparation of five different mix of recycled brick concrete blocks was done. The compressive strength, carbonation depth, elastic modulus, shrinkage and other mechanical performances were obtained through the tests. The relationships between the axial compressive strength and cube compressive strength, elastic modulus and compressive strength were obtained. Carbonation and shrinkage formulas of concrete were also fitted.

Keywords: recycled concrete; compressive strength; carbonation; shrinkage; elastic modulus

0 前言

再生混凝土是将废弃混凝土经过破碎、清洗、分级, 然后按一定比例相互混合得到的“再生骨料”作为粗骨料或粗、细骨料, 加入水泥浆配制而成的混凝土。本文用废砖粗骨料 100% 替代天然碎石、用废混凝土细骨料 100% 替代天然砂制作混凝土, 配制了 5 组不同配合比的再生混凝土试块, 进行试验得到 3, 7, 28d 的立方体试块的抗压强度、碳化深度以及棱柱体试块的轴心抗压强度、弹性模量、收缩等力学性能指标, 为再生混凝土墙板的研究奠定基础。

1 试验材料及试验方案

1.1 试验材料

水泥: 河南某公司生产的复合硅酸盐水泥 PC32.5; 水: 普通自来水; 骨料: 本文采用的骨料是采用机械破碎后经人工筛分得到的废砖再生粗骨料和废混凝土再生细骨料, 骨料的基本物理性能如表 1 所示。

骨料的基本物理性能 表 1

指标	废砖再生粗骨料	废混凝土再生细骨料
粒径范围/mm	5~75	0~5
表观密度/kg/m ³	1 610	2 590
堆积密度/kg/m ³	775	1 198
紧密密度/kg/m ³	875	1 317
松散孔隙率/%	52	54
紧密孔隙率/%	46	49
24h 吸水率/%	16.3	5.8
含水率/%	0.5	4.7
细度模数	—	4.7

1.2 试验方案及配合比设计

与天然粗骨料相比较, 废砖再生粗骨料的显著特征之一是高吸水率, 因此, 再生混凝土单位用水量是再生混凝土配合比设计中的关键, 大部分学者提出了基于自由水灰比的再生混凝土配合比设计方法^[1-3], 本试验也采用该方法配制 5 组不同配合比的混凝土, 依次命名为 RA, RB, RC, RD, RE, 各组配合比见表 2。

再生混凝土配合比 表 2

组别	水灰比	砂率/%	水/kg/m ³	水泥/kg/m ³	细骨料/kg/m ³	粗骨料/kg/m ³	附加水/kg/m ³
RA	0.60	51	160	267	764	721	98
RB	0.55	49	160	291	718	738	100
RC	0.50	47	160	320	672	752	102
RD	0.45	45	160	356	624	763	103
RE	0.40	43	160	400	576	770	104

2 再生混凝土的物理力学性能

2.1 试验方法

本试验配制了 5 组混凝土试块, 分别于 3, 7, 28d 龄期在每组中各取 3 个相同试块, 按照《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T 50081—2002) 进行试验, 得到立方体试块的抗压强度、碳化深度以及棱柱体试块的轴心抗压强度、弹性模量、收缩等力学性能指标。

* 2010 年度河南省墙改基金项目(2010-18)。

作者简介: 郝彤, 博士, 教授, Email: haotong@zzu.edu.cn。

2.2 试验结果分析

2.2.1 立方体抗压强度与水灰比的关系

自然条件养护下再生混凝土立方体试块的抗压强度与水灰比的关系见图 1。从图中可以看出,再生混凝土 3d 的抗压强度随着水灰比的增加而减小;7d 的抗压强度在水灰比为 0.55~0.6 时,有上升趋势;而 28d 抗压强度与水灰比的关系并不明显,但是 5 组不同配合比的立方体试块的抗压强度比较接近,介于 21~25MPa 之间,这说明水灰比对自然养护条件下低强度再生混凝土 3,7d 抗压强度的影响较大,对 28d 抗压强度的影响不明显,这一性能在实际工程中可以加以利用,选用高水灰比的混凝土,节省了水泥,有很好的经济效益。

2.2.2 轴心抗压强度与立方体抗压强度换算关系

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)(简称混凝土规范)中采用的混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck} 与立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 间的换算关系为:

$$f_{ck} = 0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,k} \quad (1)$$

式中: α_{c1} 为混凝土棱柱体轴心抗压强度与立方体抗压强度的比值,当混凝土强度等级不大于 C50 时, $\alpha_{c1} = 0.76$,当混凝土强度等级为 C80 时, $\alpha_{c1} = 0.82$,当混凝土强度等级为中间值时,按线性变化插值; α_{c2} 为混凝土的脆性系数,当混凝土强度等级不大于 C40 时, $\alpha_{c2} = 1.0$,当混凝土强度等级为 C80 时, $\alpha_{c2} = 0.87$,当混凝土强度等级为中间值时,按线性变化插值;0.88 为考虑结构中混凝土的实体强度与立方体试件混凝土强度差异等因素的修正系数。

