

建筑垃圾再生混凝土的性价比研究

陈亭伟, 吕航杰, 丁 辉, 陈建康*
(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为了能够有效进行材料力学性能及成本耗费的比较研究, 提出了价格-强度比和价格-模量比两个衡量指标. 在再生混凝土材料体系设计方面, 骨料取自建筑垃圾混凝土, 选取了砂率分别为 30%、37%和 39%的 3 种材料体系. 通过添加不同比例的矿物掺合料, 形成了不同的材料配合比. 通过一维应力压缩实验, 得到了材料的模量和强度. 通过比较价格-强度比和价格-模量比的定量结果, 得到了性价比最优的材料配合比设计. 研究结果对于合理利用建筑垃圾形成力学性能优良的再生混凝土具有参考意义.

关键词: 建筑垃圾再生混凝土; 高强混凝土; 配合比; 矿物掺和料; 减水剂

中图分类号: TU528.31

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2021) 02-0080-07

随着城镇化改造和城市化建设的迅猛推进, 建筑垃圾已经成为破坏环境的重要因素之一. 目前, 在建筑垃圾混凝土方面, 国内已有几十所大学和研究机构开展了再生混凝土的研究. 而对废弃混凝土的再利用研究则主要集中在再生骨料^[1-3]和再生混凝土的力学性能、物理性能、耐久性能等方面^[4-8]. 然而, 力学性能高、耐久性能好、物理性能强通常导致再生混凝土成本的大幅提高, 制约了再生混凝土的工程应用. 即使有一些比较成功的应用^[9], 如近年福建宁化城区就将废弃水泥混凝土应用在城市道路建设中, 已通车道路使用性能较好^[10]; 北京市政路桥集团有限公司将再生骨料应用在北京轨道交通新机场线中, 施工效果良好^[11]. 但这些应用场景都对混凝土强度要求较低, 所以研发性能较好、成本较低, 即性价比高的混凝土配合比方案显得至关重要.

基于目前的研究, 建筑垃圾的强度^[12-13]已非常可观. 当再生集料取代率为 0~50%时, 再生混凝土强度呈现先下降后上升的趋势, 其强度在取代率为 30%附近达到最低值, 在 50%位置达到峰值, 且强度可以超过再生集料取代率为 0 的混凝土强

度^[14-15].

本文以浙江明峰建材集团的建筑垃圾破碎筛选生产线生产的再生骨料取代原有骨料, 选取 23%及 30%的取代率, 通过对砂率和矿物质掺和料的比例调整, 使得混凝土强度提升的同时保证其有较高的性价比, 其中 A4、C1 组再生混凝土强度分别达到 79.26、78.40 MPa, 且强度值较为稳定.

本研究从抗压强度、性价比两个方面进行分析, 提出价格强度比、价格模量比概念, 给出了评判混凝土性价比的定量评定指标.

1 实验研究

1.1 再生混凝土的配合比设计

为了比较再生混凝土的力学性能, 本文探究了不同砂率且保持胶凝材料总量不变的情况下, 调整矿物掺和料的比例来得到最高强度的配比. 本文选取了 3 套设计方案, 分别在砂率为 30%、37%、39%的实验中, 调整矿物掺和料比例. 各砂率条件下具体的混凝土配合比见表 1~3, 其中 A4、B4 和 C4 组(作为对照组)采用普通混凝土的配合比设计.

收稿日期: 2020-05-07.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11772164, 11832013); 宁波市社发重点项目(2013C51007).

第一作者: 陈亭伟(1997-), 男, 浙江温岭人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 混凝土腐蚀损伤力学. E-mail: young1_chen.nb@foxmail.com

*通信作者: 陈建康(1957-), 男, 江苏宿迁人, 教授, 主要研究方向: 混凝土腐蚀损伤力学. E-mail: chenjiankang1957@163.com

