

再生陶瓷混凝土抗压强度及弹性模量试验研究

王伊^{1,2}, 黄宏^{1,2*}, 帅子坤^{1,2}, 胡文斌^{1,2}

(1. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013;
2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 为研究不同再生陶瓷骨料类型和取代率对混凝土抗压强度和弹性模量的影响, 利用再生陶瓷细骨料以 0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90% 和 100% 取代率等质量替换天然河砂制作再生陶瓷细骨料混凝土(CRFC)。在再生陶瓷细骨料全取代(100%)天然细骨料的基础上, 采用再生陶瓷粗骨料以 0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90% 和 100% 取代率等质量替换天然碎石制作再生陶瓷粗骨料混凝土(CRC), 研究 CRFC 和 CRC 的物理性能和力学性能, 分析废弃墙地砖陶瓷作为混凝土再生骨料的可行性。研究表明: 废弃陶瓷砖可以作为粗、细骨料用于制备混凝土。采用再生陶瓷粗骨料时需要根据其吸水率加入附加用水以确保混凝土拌合物的和易性; 界面过渡区的粘结强度和粗骨料类型是分别影响 CRFC 和 CRC 破坏形态的主要因素; 采用再生陶瓷细骨料取代天然细骨料配制的 CRFC 在和易性、抗压强度和弹性模量等性能方面与普通混凝土相差不大; CRC 的抗压强度和弹性模量随再生陶瓷粗骨料取代率的增加而显著降低。再生陶瓷细骨料全部取代天然细骨料时, 建议再生陶瓷粗骨料取代率小于 50%。

关键词: 再生陶瓷混凝土; 粗骨料; 细骨料; 抗压强度; 弹性模量

中图分类号: T528

文献标识码: A

本文引用格式:

Experimental study on compressive strength and elastic modulus of recycled ceramic concrete

Wang Yi^{1,2}, Huang Hong^{1,2*}, Shuai Zikun^{1,2}, Hu Wenbin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Recycled ceramic fine aggregate was used to replace natural river sand with a quality of 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, and 100% replacement rate to create recycled ceramic fine aggregate concrete (CRFC) to investigate the effects of various types and replacement rates of recycled ceramic aggregate on the compressive strength and modulus of elasticity of concrete. To create recycled ceramic coarse and fine aggregate concrete (CRC), natural gravel was substituted with a quality of 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, and 100% based on the replacement rate of recycled ceramic fine aggregate (100%) with natural fine aggregate. The physical and mechanical properties of CRFC and CRC were investigated, as well as the viability of using wasted tile ceramics as recycled concrete aggregate. The results show that: Waste ceramic bricks can be utilized as coarse and fine aggregate in concrete preparation. To ensure concrete workability while utilizing recycled ceramic coarse aggregate, additional water should be supplied by its water absorption rate. The bond strength in the interfacial transition zone and coarse aggregate type are the main factors influencing the failure patterns of CRFC and CRC, respectively. The workability, compressive strength, and elastic modulus of CRFC made with recycled ceramic fine aggregate are similar to those of normal concrete. As the replacement rate of recycled ceramic coarse aggregate increased, the compressive strength and elastic modulus of CRC dropped dramatically. It is suggested that the replacement rate of recycled ceramic coarse aggregate is less than 50% when natural fine aggregate is totally replaced by recycled ceramic fine aggregate.

Key words: Recycled ceramic aggregate concrete; Coarse aggregate; Fine aggregate; Compressive Strength; Elastic modulus

收稿日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51868020); 江西省研究生创新基金项目(YC2021-B142); 江西省自然科学基金重点项目(20192ACBL21002); 江西省教育厅科学技术研究重点项目(GJJ210649)

陶瓷制品在生产运输过程中不可避免会产生废弃陶瓷。大批废陶瓷被堆放或填埋，既浪费了自然资源也污染环境。另外，由于国家基础设施工程的不断开展，不少地区的天然碎石、砂等建材物资出现匮乏。对废弃陶瓷进行回收加工成再生陶瓷粗、细骨料替代混凝土中天然碎石、砂制备再生陶瓷混凝土，既可以解决大量废弃陶瓷造成的环境问题和材料浪费，又可以缓解天然资源的短缺。

