

文章编号: 1673-5196(2018)03-0142-04

# 不同配比再生骨料混凝土的力学性能

乔宏霞<sup>1,2</sup>, 关利娟<sup>1</sup>, 曹辉<sup>1</sup>, 路承功<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 以不同配合比的再生混凝土为研究对象, 通过抗压强度和劈裂抗拉强度试验分析再生骨料对再生骨料混凝土两种强度变化规律的影响. 采用 OriginPro 8.5 数据分析软件对抗压和抗拉强度进行初步数学函数模拟. 结果表明: 当再生粗骨料掺量为 0%、50% 时, 再生细骨料使得抗压强度或劈裂抗拉强度变化幅度大, 不宜选择; 当再生粗骨料掺量为 15%、30% 时, 混凝土劈裂抗拉强度和抗压强度变化都相对平稳; 再生粗骨料掺量为 15% 时混凝土抗压强度相对较高, 30% 时劈裂抗拉强度相对较高, 可根据再生混凝土使用的具体情况来选择.

**关键词:** 再生骨料混凝土; 抗压强度; 劈裂抗拉强度; 数学函数模拟

**中图分类号:** TU528 **文献标识码:** A

## Mechanical performance of recycled aggregate concrete with different mixture ratios

QIAO Hong-xia<sup>1,2</sup>, GUAN Li-juan<sup>1</sup>, CAO Hui<sup>1</sup>, LU Cheng-gong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering, the Ministry of Education, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Taking the recycled aggregate concrete with different mixture ratio as investigation object and employing the experiment on compressive strength, and splitting tensile strength, the effect of recycled aggregate on the variation pattern of the two strengths of the recycled aggregate concrete was analyzed. By using data analysis software OriginPro 8.5, the preliminary simulation of mathematical function for the compressive and tensile strength of the concrete was conducted. The result shows that when the additive amount of recycled coarse aggregate is 0% and 50%, the recycled fine aggregate will make the variational scope of the compressive strength and splitting tensile strength so big that such addition of coarse aggregate will be unfavorable to be chosen. When the additive amount of recycled coarse aggregate is 15% and 30%, the variation of concrete splitting tensile strength and compressive strength will be relatively stable, the concrete compressive strength will be relatively higher when the coarse aggregate alternative ratio is 15%, and the splitting tensile strength will be relatively higher when the coarse aggregate additive ratio is 30%, so that should be selected of the two according to the specific circumstances of the use of recycled concrete.

**Key words:** recycled aggregate concrete; compressive strength; splitting tensile strength; mathematical function simulation

在研究混凝土材料耐久性<sup>[1-2]</sup>时,发现随着钢筋混凝土建筑的不断老化、由城市建设中的拆迁改造产生的建筑垃圾越来越多.目前这些废弃混凝土

少部分经过简单处理后用于回填,大部分未经处理就直接运往郊区堆放或者填埋.混凝土作为当今世界应用最多的建筑材料,生产过程中需要大量开山采石来生产粗骨料,给生态环境造成很大的压力;而且废弃混凝土的产生及运输过程也造成大量的环境污染和能源消耗.为减少这些问题,再生骨料混凝土

收稿日期: 2017-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(51468039)

作者简介: 乔宏霞(1977-),女,山西应县人,博士,教授,博导.

应用而生.再生骨料混凝土是指利用废弃混凝土破碎加工而成的再生骨料,部分或全部地代替天然骨料后配制而成的新混凝土,简称再生混凝土.再生混凝土的新技术已成为现在研究的热点问题<sup>[3-8]</sup>.立方体抗压强度和抗拉强度是混凝土最基本的力学性能指标.目前关于再生混凝土抗压强度或抗拉强度的研究,其配比主要为单一的再生粗骨料或再生细骨料,同时掺入再生粗、细骨料的研究几乎没有<sup>[5-8]</sup>.本次研究从单一的再生粗骨料、再生细骨料以及同时掺加再生粗、细骨料的混凝土力学性能角度出发,对比分析加入再生骨料对混凝土性能的影响.希望能为再生混凝土的研究及其在工程结构上的应用提供参考.

### 1 试验设计

#### 1.1 试验原材料

本次试验所用水泥为甘肃祁连山水泥公司的 42.5R 普通硅酸盐水泥.混凝土拌和及养护用水符合 JGJ 63—2006《混凝土用水标准》的规定.由于再生粗细骨料是影响再生混凝土各项性能的关键因素,故对天然和再生粗骨料的各项性能指标进行对比(表 1).天然和再生细骨料的筛分曲线如图 1 所示,其中砂的细度模数为 3.34,属于粗砂.再生粗细骨料的制作过程为:将 C30 的废弃混凝土用破碎机进行初步破碎,用筛子选取 5~31.5 mm 的碎块作为再生粗骨料,取 5 mm 以下的作为再生细骨料.将再生粗细骨料按不同的比例进行混凝土配制.