表 1 30%砂率条件下的混凝土配合比

编号	水灰比	水/kg	粉煤灰/kg	硅灰/kg	水泥/kg	沙子/kg	再生骨料/kg	一级粗骨料/kg	瓜子片/kg	磨细矿渣粉/kg	减水剂/mL
A1	0.24	3.08	1.54	0.77	13.09	19.10	10.35	27.60	6.90	3.08	1 375
A2	0.28	2.46	2.46	1.23	8.62	15.28	8.28	22.08	5.52	2.46	1 237
A3	0.36	2.46	3.70	1.85	6.78	15.28	8.28	22.08	5.52	2.46	1 650
A4	0.20	2.46	0	0	12.32	15.28	8.28	22.08	5.52	2.46	600

表 2 37%砂率条件下的混凝土配合比

编号	水灰比	水/kg	粉煤灰/kg	硅灰/kg	水泥/kg	沙子/kg	再生骨料/kg	一级粗骨料/kg	瓜子片/kg	磨细矿渣粉/kg	减水剂/mL
B1	0.27	1.71	0.85	1.28	6.41	27.33	13.91	25.96	6.49	1.71	600
B2	0.27	1.71	1.71	0.43	6.41	27.33	13.91	25.96	6.49	1.71	1 500
B3	0.33	1.71	2.56	0.85	5.12	27.33	13.91	25.96	6.49	1.71	2 200
B4	0.20	1.71	0	0	8.40	27.33	13.91	25.96	6.49	0	2 100

表 3 39%砂率条件下的混凝土配合比

编号	水灰比	水/kg	粉煤灰/kg	硅灰/kg	水泥/kg	沙子/kg	再生骨料/kg	一级粗骨料/kg	瓜子片/kg	磨细矿渣粉/kg	减水剂/mL
C1	0.26	3.08	1.54	0.77	13.09	20.23	9.345	17.44	4.36	3.08	—
C2	0.29	3.08	3.08	1.54	10.78	20.23	9.345	17.44	4.36	3.08	—
C3	0.37	3.08	4.62	2.31	8.41	20.23	9.345	17.44	4.36	3.08	825
C4	0.20	3.08	0	0	15.40	20.23	9.345	17.44	4.36	0	825

1.2 混凝土试样的制作与养护

根据配合比设计, 采用的主要原料有原石粗骨料、原石细骨料、再生骨料、水泥、硅灰、粉煤灰、磨细矿渣粉等. 试样养护时间为 28 d.

如图 1 所示, 样品是规格为 150 mm×150 mm×150 mm 的标准立方体块, 具体编号为: A1-1 至 A1-8; A2-1 至 A2-5; A3-1 至 A3-7; A4-1 至 A4-6; B1-1 至 B1-7; B2-1 至 B2-6; B3-1 至 B3-8; B4-1 至 B4-8; C1-1 至 C1-6; C2-1 至 C2-7; C3-1 至 C3-5; C4-1 至 C4-4.



图 1 再生混凝土试块

1.3 材料的力学性能测试

试块的力学性能测试在宁波市交通建设工程试验检测中心进行, 测试的压力机为上海华龙测试仪器股份有限公司生产的 WHY-3000 型微机控制压力试验机(图 2).



图 2 WHY-3000 型微机控制压力试验机

2 性价比分析

2.1 强度比较

强度实验结果如图 3~14 所示. 经过实验, 可以发现 A 大组中, 对照组 A4 组强度普遍较高, 平均值达到 79.26 MPa, 最高值达到 90.50 MPa.