废弃陶瓷可根据不同骨料粒径配制为再生陶瓷粗骨料混凝土^[1,2]、再生陶瓷细骨料混凝土^[3,4]及陶瓷掺合料混凝土^[5]。抗压强度和弹性模量是混凝土关键的力学性能。近年来学者们针对抗压强度和弹性模量对再生混凝土进行研究，得出了多种不同的结论。Medina 等^[6-8]指出陶瓷粗骨料因比表面积大，使其与水泥砂浆粘结较强，从而提高了混凝土的抗压强度。Rashid 等^[9]的研究表明陶瓷粗骨料取代率为 20-30% 时，混凝土的抗压强度均高于对照组。Anderson 等^[10]研究发现，取代率为 100% 时，地砖、墙砖和废瓦粗骨料混凝土的抗压强度分别比普通混凝土降低了 4.3%、5.6% 和 28.3%，而弹性模量值则提高了 26.9%。Alves 等人^[11]发现取代率为 100% 的再生砖细骨料和再生卫生陶瓷细骨料混凝土与对照组的弹性模量相比最大降幅分别为 26% 和 29%。本课题组^[12]在对再生陶瓷粗骨料混凝土研究时发现取代率为 40% 时抗压性能最优。

综上所述，不同再生陶瓷骨料类型和不同取代率对再生陶瓷混凝土力学性能的影响也不同，对于同时取代再生陶瓷粗、细骨料混凝土的研究也鲜少报道。本文的研究目的是探讨再生陶瓷细骨料与天然砂的替代方案，以及不同取代率对混凝土抗压强度和弹性模量的影响，并评估再生陶瓷作为混凝土骨料的可行性。探究再生陶瓷混凝土的力学性能有利于扩大再生陶瓷骨料在实际工程中的应用范围，并提供理论依据。

1 试验概况

1.1 再生陶瓷混凝土材料

再生陶瓷骨料来源于江西省高安市某加工厂加工的废弃瓷板。将废弃瓷板经除土处理后，通过机器破碎、筛分成粒径小于 2mm 的陶瓷细骨料及 5mm-20mm 的陶瓷粗骨料。图 1 为陶瓷骨料样本，其中陶瓷粗骨料(以下简称 CCA，图 1(a))为淡褐色，粒型多呈方矩体，大部分粗骨料带釉面，颗粒尖锐有棱角；陶瓷细骨料(以下简称 CFA，图 1(b))为白色或灰白色，表面细腻。天然砂(以下简称 NFA)为赣江河砂，天然碎石(以下简称 NA)为石灰岩砾石，水泥为普通硅酸盐 P·O 42.5 级水泥，拌合水为自来水。与天然粗骨料相比，再生陶瓷粗骨料表观密度较小(表 1)，表观密度越小孔隙率越大，孔隙率越大吸水率也越大。因此，为了确定其饱和面干吸水率，根据相关设计标准^[13]对陶瓷骨料和普通骨料进行了烘干测试，并将其浸泡时长分别设定为 2min、5min 和 10min，表 1 为再生陶瓷骨料和天然骨料的主要指标性能。



(a) 粗骨料 (b) 细骨料
(a) Coarse aggregate (b) Fine aggregate

图 1 再生陶瓷粗、细骨料

Fig.1 Ceramic coarse aggregate and fine aggregate

表 1 再生陶瓷骨料和天然骨料的性能指标

Tab.1 Performance index of recycled concrete aggregate

Aggregate	Grain Diameter/mm	Bulk Density/(kg·m ⁻³)	Apparent Density/(kg·m ⁻³)	Fineness Modulus	Crush Index/%	Water Absorption/%		
						2min	5min	10min
CCA	5-20	935	1728	/	15.6	11.98	14.11	14.93
NCA	5-20	1326	2826	/	19.6	0.20	0.31	0.41
CFA	<2.36	1225	1943	3.74	/	23.61	25.62	26.50
NFA	<5.00	1584	2732	2.56	/	19.12	21.71	21.83

1.2 骨料的颗粒级配

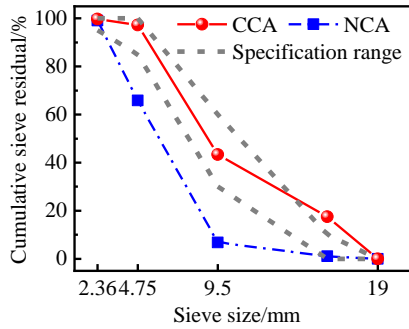
表 2 为陶瓷骨料和天然骨料的筛余率。级配分别采用粗骨料连续粒级 5mm-16mm 和细骨料 I 级配区。