本试验中再生混凝土强度等级小于 C40, α_{c1} 取 0.76, α_{c2} 取 1.0; 由于 $f_{ck}, f_{cu,k}$ 均为实验室测得的试件的强度标准值,而非结构中混凝土的实体强度,所以不应考虑式(1)中 0.88 的修正系数。即实验室普通混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck} 与立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 之间的换算关系为:

$$f_{ck} = 0.76f_{cu,k} \quad (2)$$

试验结果表明,再生混凝土 28d 的实测轴心抗压强度标准值与实测立方体抗压强度标准值之比均在 0.72~1.02 之间,均值为 0.86。与混凝土规范中普通混凝土轴心抗压强度标准值与立方体抗压强度标准值换算公式(式(2))中的系数 0.76 相比有所提高,这说明再生骨料混凝土轴心抗压强度标准值比采用混凝土规范公式计算的轴心抗压强度标准值偏高,而实际工程设计中混凝土强度均是采用轴心抗压强度设计值的,按混凝土规范中公式计算再生混凝土的轴心抗压强度增大了结构设计的安全储备,提高了结构的安全系数,这对工程是十分有利

的。因此,混凝土规范中混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck} 与立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 之间的换算关系对本文再生混凝土也是适用的。

2.2.3 弹性模量

本文采用下式计算再生混凝土 28d 的弹性模量 E_c :

$$E_c = \frac{10^5}{5.2 + 29.8/f_{cu,k}} \quad (3)$$

式中 $f_{cu,k}$ 为再生混凝土立方体试块在标准养护下的 28d 抗压强度标准值。

再生混凝土棱柱体试块 28d 的弹性模量与抗压强度的关系见图 2。再生混凝土弹性模量试验值与式(3)计算值比值(表 3)的平均值 $\mu = 0.97$, 变异系数 $\delta = 0.026$, 其平均值约等于 1, 变异系数较小, 所以本文公式计算值与试验值吻合较好。

再生混凝土的弹性模量 表 3

组别	试验值 /MPa	抗压强度 /MPa	式(3) 计算值 /MPa	试验值 式(3) 计算值
RA	14 300	17.0	14 382	0.99
RB	14 900	19.5	14 863	1.00
RC	14 500	23.3	15 435	0.94
RD	14 400	21.3	15 154	0.95
RE	15 200	24.4	15 573	0.98

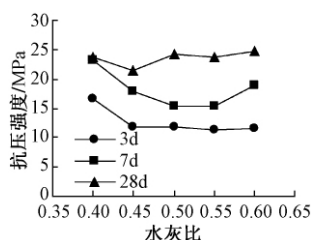


图 1 再生混凝土不同龄期
抗压强度与水灰比的关系

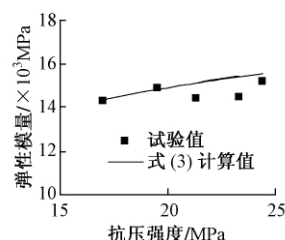


图 2 再生混凝土 28d 弹性
模量与抗压强度的关系

2.2.4 碳化

试验通过对自然养护条件下的立方体试块劈裂,用酚酞试液测定碳化深度(注:因 RE 组数据的离散性较大,文中未给出),如表 4 所示。

再生混凝土碳化深度 表 4

水灰比	试验值/mm		式(4) 计算值/mm		试验值/式(4) 计算值	
	7d	28d	7d	28d	7d	28d
0.60	0.6	1.15	0.43	1.18	1.40	0.97
0.55	0.3	1.30	0.28	1.14	1.07	1.14
0.50	0.3	1.11	0.29	1.16	1.03	0.96
0.45	0.3	0.71	0.39	1.03	0.77	0.69

由表 4 及图 3 可看出,再生废砖混凝土的碳化深度随着龄期的增加而增大。3d 前碳化很小,甚至为零,原因是前期试块表面湿润,水分会隔离 CO_2 气体,使其难以扩散到水泥石内部。3~7d 随着试块

表面水分的逐渐散失,CO₂ 气体渗入试块,引起碳化。7d 后,曲线斜率随着龄期的增加开始减小,说明碳化速度减缓,原因是游离到水泥石表面的 Ca²⁺ 会因碳化作用而产生 CaCO₃ 沉淀,使表面的孔隙被沉淀堵塞,碳化速度减缓,但碳化作用并未能终止,而是继续进行,随着龄期增长,碳化深度逐渐增加。

本文参照《混凝土结构耐久性评定标准》(CECS 220:2007) 中给出的以混凝土抗压强度为主要参数的混凝土碳化深度模型,结合试验数据,回归分析得出再生混凝土的碳化深度模型:

$$x_c = K_{CO_2} \cdot K_{kl} \cdot K_{ks} \cdot T^{0.25} \cdot RH^{1.5} \cdot (1 - RH) \cdot (-12.860/f_{cu}^{RC} + 1.105) \cdot \sqrt{t} \quad (4)$$