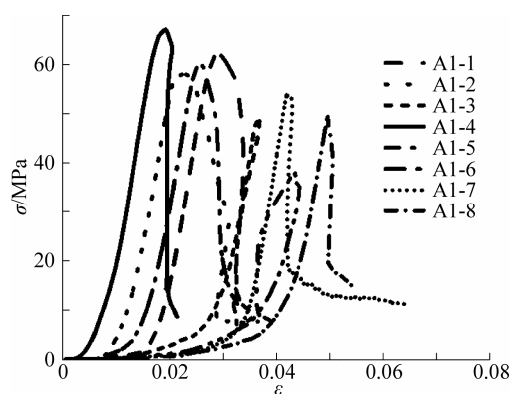


图3 A1组试样应力—应变曲线

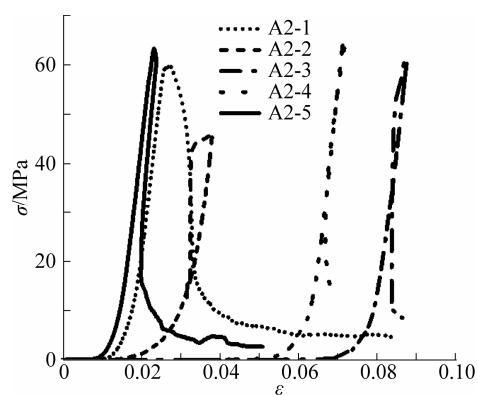


图4 A2组试样应力—应变曲线

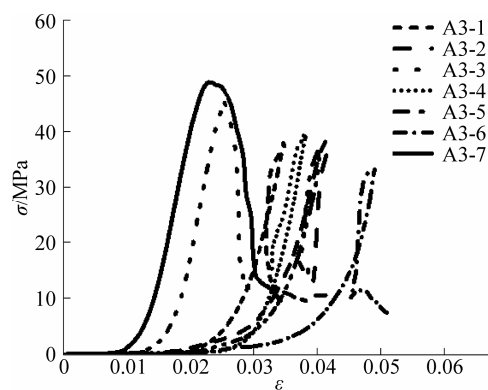


图5 A3组试样应力—应变曲线

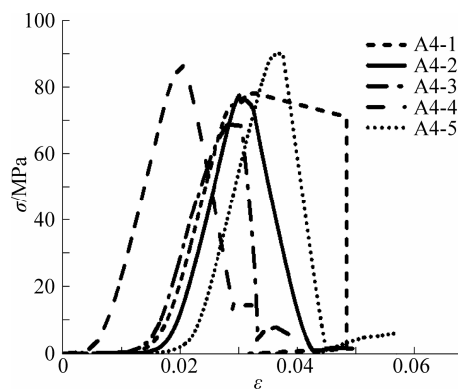


图6 A4组试样应力—应变曲线

B大组中, B1组强度较高, 平均值达到 42.24 MPa. 相比其他两大组而言, B大组强度普遍较低.

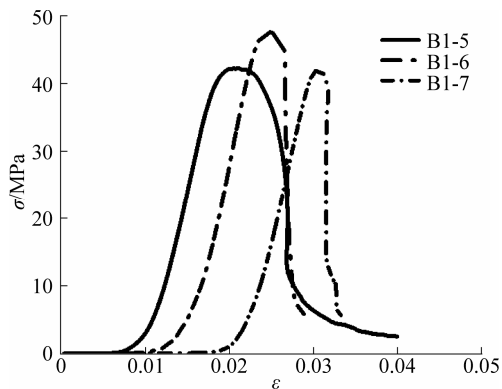
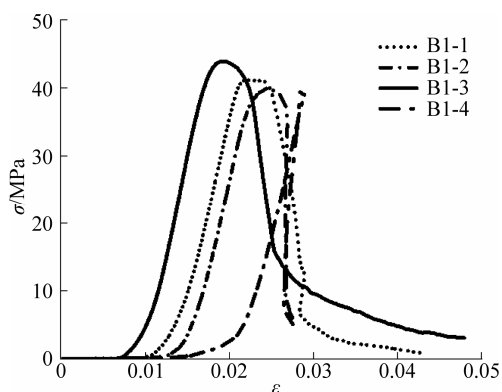