表 2 和图 2 表明本文采用的再生陶瓷粗、细骨料达到了普通混凝土标准要求，可以用于制备再生陶瓷混凝土。

表 2 陶瓷粗骨料颗粒和天然碎石筛余率

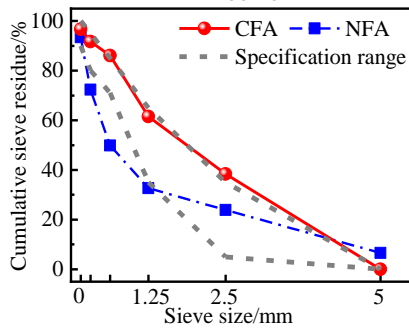
Tab.2 Sieve residuals of ceramic and natural aggregate

Aggregate	Cumulative sieve residual/(kg·m ⁻³)					
	2.36	4.75	9.5	16.0	19.0	26.5
CCA	99.7	97.2	43.4	17.5	0	0
NCA	99	65.8	6.8	1.1	0	0
CFA	96.6	91.8	86.1	61.5	38.3	0
NFA	93.5	72.4	49.8	32.6	23.9	6.6



(a)粗骨料

(a) Coarse aggregate



(b)细骨料

(b) Fine aggregate

图 2 陶瓷骨料和天然骨料的筛余率

Fig.2 Sieve residuals of ceramic and natural aggregate

1.3 混凝土配合比

研究中,将再生陶瓷骨料类型和取代率作为主要参数,并分两批制备再生陶瓷混凝土,两批混凝土的取代率均为 0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%和 100%。不同的是第一批混凝土的粗骨料仍然采用天然粗骨,细骨料采用再生陶瓷细骨料等质量取代天然砂,制备再生陶瓷细骨料混凝土(以下简称 CRFC)。第二批混凝土的细骨料全部采用再生陶瓷细骨料,在此基础上天然粗骨料被再生陶瓷粗骨料等质量取代,制备再生陶瓷粗细骨料混凝土(以下简称 CRC)。每组试块由 6 个立方体

(150mm×150mm×150mm)和 6 个棱柱体(150mm×150mm×300mm)组成,总计 264 个,用于测量 7d 和 28d 的抗压强度和弹性模量。同时,陶瓷细骨料取代率为 0%的混凝土是普通混凝土(以下简称 NC)。

试验中以再生陶瓷细骨料取代率为 0%的普通混凝土作为基准配合比,保持净水灰比为 0.45 不变,混凝土设计强度等级为 C40。采用坍落度试验确定混凝土拌合物的和易性。经试配后发现,普通混凝土和 CRFC 可以达到设计规程中和易性要求,而按照普通混凝土的配合比设计的 CRC 出现水泥砂浆不足,无法包裹住陶瓷颗粒,无法振捣的情况。原因是再生陶瓷粗骨料比天然碎石孔隙率大吸水率高,在拌合过程中陶瓷骨料吸附了用于水化反应的自由水,导致混凝土和易性变差。为了确保再生陶瓷粗骨料混凝土的净水灰比保持在 0.45,提出了一种基于自由水灰比的混凝土配合比设计方法^[13],即混凝土中的水由自由水和附加水组成,以确保混凝土的质量和性能。根据表 1 再生陶瓷骨料吸水率试验结果,陶瓷粗骨料在水中完全浸泡 5min 后,其内部水基本达到饱和。因此取 5min 时再生陶瓷粗骨料的吸水率为 CRC 的附加用水量,各组混凝土的附加水量列于表 3。加入附加水后,CRC 坍落度达到设计规程标准。

取代率 r 的计算方法为:浸水 5min 后的再生陶瓷骨料的质量(干燥的陶瓷骨料和附加水)与所有粗骨料总质量(浸水后的陶瓷骨料和天然骨料)的比值。按照相关设计规程^[14]计算出不同取代率下 CRFC 和 CRC 的配合比,各组混凝土配合比如表 3 所示,表中 NC 代表普通混凝土。CRFC-10 中 CRFC 代表再生陶瓷细骨料混凝土,10 代表陶瓷细骨料取代率为 10%;CRC-100-10 中 CRC 代表再生陶瓷粗、细骨料混凝土,100 代表细骨料取代率为 100%,10 代表粗骨料取代率为 10%,以此类推。

