

混杂来源再生混凝土的抗压强度及衍射分析

齐 武^a, 张云莲^b, 彭建庭^a

(浙江科技学院 a. 土木与建筑工程学院; b. 中德工程师学院, 杭州 310023)

摘 要: 利用混杂来源再生骨料(混杂骨料)和单一来源再生骨料(单一骨料)逐步替代天然骨料,讨论不同水灰质量比下再生骨料掺量对再生混凝土抗压强度的影响,并结合X射线衍射方法,分析混杂再生混凝土不同龄期的水化程度。试验结果表明:随着混杂骨料掺量从0%到100%逐步增加,水灰质量比为0.50、0.55、0.60的3组混杂再生混凝土的抗压强度均迅速降低,其中水灰质量比为0.55的试件组降低速率最小;混杂骨料掺量为100%时,在所测试龄期范围内,再生混凝土抗压强度比未掺再生骨料的空白试件降低了18.7%~33.2%。水灰质量比同为0.55时,混杂再生骨料混凝土的抗压强度均低于同条件下单一再再生混凝土的抗压强度;掺量较少时,混杂骨料和单一骨料来源问题对再生混凝土的早期抗压强度影响不大,但达75%大掺量后对再生混凝土的后期抗压强度有明显影响。X射线衍射分析表明,混杂再生骨料中含有较多的C₃S和C₂S熟料组分,其活性较低,这导致掺加再生骨料后混凝土强度的降低。

关键词: 再生骨料混凝土;混杂骨料;单一骨料;抗压强度;X射线衍射分析

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8798(2017)05-0366-05

Analysis on compressive strength and XRD of recycled concrete with blended-source recycled aggregate

QI Wu^a, ZHANG Yunlian^b, PENG Jianting^a

(a. School of Civil Engineering and Architecture; b. Chinese-German Institute of Applied Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: With natural aggregate being gradually replaced by blended-source recycled aggregate (BA) and single-source aggregate (SA), this article discusses the influence of recycled aggregate (RA) dosage on the compressive strength of recycled aggregate concrete (RAC) with different water/cement (W/C) ratios. Based on the X-ray diffraction (XRD) method, the hydration situation of RAC with BA is tested at different curing ages. The results indicate that the compressive strength of three RAC groups with W/C ratios of 0.50, 0.55 and 0.60 decreases drastically with the gradual increase of BA replacement from 0% to 100%, among

收稿日期: 2017-03-18

基金项目: 浙江科技学院学科交叉预研专项项目(2013JC08Y)

通信作者: 张云莲(1968—),女,浙江省浦江人,教授,博士,主要从事高性能水泥基材料研究。E-mail: qinger0302@aliyun.com。

which the decreasing rate of the specimen with W/C of 0.55 is the smallest. When the dosage of BA being 100%, the compressive strength of concrete specimens diminishes by 18.7% ~ 33.2% within the testing period, compared to the control ones without dosage. When W/C being 0.55, the compressive strength of RAC with BA is lower than that of RAC with SA. When the dosage being fairly little, the origin of BA and RA has no apparent impact on the early compressive strength of RAC, but very significant impact on the late strength when dosage being up to 75%. The X-ray diffraction(XRD) tests imply large quantities of clinker composites of C_3S and C_2S exist in BA, with low activity, resulting in the strength decrease of RAC.

Keywords: recycled aggregate concrete(RAC); blended-source recycled aggregate(BA); single-source recycled aggregate(SA); compressive strength; X-ray diffraction(XRD)

近年来,中国每年因建筑物新建和拆除过程中产生的固体建筑废弃物总量达3亿t,仅废弃混凝土就有1亿t左右^[1-2]。将废弃的混凝土破碎、除杂、筛分制成再生粗骨料,部分替代或全部替代天然骨料配制成再生混凝土,是处理建筑废弃物的有效途径,对发展绿色混凝土具有重要意义。大量研究表明,再生混凝土由于受再生骨料的种类^[3]、品质^[4-6]、掺量^[7-9]的影响,其力学性能逊于传统混凝土^[10-12]。随着再生骨料取代率的增大,再生混凝土抗压强度下降明显,这主要是因为再生骨料与天然骨料相比,具有孔隙率高、吸水率大、强度低及压碎指标大等缺陷^[13]。