表 1 粗骨料的各项性能指标

Tab.1 Various performance indexes of coarse aggregate

原材料	吸水率 /%	压碎指标 /%	堆积密度 /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
天然粗骨料	1.03	7.43	1.145 6
再生粗骨料	5.65	13.30	0.900 4

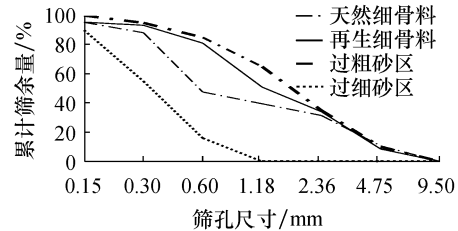


图 1 细骨料的筛分曲线

Fig.1 Screening curve of fine aggregate

#### 1.2 配合比设计

再生混凝土设计强度为 C30.参照 JGJ 55—2000《普通混凝土配合比设计规程》,水灰比取 0.57.因添加再生粗细集料吸水率较大,故采用高效减水剂.共设计 16 组试样,每组均做立方体抗压试验及劈裂抗拉试验.具体配比见表 2.

#### 1.3 再生混凝土试块的制作和养护

再生混凝土采用人工拌和,先将各混凝土用料搅拌均匀,再加水搅拌,搅拌 3~5 min 后,立即测量坍落度.将拌和物注入尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的模具中.振动台上振动密实后用刮刀抹平表面.24 h 后拆模.将再生混凝土试块放入养护室并在标准条件下养护 28 d,然后分别测其抗压强度和劈裂抗拉强度.

表 2 再生混凝土的配合比

Tab.2 Mixture ratio of recycled concrete

编号	再生粗骨料替代率/%	再生细骨料替代率/%	水灰比	配合比/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )					
				水	水泥	粗骨料		细骨料	
						石子	再生粗骨料	石子	再生细骨料
A1	0	0	0.57	180	350	1 180	0	730	0
A2	0	5	0.57	180	350	1 180	0	671	59
A3	0	10	0.57	180	350	1 180	0	612	118
A4	0	15	0.57	180	350	1 180	0	553	177
B1	15	0	0.57	180	350	1 003	177	730	0
B2	15	5	0.57	180	350	1 003	177	671	59
B3	15	10	0.57	180	350	1 003	177	612	118
B4	15	15	0.57	180	350	1 003	177	553	177
C1	30	0	0.57	180	350	826	354	730	0
C2	30	5	0.57	180	350	826	354	671	59
C3	30	10	0.57	180	350	826	354	612	118
C4	30	15	0.57	180	350	826	354	553	177
D1	50	0	0.57	180	350	590	590	730	0
D2	50	5	0.57	180	350	590	590	671	59
D3	50	10	0.57	180	350	590	590	612	118
D4	50	15	0.57	180	350	590	590	553	177

1.4 试验设备及试验方法

试验主要设备为 YES-2000 型压力试验机. 劈裂抗拉强度试验时需注意垫块、垫条的位置需对中, 加荷速度取 0.02~0.05 MPa/s; 抗压强度试验加荷速度取 0.3~0.5 MPa/s.

2 试验结果及数据分析

2.1 试验现象描述

再生混凝土抗压破坏过程与普通混凝土没有太大区别, 区别主要表现为劈裂抗拉的破坏. 再生混凝土的破坏断裂面上除了粗骨料和砂浆界面的破坏还有较多再生粗集料被劈裂, 这与普通混凝土的纯黏结破坏状况不同.

2.2 试验结果

由表 3 可知, 粗骨料配比一定情况下, 随再生细骨料的增加, 坍落度持续下降, 含气量总的来说属于增加状态. 所有配比均满足不泌水的要求.

2.3 抗压和劈裂抗拉强度拟合回归模型的确定

在试验数据的基础上, 为了更准确地分析再生混凝土强度规律, 研究在加入一定比例再生粗骨料的前提下, 强度随不同再生细骨料掺入量的变化规律. 采用软件 OriginPro 8.5 以再生细骨料的掺入比例为自变量, 抗压强度或抗拉强度为因变量, 选择以多项式为回归模型进行数据拟合, 通过拟合参数的