1.4 试验方法

混凝土搅拌设备为 45L 混凝土单卧轴卧式混凝土搅拌机。在拌和之前,对粗、细骨料进行含水率计算,并根据表 3 中的混凝土配合比配制出各组混凝土。在搅拌过程中,先将粗骨料与总用水(自由水和附加水)倒入搅拌机使其进行预浸泡,5min 后加入水泥,搅拌 90s 后添加细骨料,最后混凝土搅拌机再运转

表 3 混凝土配合比

Tab.3 Mix Proportion of CRFC and CRC

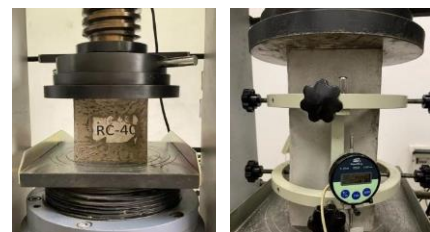
No.	Mix proportion/(kg/m ³)						
	Cement /(kg/m ³)	Water/(kg/m ³)	Additional Water/(kg/m ³)	Coarse Aggregate/(kg/m ³)		Fine Aggregate/(kg/m ³)	
				Natural	Ceramic	Natural	Ceramic
NC	490	220	-	987	-	570	570
CRFC-10	490	220	-	987	-	513	57
CRFC-20	490	220	-	987	-	456	114
CRFC-30	490	220	-	987	-	399	171
CRFC-40	490	220	-	987	-	342	228
CRFC-50	490	220	-	987	-	285	285
CRFC-60	490	220	-	987	-	228	342
CRFC-70	490	220	-	987	-	171	399
CRFC-80	490	220	-	987	-	114	456
CRFC-90	490	220	-	987	-	57	513
CRFC-100	490	220	-	987	-	0	570
CRC-100-0	490	220	0	987	0	-	570
CRC-100-10	490	220	13.9	888.3	98.7	-	570
CRC-100-20	490	220	27.9	789.6	197.4	-	570
CRC-100-30	490	220	41.8	690.9	296.1	-	570
CRC-100-40	490	220	55.7	592.2	394.8	-	570
CRC-100-50	490	220	69.6	493.5	493.5	-	570
CRC-100-60	490	220	83.6	394.8	592.2	-	570
CRC-100-70	490	220	97.5	296.1	690.9	-	570
CRC-100-80	490	220	111.4	197.4	789.6	-	570
CRC-100-90	490	220	125.3	98.7	888.3	-	570
CRC-100-100	490	220	139.3	0	987	-	570

180 秒，直到混凝土搅拌均匀后倒入立方体和棱柱体模具中。将模具放在振捣台上振捣一分钟，然后用塑料保鲜膜将其封口，放入标准养护室内，经过 24 小时的养护。取出后，将脱模后的试块放置在常温环境下（温度高于 20℃），并覆盖上混凝土养护布，以确保温度和湿度保持稳定，然后在养护布上洒水养护 7 天，最后自然养护 21 天。图 3 为养护 24 小时脱模后普通混凝土与取代率为 100% 的 CRFC 和 CRC 的表面状态，可以看出普通混凝土、CRFC 和 CRC 分别处于基本干燥、半湿润和完全湿润状态。这是因为陶瓷骨料具有较高的吸水率，且陶瓷粗骨料的表观密度孔隙率小于陶瓷细骨料，拌合过程中附加水保存在陶瓷骨料的孔隙中，随着时间推移附加水逐渐从骨料中扩散至骨料表面参与水化反应或蒸发，这使再生陶瓷混凝土在脱模前后即养护初期具有更好的养护效果。分别在第 7 天和第 28 天对混凝土试块进行抗压强度及弹性模量测试^[15]，测试过程选用 WHY-2000 型微机控制压力试验机，如图 4 所示。以 0.5MPa/s 的速度持续均匀地对试块施加压力，直至试块破坏，试验结束。