目前,大多数研究采用的再生骨料以单一来源再生骨料^[14](以下简称单一骨料)为主,其原生混凝土常为同强度、同龄期的同一批次混凝土,因此工程代表性不强。少数研究以混杂来源再生骨料(以下简称混杂骨料)为研究对象,其原生混凝土种类复杂,龄期、强度、配合比均不相同,这比较符合工程实际。再生骨料的来源和原生混凝土强度是影响再生骨料品质的重要因素^[15],混杂骨料表观密度相对较小,但吸水率、含水率和压碎指标常常比单一骨料大,对再生混凝土的力学性能影响与单一骨料相比不尽相同^[16]。在实验室的教学和科研过程中,每次混凝土试块成形结束或试块加载破坏后都将产生大量废弃的混凝土,随意倾倒既浪费资源又会给环境带来破坏,因此,开展实验室废弃混凝土的再生利用研究具有一定的现实意义。笔者利用试验室积存的废弃混凝土试块,破碎处理后获得混杂骨料和单一骨料,用以替代部分天然骨料制作再生混凝土,以此来比较分析混杂骨料和单一骨料对再生混凝土抗压强度的影响,并结合X射线衍射分析,以比较混杂再生混凝土不同龄期的水化特性。

1 试验设计

1.1 试验原材料

混杂骨料采用实验室4种废弃2年以上的混凝土试块:无掺合料的普通混凝土、掺粉煤灰混凝土、掺橡胶粉混凝土和再生粗骨料混凝土,其龄期各不相同,强度为C20~C30,经破碎、混合、筛分处理后制成。单一骨料采用混杂骨料的第一种混凝土即无掺合料的普通混凝土试块破碎筛分而成。混杂骨料和单一骨料在搅拌混凝土前都进行了预吸水处理。

粗骨料的物理性能如表1所示,三者级配良好,皆为连续级配。水泥采用42.5钱潮牌普通硅酸盐水泥。砂采用天然河砂,表观密度为2564 kg/m³,细度模数为2.46,为中砂,级配良好。

1.2 试验方法

根据JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》^[17]进行混凝土配合比设计,选用基准质量配合比

表1 粗骨料物理性能

Table 1 Physical properties of coarse aggregates

骨料情况	含水率/%	表观密度/(kg·m ⁻³)	吸水率/%
天然粗骨料	0.3	2 683	1.64
单一骨料	0.8	2 548	7.11
混杂骨料	4.6	2 407	9.09

水泥:砂:石=1:1.90:3.37,成形水灰质量比分别为 0.5、0.55、0.6 的 A、B、C 三组混杂来源再生骨料混凝土试块,每种水灰质量比下考虑混杂骨料掺量分别为 0%、25%、50%、75%、100%。另外,成形 D 组水灰质量比为 0.55 的单一来源再生混凝土,其单一骨料掺量水平与 A、B、C 组相同,混凝土搅拌过程中利用减水剂控制坍落度基本一致。

混凝土试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm,采用人工搅拌机械振实,标准养护 24 h 后拆模,移至水中养护至待测龄期,分别测定各组试件的 7、14、28、56 d 的抗压强度。对于水灰质量比为 0.55 的混杂来源再生混凝土(B 组)同时制备试样进行各龄期的 X 射线衍射试验。

2 试验结果分析

各组再生混凝土试块的抗压强度结果如表 2 所示。与普通混凝土相同,掺混杂骨料的 A、B、C 组和掺单一骨料的 D 组再生混凝土的抗压强度随着龄期的增长而增大,但早期抗压强度的增长比掺量为 0% 的普通混凝土慢,14 d 后,其增长速度超越普通混凝土(表 3)。这是因为预湿处理过的再生骨料中的水随着水泥水化的进行释放出来参与水化,促进了再生混凝土抗压强度的增长^[18]。