图7 B1组试样应力—应变曲线

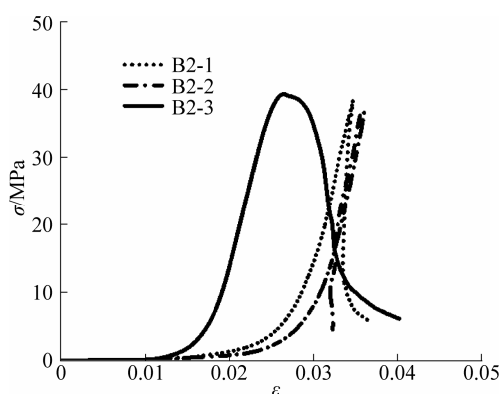


图8 B2组试样应力—应变曲线

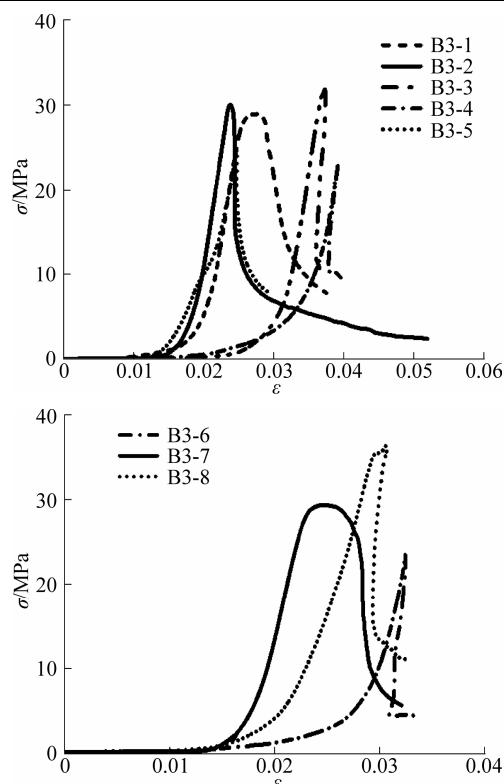


图9 B3组试样应力—应变曲线

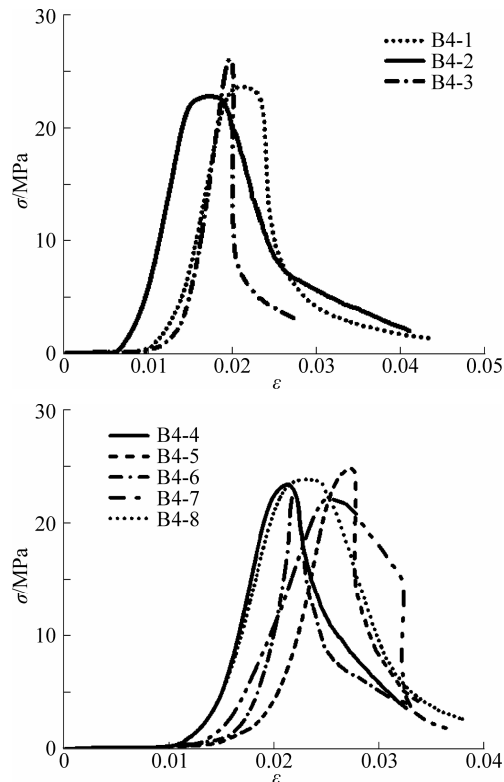


图10 B4组试样应力—应变曲线

C大组中C1组强度较高, 相较A4组强度稍低, 但整体上强度值比较稳定, 平均值达到78.40 MPa.