表 3 再生混凝土物理力学性能指标

Tab.3 Physical and mechanical performance indices of recycled concrete

编号	坍落度 /mm	含气量 /%	泌水率 /%	抗压强度值 /MPa	劈裂抗拉强度值 /MPa
A1	170	1.0	不泌水	32.23	3.90
A2	155	0.9	不泌水	27.65	2.85
A3	145	0.7	不泌水	28.22	4.13
A4	130	0.6	不泌水	26.60	3.24
B1	160	0.3	不泌水	27.94	2.81
B2	140	0.5	不泌水	26.96	2.78
B3	105	0.8	不泌水	26.42	3.98
B4	80	0.9	不泌水	26.34	3.25
C1	140	0.4	不泌水	25.26	3.96
C2	115	0.5	不泌水	27.41	3.56
C3	100	0.8	不泌水	29.15	3.43
C4	75	0.9	不泌水	25.47	3.32
D1	130	0.7	不泌水	19.04	2.70
D2	110	1.0	不泌水	21.06	3.14
D3	95	0.9	不泌水	27.70	3.22
D4	65	0.5	不泌水	26.91	3.37

精确度选择合适的回归模型. 多项式如下:

$$y = A + B_1X + B_2X^2 + B_3X^3 \quad (1)$$

$$y = A' + B'_1X + B'_2X^2 \quad (2)$$

式中:  $A, B_1, B_2, B_3, A', B'_1, B'_2$  代表参数估计值.

由表 4 可知, 回归模型(1)拟合曲线比回归模型(2)的相关系数大, 而标准差回归模型(1)比回归模型(2)小, 说明其拟合精度更高, 更适合选择.

表 4 抗压强度和劈裂抗拉强度曲线拟合的参数指标

Tab.4 Parametric indices of fitted curve of compressive strength and splitting tensile strength

再生粗骨料替代率/%	回归模型(1)				回归模型(2)			
	抗压强度		劈裂抗拉强度		抗压强度		劈裂抗拉强度	
	相关系数 R	标准差 $\sigma$	相关系数 R	标准差 $\sigma$	相关系数 R	标准差 $\sigma$	相关系数 R	标准差 $\sigma$
0	0.932 4	0.373 4	0.902 7	0.213 1	0.902 4	0.690 5	0.092 8	1.267 8
15	0.986 3	0.186 9	0.956 3	0.138 6	0.975 0	0.205 7	0.772 0	0.384 6
30	0.979 6	0.201 3	0.976 1	0.105 3	0.973 1	0.208 0	0.934 7	0.167 7
50	0.895 7	0.835 7	0.937 6	0.157 8	0.381 5	4.624 2	0.847 9	0.241 5

2.4 抗压和劈裂抗拉强度的统计分析

当再生粗骨料掺量为 0% 时, 抗压强度和劈裂抗拉强度整体均呈现先降低后增加, 再降低的态势; 且无论劈裂抗拉强度还是抗压强度都在再生细骨料掺量达到 10% 时取得峰值, 过 10% 以后急剧下降. 如图 2 所示. 相对来说, 劈裂抗拉强度较抗压强度的变化起伏较大.

当再生粗骨料掺量为 15% 时, 抗压强度随再生细骨料的增加变化不明显, 相对平缓. 劈裂抗拉强度与抗压强度相比变化稍微明显. 再生细骨料从 0% 到 10% 劈裂抗拉强度处于上升状态, 超过 10% 开始下降, 如图 2b 所示. 原因可能是抗压强度受粗骨料的影响较大, 再生粗骨料的影响弱化了再生细骨料的

作用; 而劈裂抗拉强度呈增加趋势或许是与石子相比再生粗细骨料黏结得更好, 增强了抗拉能力.

当再生粗骨料掺量为 30% 时, 劈裂抗拉强度和抗压强度变化都比较平稳. 分析原因, 应该是再生粗骨料的大量掺入已经完全弱化了再生细骨料的影响, 见图 2c. 当再生粗骨料掺量为 50% 时, 抗压强度随再生细骨料的增加变化很大, 整体变化幅度很大, 起伏在 20~32 MPa 之间. 可能是再生骨料掺入量大使得偶然因素影响较明显. 劈裂抗拉强度与抗压强度相比较平稳, 整体处于平稳状态, 见图 2d.