图 3 脱模后混凝土表面含水状态图

Fig.3 Water content state of concrete demoulding



(a) 抗压强度装置

(b) 弹性模量装置

(a) Compressive strength test device (b) Elastic modulus test device

图 4 试验装置

Fig.4 Test devices

2 试验结果与分析

2.1 表观密度及塌落度

各组混凝土拌合物的坍落度和表观密度列于表 4，表中 $f_{cu,7}$ 和 $f_{cu,28}$ 分别代表混凝土 7 天和 28 天立方体抗压强度； E_{cm} 代表混凝土弹性模量实测值； Δ 表示与对照组混凝土的相对差值百分比。图 5 为不同类型的陶瓷骨料和不同取代率下混凝土拌合物的表观密度，CRFC 和 CRC 在相同体积下，其质量都比普通混凝土小。这是因为陶瓷骨料的表观密度比天然骨料小，随陶瓷骨料取代率的提高，拌合物的密度也会下降。当陶瓷细骨料取代率为 100%，陶瓷粗骨料取代率大于 30% 时，再生陶瓷混凝土的表观密度小于 1950 kg/m^3 ，可被划分为轻质混凝土^[16]。图 6 为不同陶瓷骨料类型和取代率下混凝土拌合物的坍落度，各组混凝土拌合物的坍落度在 $165 \text{ mm} - 190 \text{ mm}$ ，属于 S4 级混凝土拌合物(坍落度 $> 160 \text{ mm}$)^[17]，这表明采用本文提出的配合比配制的再生陶瓷混凝土与一般普通混凝土在和易性方面没有显著差异，各组混凝土均能达到设计标准要求。

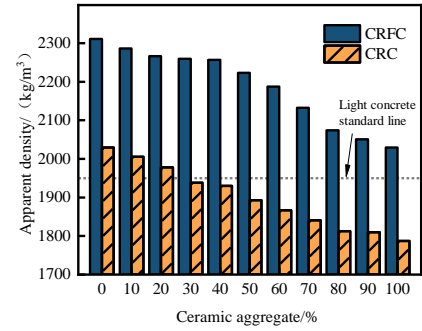


图 5 CRFC 和 CRC 的表观密度

Fig.5 Apparent density of CRFC and CRC

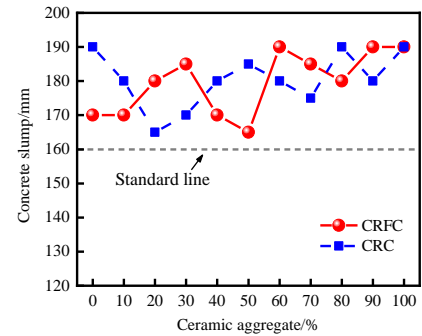


图 6 CRFC 和 CRC 的坍落度

Fig.6 Concrete slump of CRFC and CRC

表 4 CRFC 和 CRC 的试验结果

Tab.4 Test results of CRFC and CRC

No.	Concrete slump/mm	Apparent density/(kg/m^3)	Compressive strength/MPa				Elasticity modulus (28d)/MPa	
			$f_{cu,7}$ /MPa	Δ (%)	$f_{cu,28}$ /MPa	Δ /%	E_{cm} /MPa	Δ /%
NC	170	2311.1	39.22	-	49.52	-	32314	-
CRFC-10	170	2286.6	37.81	-3.60	42.98	-13.21	29440	-8.89
CRFC-20	180	2266.7	38.14	-2.75	48.24	-2.58	31525	-2.44
CRFC-30	185	2259.7	39.75	1.35	46.58	-5.94	29377	-9.09
CRFC-40	170	2256.8	39.96	1.89	46.43	-6.24	31689	-1.93
CRFC-50	165	2223.4	38.74	-1.22	45.94	-7.23	30597	-5.31
CRFC-60	190	2187.7	42.45	8.24	48.64	-1.78	31707	-1.88
CRFC-70	185	2132.8	37.64	-4.03	42.91	-13.35	31425	-2.75
CRFC-80	180	2074.1	40.25	2.63	45.35	-8.42	29564	-8.51
CRFC-90	190	2050.8	41.55	5.94	47.77	-3.53	31285	-3.18
CRFC-100	190	2029.6	40.80	4.03	45.41	-8.30	31457	-2.65
CRC-100-0	190	2034.6	41.10	-	44.31	-	31926	-
CRC-100-10	180	2005.8	38.32	-6.76	46.50	4.94	29190	-8.57
CRC-100-20	165	1978.3	42.02	2.24	48.34	9.10	30460	-4.59
CRC-100-30	170	1938.2	34.65	-15.69	39.90	-9.95	27586	-13.59
CRC-100-40	180	1930.3	40.05	-2.55	45.96	3.72	30594	-4.17
CRC-100-50	185	1892.8	34.33	-16.47	39.08	-11.80	28491	-10.76
CRC-100-60	180	1866.7	33.38	-18.78	39.78	-10.22	28483	-10.78
CRC-100-70	175	1840.7	30.33	-26.20	39.04	-11.89	28619	-10.36
CRC-100-80	190	1812.9	26.90	-34.55	36.02	-18.71	28483	-10.78
CRC-100-90	180	1809.6	24.63	-40.07	37.11	-16.25	25879	-18.94
CRC-100-100	190	1787.2	23.71	-42.31	31.63	-28.62	22426	-29.76