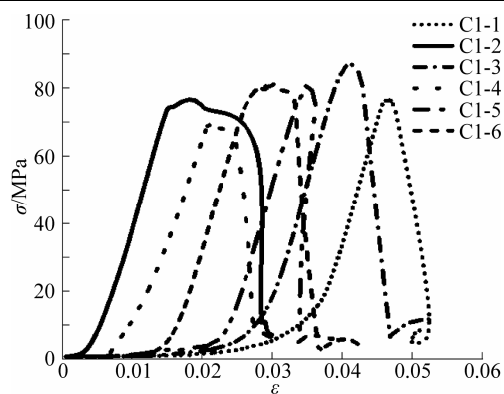


图11 C1组试样应力—应变曲线

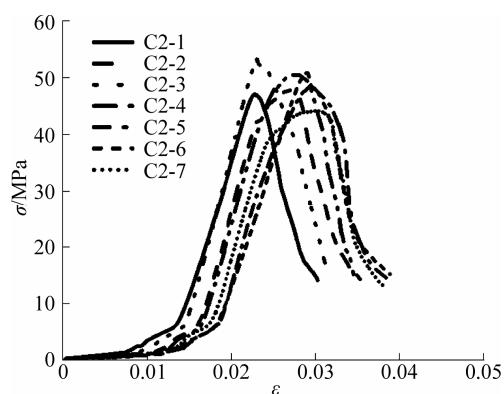


图12 C2组试样应力—应变曲线

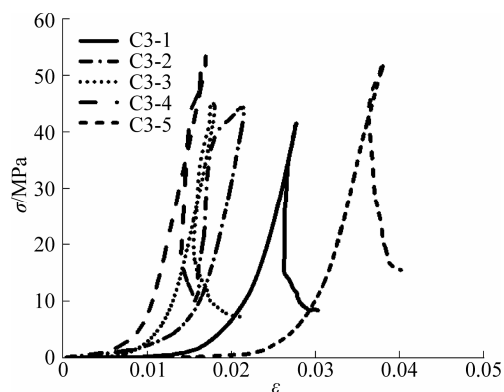


图13 C3组试样应力—应变曲线

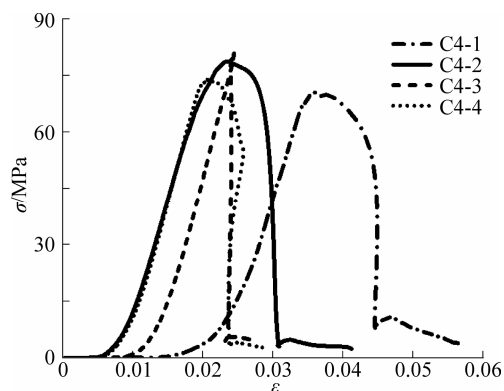


图14 C4组试样应力—应变曲线

综上, A4 组及 C1 组配比强度较高, 且强度值较为稳定, 性能较为优秀。

2.2 性价比

统计了宁波市场的原料价格(表 4)。根据表 4 的价格, 计算了每种配比状态下每立方米混凝土的价格(表 5)。

表 4 原料价格 元·kg⁻¹

原料	单价	原料	单价
粉煤灰	5	一级粗骨料	1
硅灰	18	瓜子片	1
水泥	1.2	磨细矿渣粉	17
沙子	1	聚酯树脂	14.5
再生骨料	0.8		

表 5 不同组别混凝土价格 元·m⁻³

组别	单价	组别	单价
A1	4 734	B3	4 418
A2	5 761	B4	2 666
A3	6 402	C1	5 300
A4	4 768	C2	6 254
B1	5 712	C3	7 721
B2	5 246	C4	3 674

为便于对结果进行分析, 绘制了各大组的弹性模量表, 具体见表 6~8。

表 6 A 组弹性模量表 MPa

组别	弹性模量	组别	弹性模量
A1-1	5 937	A3-1	5 100
A1-2	5 791	A3-2	4 807
A1-3	5 818	A3-3	5 944
A1-4	6 344	A3-4	5 942
A1-5	4 791	A3-5	4 815
A1-6	5 991	A3-6	5 035
A1-7	6 531	A3-7	5 416
A1-8	6 057	A3 平均	5 294
A1 平均	5 908	A4-1	6 759
A2-1	6 813	A4-2	6 998
A2-2	6 215	A4-3	5 645
A2-3	6 069	A4-4	7 162
A2-4	7 124	A4-5	6 950
A2-5	6 667	A4 平均	6 703
A2 平均	6 578		

表 7 B 组弹性模量表 MPa

组别	弹性模量	组别	弹性模量
B1-1	5 218	B3-3	5 343
B1-2	5 328	B3-4	5 035
B1-3	5 916	B3-5	5 330
B1-4	5 063	B3-6	5 863
B1-5	5 346	B3-7	5 279
B1-6	5 796	B3-8	4 621
B1-7	5 569	B3 平均	5 216
B1 平均	5 462	B4-1	3 738
B2-1	5 317	B4-2	3 590
B2-2	5 791	B4-3	4 011
B2-3	4 909	B4-4	3 950
B2-4	5 305	B4-5	3 944
B2-5	6 513	B4-6	3 784
B2-6	6 439	B4-7	3 562
B2 平均	5 712	B4-8	3 658
B3-1	5 008	B4 平均	3 780
B3-2	5 245		