综合来看: 1) 抗压强度均有所降低, 劈裂抗裂强度因受力原因, 偶然因素影响较大规律不明显. 2) 当再生粗骨料掺量为 0% 时, 劈裂抗拉强度变化幅

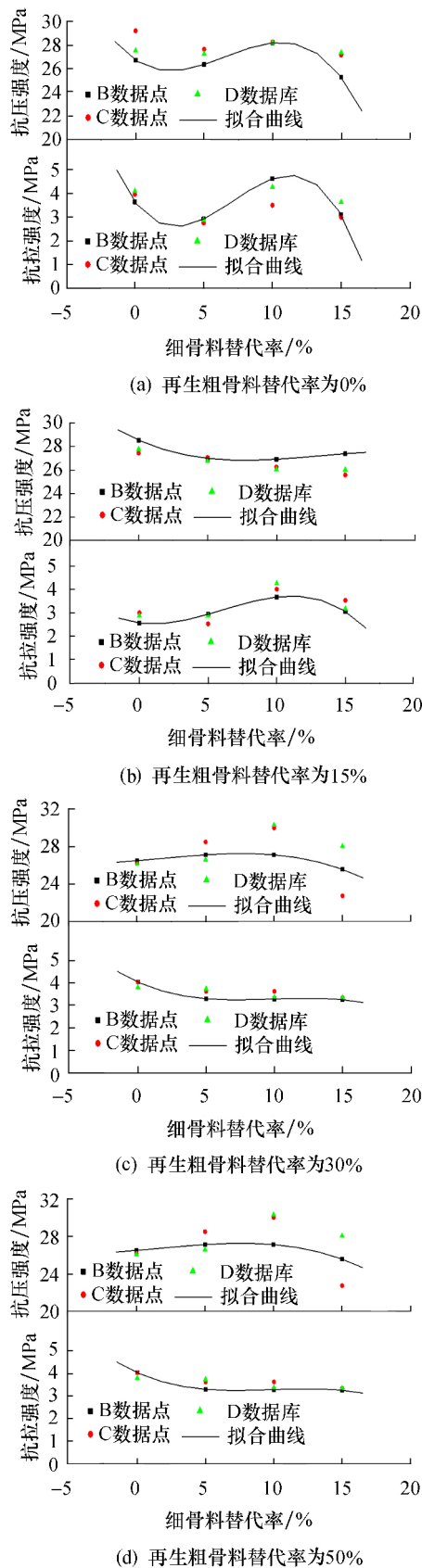


图 2 再生骨料替代率不同时再生混凝土的力学性能  
Fig.2 Mechanical performance of recycled concrete with different substitution rate of recycled aggregate

度大且呈现震荡态势;当再生粗骨料掺量为 50% 时,抗压强度变化幅度大且呈现震荡态势.两者均不是最佳掺量的首选.3) 当再生粗骨料掺量为 15%、30% 时,无论劈裂抗拉强度还是抗压强度变化都相对平稳,前者的劈裂抗拉强度相对较高而后者的抗压强度相对较高.可根据再生混凝土使用的具体情况来选择合适的掺量.

### 3 结论

1) 再生粗骨料与天然粗骨料相比,吸水率翻了 5 倍,压碎指标将近 2 倍,堆积密度有所减轻但相差不是很大.分析再生混凝土物理力学性能指标发现,随再生粗、细骨料的加入,坍落度均呈减小趋势;含气量规律不明显,但均满足不泌水的要求.

2) 由表 3 中坍落度、含气量与抗压强度和抗拉强度数据的对比知:强度随坍落度和含气量的减小呈现降低的趋势,其中抗压强度比抗拉强度表现得更加明显.

3) 当再生粗骨料掺量为 0%、50% 时,再生细骨料使得抗压强度或劈裂抗拉强度变化幅度大,不宜选择;当再生粗骨料掺量为 15%、30% 时,再生细骨料对抗压强度和劈裂抗拉强度的影响不显著.可按照满足实际应用的原则进行选择.

4) 通过强度的数学函数模拟,以相关参数的精确度选出较为合适的函数回归模型,即: $y = A + B_1 X + B_2 X^2 + B_3 X^3$  (三次多项式).

#### 参考文献:

- [1] 乔宏霞, 巩 位, 程千元, 等. 盐湖地区镁水泥钢筋混凝土耐久性试验 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(增刊 2): 346-352.
- [2] 乔宏霞, 周茗如, 朱彦鹏, 等. GHPC 抗硫酸盐腐蚀性评价参数设计 [J]. 兰州理工大学学报, 2009, 35(4): 129-132.
- [3] 汪加梁, 张 春. 再生混凝土梁抗弯性能试验 [J]. 兰州理工大学学报, 2016, 42(2): 130-134.
- [4] 王 磊, 何 晔, 张小月. 硅烷偶联剂改性再生塑料混凝土的力学性能 [J]. 兰州理工大学学报, 2014, 40(6): 136-139.
- [5] OLANIKE A O. A comparative analysis of modulus of rupture and splitting tensile strength of recycled aggregate concrete [J]. American Journal of Engineering Research, 2016, 3(2): 141-147.
- [6] WANG Hui, ZHAI Ailiang. Experimental study on the splitting tensile strength of recycled concrete made of brick and tile [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 166: 1521-1525.
- [7] 闫春岭, 赵韩菲, 田彦歌. 再生粗骨料混凝土的抗压强度正交试验分析 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(5): 738-744.
- [8] KIM S C, PARK D K, YOOG K C. Evaluation on the applicability of recycled fine aggregate to precast concrete products [J]. Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 2016, 4(1): 1-9.