式中: K_{CO_2} 为 CO₂ 浓度影响系数, $K_{CO_2} = \sqrt{C_0/0.03}$, C_0 为 CO₂ 体积浓度/%; K_{kl} 为位置影响系数,构件角区取 1.4,非角区取 1.0; K_{ks} 为工作应力影响系数,受压时取 1.0,受拉时取 1.7; T 为环境温度/℃; RH 为相对湿度/%; f_{cu}^{RC} 为再生混凝土立方体抗压强度平均值/MPa; t 为龄期/d。

再生混凝土碳化深度试验值与式(4) 计算值比值(表 4) 的平均值 $\mu = 1.00$, 变异系数 $\delta = 0.22$, 其平均值约等于 1, 变异系数较小, 所以本文公式计算值与试验值吻合较好。

2.2.5 收缩

在自然养护条件下,用千分尺测定再生混凝土试件在不受外力作用时其长度的变化值,反映混凝土的收缩规律,如表 5 所示。

由表 5 及图 4 可以看出,随着龄期的增加,再生混凝土的收缩增大。在凝结初期,收缩速率较快,曲线斜率较大,随着龄期的增长,收缩速率变慢,曲线斜率减小。这是因为在 0~7d,水泥水化速度较快,水化反应消耗混凝土试块内部水分,生成水化物,从而更加致密,使混凝土试件固相体积增加,但固相与液相总体积减少,从而产生了收缩。随着龄期的增长,水泥水化作用逐渐减缓,且前期水化产生的水化物填充到孔隙结构中,使水泥石密实性提高,空隙率

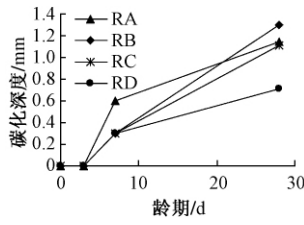


图 3 再生混凝土早期碳化深度与龄期的关系

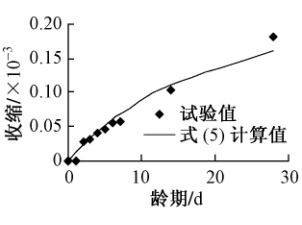


图 4 再生混凝土早期收缩与龄期的关系

降低,水化收缩减小。

在测得的再生混凝土试件收缩值的基础上,经回归分析,得出废砖再生混凝土的收缩基本公式为:

$$\varepsilon(t)_0 = \frac{t}{78.62 + 3.38t} \times 10^{-3} \quad (5)$$

再生混凝土平均收缩试验值与式(5) 计算值比值的平均值 $\mu = 0.97$, 变异系数 $\delta = 0.11$, 其平均值约等于 1, 变异系数较小, 所以本文公式值与试验值吻合较好。

3 结论

(1) 再生混凝土早期强度增长方式、碳化与普通混凝土相似。可采用高水灰比配制低强度(低于 C20) 再生混凝土,节省了水泥,有很好的经济效益。

(2) 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 中混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck} 与立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 之间的换算关系适用于本文的再生混凝土。

(3) 给出了再生混凝土弹性模量与抗压强度之间的换算公式。

(4) 再生混凝土的碳化值随龄期的增加而变大,3d 前基本无明显碳化,3~7d 出现明显碳化现象,7d 后碳化速率逐渐减小。拟合出了再生混凝土碳化深度的公式。

(5) 再生混凝土的收缩随着龄期的增加而变大,且随着龄期的增长,收缩速率逐渐变慢,曲线斜率减小。给出了再生混凝土的早期收缩基本公式。

参 考 文 献

[1] 刘秦. 再生废砖粗骨料混凝土配合比及物理性能试验研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
[2] 蒋业浩. 再生混凝土抗压强度及配合比设计研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
[3] 蔡秀兰. 再生细集料混合砂浆配合比及物理性能试验研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
[4] 史魏, 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.
[5] 张亚梅, 秦鸿根, 孙伟, 等. 再生混凝土配合比设计初探 [J]. 混凝土与水泥制品, 2002(1): 7-9.

再生混凝土收缩			
表 5			
龄期/d	试验平均值 $/ \times 10^{-3}$	式(5) 计算值 $/ \times 10^{-3}$	试验平均值 式(5) 计算值
1	0	0.012 2	0
2	0.027 5	0.023 4	1.17
3	0.032 0	0.033 8	0.95
4	0.040 5	0.043 4	0.93
5	0.046 2	0.052 3	0.88
6	0.055 1	0.060 7	0.91
7	0.058 2	0.068 4	0.85
14	0.102 9	0.111 2	0.93
28	0.181 8	0.161 6	1.12