2.2 破坏形态

对CRFC和CRC进行抗压强度测试, 得到其最终破坏形态, CRFC试块的破坏形态主要分为两种: 界面过渡区破坏和整体剪切破坏, 两种破坏形态分别如图7(a)、(b)所示。CRFC试块的取代率为50%时发生界面过渡区破坏(图7(a)), 从断裂面可以看到天然粗骨料较完整, 并未发现贯穿粗骨料裂缝, 断面均发生在粗骨料与水泥砂浆界面过渡区, 形成与受压方向平行的多个裂缝面, 当裂缝贯通整个试件后, 即为界面过渡区劈裂破坏。CRFC试块的取代率为80%时发生整体剪切破坏(图7(b)), 混凝土破坏面上未观测到天然粗骨料, 与取代率为50%的试块相比, 断面发生在细骨料与水泥砂浆界面过渡区, 将试块分成一大一小两个相对完整的块体, 且断裂表面较平整。剥开小块体发现混凝土内部裂缝与混凝土表面呈 45° - 60° 夹角, 试块发生剪切破坏。图7(c)为取代率100%的CRFC试块, 与取代率50%的试件一样发生了界面过渡区破坏, 这说明对于CRFC, 天然粗骨料与陶瓷细骨料之间的界面过渡区的粘结强度对该类混凝土的破坏形态有显著影响。

图7(d)、(e)和(f)分别是陶瓷粗骨料取代率为20%、50%和100%的CRC试件的破坏形态。从图中可以看出, CRC的破坏形态均为裂缝贯穿陶瓷粗骨料导致混凝土断裂面大多发生在陶瓷粗骨料内部。对比相同陶瓷细骨料取代率(100%)下不同粗骨料类型(图7(c)、(f))可以发现, CRC因陶瓷粗骨料被压碎形成较明显的锥形破坏, 而天然粗骨料试块(图7(c))并没有发生明显的锥形破坏。这是由于陶瓷粗骨料吸水率高孔隙率大, 在生产过程中导致陶瓷粗骨料内部存在微裂缝, 陶瓷粗骨料比天然粗骨料更容易被压碎开裂。因此对于CRC, 粗骨料类型是影响该类混凝土破坏形态的主要因素。