表 8 C 组弹性模量表 MPa

组别	弹性模量	组别	弹性模量
C1-1	7 085	C2-7	5 357
C1-2	7 050	C2 平均	5 300
C1-3	7 285	C3-1	5 913
C1-4	5 833	C3-2	7 351
C1-5	7 038	C3-3	7 853
C1-6	7 124	C3-4	6 731
C1 平均	6 903	C3-5	5 921
C2-1	4 980	C3 平均	6 754
C2-2	5 710	C4-1	6 029
C2-3	5 565	C4-2	6 364
C2-4	5 032	C4-3	7 105
C2-5	5 466	C4-4	6 886
C2-6	5 001	C4 平均	6 596

综上可得, A 大组中 A1 组配比的混凝土价格最低, A4 次之。B4、C4 分别为 B、C 大组中的价格最低组。

通过对图 3~14 所示的强度进行比较, 可以看出 A4 组及 C1 组的强度值较高且较稳定。再对照表 5 的价格进行比较, A4 组每立方米混凝土价格较 C1 组低约 500 元, 且强度较 C1 组高, 具有较高的应用价值。

不同组别价格及强度对比如图 15 所示。

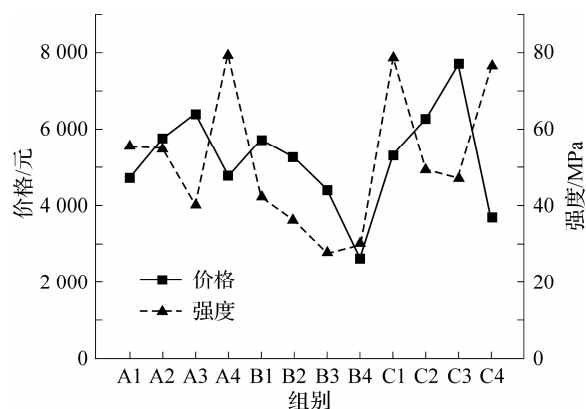


图 15 不同组别的价格与强度对比

为了更明显地比较各组的价格和强度之间的关系, 定义“价格-强度比等于价格除以强度”, 价格-强度比越小, 则每提高 1 MPa 强度所需金额越少。不同组别价格-强度对比如图 16 所示, 可以发现 A4、C1、C4 价格-强度比较低, 较为经济。计算试样的弹性模量, 并定义“价格-模量比等于价格除以弹性模量”, 不同组别价格-模量对比如图 17 所示。

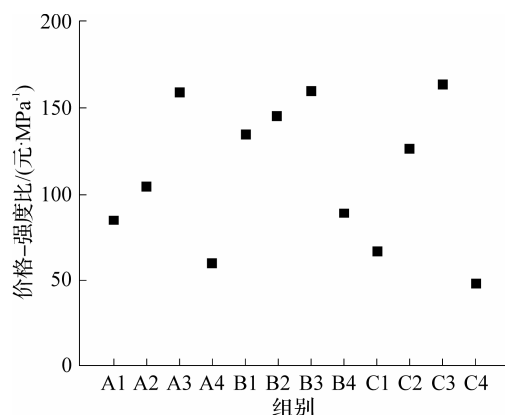


图 16 不同组别的价格-强度比

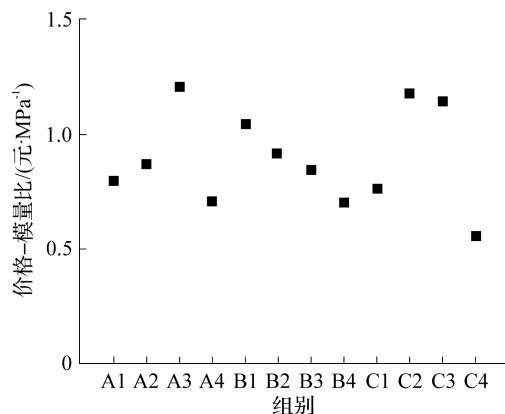


图 17 不同组别的价格-模量比

价格-模量比越小, 则每提高 1 MPa 弹性模量所需金额越少。从图 17 中可以发现价格-模量比趋势与价格-强度比趋势基本一致, A4、B4、C1、C4 价格-模量比较低, 较为经济。