表 2 不同龄期再生混凝土的抗压强度

Table 2 Compressive strength of recycled concrete at different curing ages

再生骨 料掺量/ %	抗压强度/MPa															
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	(7 d)				(14 d)				(28 d)				(56 d)			
0	29.47	21.82	20.17	21.82	31.68	26.39	26.37	26.39	37.97	29.39	28.01	29.39	37.19	32.61	31.17	32.61
25	24.55	19.44	16.10	19.50	27.37	24.04	18.91	24.82	32.31	28.43	23.10	28.60	34.31	32.07	27.64	32.10
50	22.22	18.36	15.72	18.38	26.30	23.87	18.88	24.00	30.73	26.55	22.55	27.63	32.49	28.38	25.45	30.05
75	21.60	18.25	13.70	18.25	24.06	21.85	17.76	23.54	28.30	25.72	20.95	26.58	29.30	27.01	22.96	28.53
100	20.94	17.20	13.47	17.22	25.74	19.78	16.78	21.73	27.76	22.89	20.60	26.09	28.85	26.51	22.09	27.22

表 3 再生骨料混凝土 14~28 d 的强度增长率

Table 3 Strength increasing rate of RAC from 14 d to 28 d

混杂骨料掺量	A	B	C	D
0	10.39	11.37	18.34	11.37
25	18.05	18.26	22.16	15.23
50	16.84	11.23	19.44	15.13
75	17.62	17.71	17.96	12.91
100	16.93	16.28	22.77	20.06

2.1 混杂来源再生骨料混凝土的抗压强度

2.1.1 水灰质量比对混杂来源再生混凝土抗压强度的影响

与普通混凝土相似,水灰质量比对混杂来源再生骨料混凝土强度起着重要作用。同龄期、同混杂骨料掺量情况下,随着水灰质量比的增大,各组混杂来源再生骨料混凝土的抗压强度下降明显。

混杂骨料掺量为 0% 时,水灰质量比为 0.55 的 B 组与水灰质量比为 0.60 的 C 组在各龄期的抗压强度相差不大,但比 A 组(水灰质量比 0.50)小得多,即水灰质量比越大混凝土的强度越小。而一旦掺加混杂骨料,B 组与 C 组的差距立即增大,反映出水灰质量比和混杂骨料掺量的叠加效应。水灰质量比为 0.55 的 B 组,各龄期下随着混杂骨料掺量的增加而下降的速率均比 A 组和 C 组小,说明该试验条件下随着混杂骨料掺量的增加,选用水灰质量比 0.55 较之 0.50 和 0.60 合适。

2.1.2 混杂骨料掺量对混凝土抗压强度的影响

从表 2 可以看出,随着混杂骨料掺量的增加,各龄期同水灰质量比的混杂来源再生骨料混凝土抗压强度均迅速降低,且以水灰质量比为 0.60 的 C 组下降幅度最大。混杂骨料掺量为 100% 时,其各龄期的抗压强度与未掺混杂骨料的空白试件相比降低了 18.7%~33.2%。这与相关的研究结果一致:由于混杂骨料包裹的老砂浆中含有较多孔隙和裂缝^[19],由 C20~C35 废弃混凝土制备的再生骨料,随着混杂骨

料掺量的增加,再生混凝土基本力学性能明显下降^[20]。

混杂骨料掺量小于75%时,随着掺量的增加,各龄期再生混凝土的抗压强度下降均较快;而掺量大于75%后,抗压强度变化趋于平缓。这说明当混杂骨料掺量达到一定程度后,掺量的影响不再是混杂来源再生骨料混凝土抗压强度的主要因素。

2.2 单一来源再生骨料混凝土的抗压强度

水灰质量比为0.55的单一来源再生骨料混凝土(D组)的抗压强度随着掺量的增加而降低,随着龄期的增长而增大。与水灰质量比同为0.55的B组混杂来源再生骨料混凝土相比可知:龄期为7d时,所有掺量下D组与B组的抗压强度均较为接近;龄期为14d时,掺量25%时,抗压强度稍有差异,而掺量0%和50%时,抗压强度均相同,只有掺量大于75%后,D组抗压强度明显超越B组。龄期为28d和56d时,当混杂骨料掺量大于50%后,D组才超越B组。这说明在早期相同条件下,由混杂骨料和单一骨料来源问题带来的影响不大;随着龄期的增长,再生骨料来源差异逐渐显现,较大掺量下会引起抗压强度的分化,越到后期,这种影响越明显。