(a) CFA 取代率 50% (b) CFA 取代率 80%

(a) CFA replacement rate 50% (b) CFA replacement rate 80%



(c) CFA 取代率 100% (d) CCA 取代率 20%

(a) CFA replacement rate 100% (b) CCA replacement rate 20%



(e) CCA 取代率 50% (f) CCA 取代率 100%

(a) CCA replacement rate 50% (b) CCA replacement rate 100%

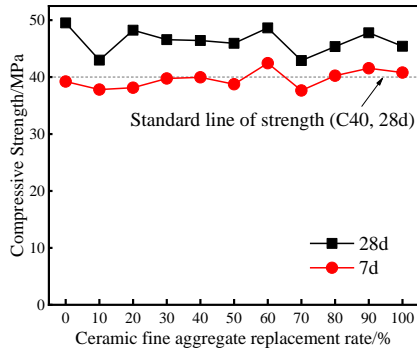
图 7 CRFC 和 CRC 典型破坏形态

Fig.7 Typical failure mode of CRFC and CRC

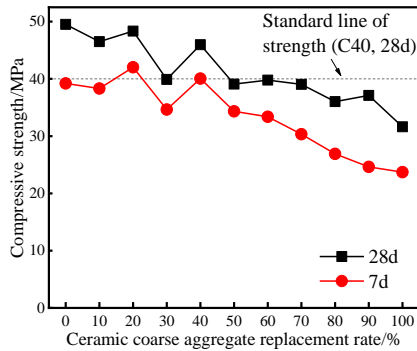
2.3 抗压强度

CRFC 和 CRC 的 7 d 和 28 d 立方体抗压强度显著不同, 具体数据可见表 4 和图 8。从表 4 和图 8(a)可以看出, 随陶瓷细骨料取代率的增加, CRFC 的抗压强度会略微降低, 其中最低值出现在取代率为 70% 时, 7 d 和 28 d 抗压强度分别为 37.64 MPa 和 42.91 MPa, 达到 NC 抗压强度的 95.9% 和 86.7%, 满足规范中对 C40 混凝土强度要求。抗压强度降低的主要原因是一方面与细骨料相比粗骨料对混凝土抗压强度的影响更明显; 另一方面从破坏形态上看, 陶瓷细骨料与天然粗骨料之间界面过渡区粘结强度低于天然粗细骨料的粘结强度, 因此 CRFC 的抗压强度略低于 NC 的抗压强度, 但 CFA 取代率对其影响不大。

图 8(b)为不同陶瓷粗骨料取代率的 CRC 的立方体抗压强度, 在陶瓷细骨料全部取代天然细骨料的情况下, CRC 的抗压强度随陶瓷粗骨料取代率的增加呈线性下降。取代率为 100% 的 CRC 的 7 d 和 28 d 抗压强度分别为 23.71MPa 和 31.63 MPa, 仅为 NC 抗压强度的 60.5% 和 63.9%。根据设计规范对 C40 等级混凝土的抗压强度范围的取值, 陶瓷粗骨料取代率 $>50\%$ 的 CRC 抗压强度均小于 40 MPa, 不符合设计规范中对 C40 等级混凝土的要求。



(a) CRFC



(b) CRC

图 8 不同取代率 CRFC 和 CRC 的抗压强度

Fig.8 Compressive Strength of CRFC and CRC with different replacement rate

2.4 混凝土弹性模量

不同陶瓷取代率的 CRFC 和 CRC 的弹性模量实测值见表 4 和图 9。CRFC 和 CRC 弹性模量趋势与其抗压强度趋势一致。对于 CRFC，陶瓷细骨料取代率在 0%-100% 时，其弹性模量在 29377 MPa 到 31707 MPa 之间，略低于普通混凝土；对于 CRC 随着陶瓷粗骨料取代率增大弹性模量降低，尤其取代率 > 80% 后，弹性模量线性降低，取代率为 100% 的 CRC 降低到 22426 MPa，为普通混凝土的 69.4%。对比 CRFC 和 CRC 弹性模量实测值曲线可以发现，取代率 < 50% 时，陶瓷骨料对两种陶瓷混凝土的影响趋势一致，取代率 ≥ 50% 后，陶瓷粗骨料对 CRC 弹性模量的降低影响更明显。总体上看，再生陶瓷细骨料取代率对混凝土弹性模量的影响不大，而再生陶瓷粗骨料取代率 ≥ 50% 时，混凝土的弹性模量会显著降低。

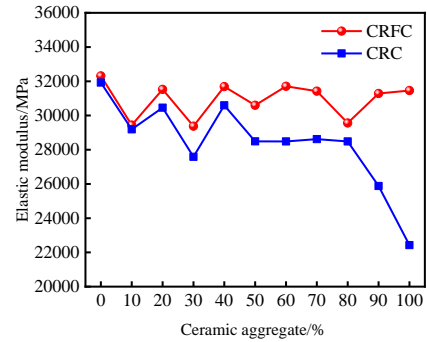


图 9 不同取代率 CRFC 和 CRC 的弹性模量

Fig.9 Elasticity modulus of CRFC and CRC with different replacement rate

3 结论

制备了再生陶瓷细骨料混凝土和再生陶瓷粗、细骨料混凝土的立方体及棱柱体试块，研究了不同陶瓷骨料类型和不同陶瓷骨料取代率对混凝土抗压强度和弹性模量的影响。得出以下结论：

1) 废弃陶瓷砖可以作为粗、细骨料用于制备混凝土。采用再生陶瓷粗骨料时需要根据其吸水率加入附加用水以确保混凝土拌合物的和易性。

2) 再生陶瓷细骨料混凝土的破坏形态主要分为两种：界面过渡区破坏和整体剪切破坏，天然粗骨料与陶瓷细骨料之间的界面过渡区的粘结强度对破坏形态有显著影响。再生陶瓷粗骨料混凝土的破坏形态均为陶瓷粗骨料断裂破坏，粗骨料类型是影响再生陶瓷粗骨料混凝土破坏形态的主要因素。