综上所述, 在本文所设计的配比中, A4、C1、C4 组性价比较好。

3 结论

通过对 3 种试验方案中的结果进行分析, 可以得到如下结论:

(1)通过一定的配比, 建筑垃圾中的再生骨料等废料可以得到重新利用并且形成较高强度的混凝土。

(2)实验发现, A4、C1 组配比下的再生混凝土强度较高, 平均值分别达到 79.26、78.40 MPa, 且两组样品在具有较高强度值的同时, 其强度数值较为稳定, 利用价值较大。

(3)综合考虑价格因素, 结合各组别价格-强度比、价格-模量比分析, A4、C1、C4 组配比在保持价格相对较低的同时, 具有较高的强度, 因而具有较高的应用价值。

(4)再生混凝土在 23% 及 30% 再生骨料取代率下, 可通过砂、掺和料及减水剂的使用来提升混凝土强度, 具体可参阅 A4、C1、C4 组的配比。

参考文献:

- [1] 徐咏梅. 不同工艺再生骨料对混凝土耐久性能影响研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2019(5):33-36.
- [2] 应敬伟, 蒙秋江, 肖建庄. 再生骨料 CO₂ 强化及其对混凝土抗压强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2): 277-282.
- [3] Agarwal A, Bhusnur S, Shanmuga Priya T. Experimental investigation on recycled aggregate with laboratory concrete waste and nano-silica[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 22(4):1433-1442.
- [4] 史才军, 曹芷杰, 谢昭彬. 再生混凝土力学性能的研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(23):96-103.
- [5] 安新正, 杨莹莹, 陈科, 等. 腐蚀环境下再生混凝土结构耐久性设计研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2016, 33(2):15-18.
- [6] Mohammed S I, Najim K B. Mechanical strength flexural behavior and fracture energy of recycled concrete aggregate self-compacting concrete[J]. Structures, 2020,

- 23:34-43.
- [7] 戴俊, 李传净, 杜文平. 高品质再生混凝土粗骨料物理性能试验研究[J]. 混凝土, 2017(7):88-91.
- [8] 王国林, 祁尚远, 李聚义, 等. 再生粗骨料混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2020(3):168-171.
- [9] Mohammadinia A, Wong Y C, Arulrajah A, et al. Strength evaluation of utilizing recycled plastic waste and recycled crushed glass in concrete footpaths[J]. Construction and Building Materials, 2019, 197:489-496.
- [10] 孙剑. 基于宁化道路实例的废旧水泥混凝土再生应用研究[J]. 建材与装饰, 2019(8):272-273.
- [11] 石坚, 田景松. 建筑垃圾再生骨料在北京轨道交通新机场线中的应用研究[J]. 市政技术, 2018, 36(4):234-237.
- [12] Sahoo S, Singh B. Recycled aggregate concrete slab punching shear capacity[J]. Structures, 2020, 24:426-443.
- [13] 何东林, 李军, 宋太华. 再生混凝土强度试验研究[J]. 人民黄河, 2009, 31(10):124-125.
- [14] 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.
- [15] 肖建庄, 李佳彬, 孙振平, 等. 再生混凝土的抗压强度研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(12):1558-1561.

Comparative study on cost performance of recycled concrete from construction waste

CHEN Tingwei, LÜ Hangjie, DING Hui, CHEN Jiankang*

(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In this study, the cost performance was investigated for recycled concrete from construction waste. Two indexes were proposed to quantificationally represent such a cost performance, namely, price-to-strength ratio (PSR) and price-to-modulus ratio (PMR). The aggregate was taken from construction waste concrete with varied proportion of mineral admixture added in the specimens, where the sand ratios of 30%, 37%, and 39% were designed. One-dimensional compress test was performed, and the strength and modulus were obtained by analyzing the experimental data. According to the definition of PSR and PMR, the values of PSR and PMR for recycle concrete with different mix ratios were obtained, and from those numerical results, the optimal mix ratio was determined. The results have reference significance for the rational use of construction waste to form recycled concrete with excellent mechanical properties.

Key words: recycled concrete from construction waste; high-strength concrete; mix ratio; mineral admixture; water reducing agent

(责任编辑 韩 超)