2.3 X射线衍射分析

根据不同的衍射角度标记处相应的物相,通过比较特征峰值,可半定量比较物相在水化过程中的变化规律。通过X射线衍射分析混杂来源再生骨料混凝土中尚未水化的水泥熟料 C_3S 和 C_2S ,以及水化产物 $Ca(OH)_2$ 、钙矾石(Aft)等的衍射强度,根据这些物相变化来分析混杂骨料对再生混凝土水化程度的影响。物相衍射角度, $Ca(OH)_2$ 选 34° , C_3S 选 29.4° ,各组试样的衍射图谱相似。统计混杂来源再生骨料混凝土在不同龄期的 C_3S 和 C_2S 及水化产物 $Ca(OH)_2$ 衍射峰值,如表4所示。

表4 不同龄期混杂来源再生骨料混凝土衍射峰值

Table 4 Peaks of XRD of RAC with BA at different curing ages

混杂骨料 掺量/%	C_3S 和 C_2S (7 d)	$Ca(OH)_2$ (7 d)	C_3S 和 C_2S (14 d)	$Ca(OH)_2$ (14 d)	C_3S 和 C_2S (28 d)	$Ca(OH)_2$ (28 d)	C_3S 和 C_2S (56 d)	$Ca(OH)_2$ (56 d)
0	17.0	15.7	16.2	16.6	15.2	16.8	14.7	17.8
25	17.1	15.8	16.9	16.2	15.0	16.9	14.1	17.5
50	17.5	15.0	16.1	15.3	15.3	15.7	14.7	16.0
75	17.1	14.0	16.8	14.5	16.0	16.4	15.0	16.7
100	17.6	13.9	17.1	15.2	16.2	15.7	15.7	16.9

由表4可以看出,随着龄期的增长,同掺量下各组试件的 $Ca(OH)_2$ 衍射峰值逐渐增大,水泥熟料 C_3S 和 C_2S 的峰值不断降低,这说明随着龄期的增长水化反应不断深入,表明随着水泥水化的不断进行,各组再生混凝土抗压强度逐渐增长。

同龄期下混杂骨料掺量较小时,混杂来源再生骨料混凝土 $Ca(OH)_2$ 衍射峰值都很接近;当掺量为50%、75%、100%时, $Ca(OH)_2$ 衍射峰值都有不同程度的降低。另外,龄期为14d的试验结果稍有波动(可能由试验误差引起), C_3S 和 C_2S 峰值随着混杂骨料掺量的增加而有所增大。究其原因是 C_2S 和 C_3S 为水泥熟料主要组分,水化均生成 $C-S-H$ 水化硅酸钙胶体和 $Ca(OH)_2$ 。随着水泥水化的进行,熟料中 C_3S 和 C_2S 不断减少,但由于再生骨料表面附着的老水泥砂浆含有大量未水化的水泥熟料颗粒,其活性较差,其中的 C_3S 和 C_2S 不易进行二次水化反应。因此,由混杂骨料掺量增加而带来的 C_3S 和 C_2S 的增加幅度超越了由于水泥水化产生的 C_3S 和 C_2S 的减少,故 C_3S 和 C_2S 的衍射峰值表现为随着混杂骨料掺量增加而增大。这也从另一个侧面表明:混杂骨料不仅其老砂浆部分基本不会水化,且带来更多薄弱界面会导致混杂来源再生骨料混凝土抗压强度随着混杂骨料掺量的增加而下降。

3 结 论

综上所述,可以得出以下结论:

1)再生混凝土的抗压强度随着龄期的增长而增大,但早期抗压强度的增长比普通混凝土慢,28d后,

其增长速度超越普通混凝土。

2) 混杂来源再生骨料混凝土的抗压强度随着混杂骨料掺量的增加而迅速降低,但当混杂骨料掺量达 75% 后降低速率变缓。掺 100% 混杂骨料时,在所测试龄期范围内,混杂来源再生骨料混凝土抗压强度比空白未掺试件降低了 26.7%~32.5%。

3) 本试验条件下,0.55 为最优水灰质量比,其混杂来源再生骨料混凝土抗压强度随着混杂骨料掺量增加而下降的速率比水灰质量比为 0.50 和 0.60 的试件小。

4) 混杂来源再生骨料混凝土的抗压强度均低于相同条件下单一来源再生骨料混凝土的抗压强度。掺量较小时,混杂骨料和单一骨料来源问题对再生混凝土的早期抗压强度影响不大;但大掺量下对再生混凝土的后期抗压强度有明显影响。因此,应尽量将不同来源的废弃混凝土分开回收利用。

5) 附在混杂骨料表面的老水泥砂浆的活性很低,较难进行二次水化反应,同龄期 C_3S 和 C_2S 的衍射峰值均随着混杂骨料掺量的增加而增大。

需说明的是,目前国内关于再生混凝土的应用研究尚处于起步阶段,笔者虽然对再生混凝土的抗压强度进行了试验研究,但由于再生混凝土的抗压强度影响因素较多,实验室的再生骨料与实际工程中的再生骨料还存在一定的差别,试验结果也许会有一些偏差,因此还有待更细致、深入的试验研究。

参考文献:

- [1] 秦中伏,孙楠楠,温海珍.再生骨料混凝土的应用现状与研究进展[J].材料导报,2013,27(23):142.
- [2] 肖建庄,李佳彬,兰阳.再生混凝土技术研究最新进展与评述[J].混凝土,2003(10):17.
- [3] ZHOU C H, CHEN Z P. Mechanical properties of recycled concrete made with different types of coarse aggregate[J]. Construction and Building Materials,2017,134:497.
- [4] 韩帅.再生粗骨料品质和取代率对再生混凝土耐久性能的影响[D].青岛:青岛理工大学,2015.
- [5] 王晓飞,李秋义,罗健林,等.不同品质再生粗骨料混凝土的力学性能及鲍罗米公式拟合[J].混凝土,2016(3):60.
- [6] 曹剑.再生粗骨料品质和取代率对再生混凝土抗冻性能的影响[J].青岛理工大学学报,2016(4):17.
- [7] 李秋义,全洪珠,秦原.混凝土再生骨料[M].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [8] 肖建庄,雷斌,袁飏.不同来源再生混凝土抗压强度分布特征研究[J].建筑结构学报,2008,29(5):94.
- [9] 黄滔,彭小芹,王开宇,等.不同来源再生粗集料对再生混凝土性能的影响[C]//房建材料与绿色建筑.北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [10] ARORA S, SINGH S P. Analysis of flexural fatigue failure of concrete made with 100% coarse recycled concrete aggregates[J]. Construction and Building Materials,2016,102:782.
- [11] KISKU N, JOSHI H, ANSARI M, et al. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material[J]. Construction and Building Materials,2017,131:721.
- [12] LOTFI S, EGGIMANN M, WAGNER E, et al. Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology[J]. Construction and Building Materials,2015,95:243.
- [13] KUMAR R. Influence of recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste (CDW) on abrasion resistance of pavement concrete[J]. Construction and Building Materials,2017,142:248.
- [14] 李军涛,陈宇良,陈宗平,等.不同骨料来源再生混凝土常规三轴受压性能研究[J].混凝土,2015(2):65.
- [15] 王怀亮,张楠.改性再生骨料对自密实混凝土性能的影响[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(6):150.
- [16] 崔正龙,童华彬,吴翔宇.再生粗骨料的形态及性质对混凝土力学性能影响研究[J].硅酸盐通报,2014,33(9):2429.
- [17] 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:JGT 55—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [18] 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.
- [19] 张学元.再生骨料在高性能混凝土中的应用研究[J].混凝土,2017(2):87.
- [20] 霍洪媛,范程程,陈爱玖,等.不同强度等级的再生骨料对再生混凝土基本力学性能影响[J].混凝土,2017,328(2):60.