3) 保持天然粗骨料不变，采用再生陶瓷细骨料取代天然细骨料配制 CRFC。随再生陶瓷细骨料取代率的增加，混凝土 7 d 抗压强度先下降后略微上升，变化幅度在 -4.03 % 和 8.24 % 之间；28 d 抗压强度略微下降，下降幅度在 -1.78 % 和 -13.35 % 之间；弹性模量在 29377 MPa 和 31707 MPa 之间，略低于普通混凝土。

4) 再生陶瓷细骨料全部取代天然细骨料时，采用再生陶瓷粗骨料取代天然粗骨料配制 CRC。混凝土的抗压强度和弹性模量随再生陶瓷粗骨料取代率的增加而明显降低。再生陶瓷细骨料全部取代天然细骨料时，建议再生陶瓷粗骨料取代率小于 50%。

参考文献：

- [1] MOHAMED A, BASSAM A T, IBRAHIM S A. Effect of using mineral admixtures and ceramic wastes as coarse aggregates on properties of ultrahigh-performance concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 273: 123073.
- [2] GARCIA G J, RODRIGUEZ R D, JUAN V A, et al. Ceramic

ware waste as coarse aggregate for structural concrete production[J]. Environmental technology. 2015, 36(23): 3050-3059.

- [3] 程云虹, 杨四辉, 张靖瑜, 等. 陶瓷细骨料替代方式对混凝土抗压强度的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(11): 1661-1666.
- CHENG Y H, YANG S H, ZHANG J Y, et al. Effect of Substitution of Ceramic Fine Aggregate on Compressive Strength of Concrete[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2020, 41(11): 1661-1666.
- [4] JAVED A, SIDDIQUE S, RAM P. Investigation on ceramic waste and stone dust as aggregate replacement in concrete[J]. International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences 3. 2015, 2015: 127-130.
- [5] 许开成, 方苇, 陈梦成, 等. 陶瓷再生粗骨料混凝土力学性能研究[J]. 实验力学, 2014, 29(4): 474-480.
- XU K C, FANG W, CHEN M C, et al. On the Mechanical Properties of Ceramic Recycled Coarse Aggregate Concrete[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(4): 474-480.
- [6] MEDINA C, ROJAS M, FRIAS M. Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes[J]. Cement & Concrete Composites. 2012, 34(1): 48-54.
- [7] MEDINA C, MARIA I S D R, MOISES F. Freeze-thaw durability of recycled concrete containing ceramic aggregate[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 40(FEB.): 151-160.
- [8] MEDINA C, MARIA I S D R, MOISES F. Properties of recycled ceramic aggregate concretes: Water resistance[J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 40(1): 21-29.
- [9] RASHID K, RAZZAQ A, AHMAD M, et al. Experimental and analytical selection of sustainable recycled concrete with ceramic waste aggregate[J]. Construction and Building Materials. 2017, 154: 829-840.
- [10] ANDERSON D J, SMITH S T, AU F. Mechanical properties of concrete utilising waste ceramic as coarse aggregate[J]. Construction & Building Materials. 2016, 117(aug.1): 20-28.
- [11] ALVES A V, VIEIRA T F, BRITO J D, et al. Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates[J]. Construction & Building Materials. 2014, 64: 103-113.
- [12] 黄宏, 曾建涛, 王伊. 取代率对再生陶瓷粗骨料混凝土抗压强度的影响[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(02): 27-34.
- HUANG H, ZENG J T, WANG Y. Influence of Replacement Rate on Compressive Strength of Recycled Ceramic Coarse

Aggregate Concrete[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(02): 27-34.

- [13] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准: JGJ 52-2006[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- China Academy of Building Research. Standard for technical requirements and test method of sand and crushed stone (or gravel) for ordinary concrete: JGJ 52-2006[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [14] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ55-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- China Academy of Building Research. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: JGJ55-2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [15] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081-2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- China Academy of Building Research. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081-2002[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [16] 中国建筑技术集团有限公司. 轻钢轻混凝土结构技术规程: JGJ383-2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- China State Construction Engineering Group Co., Ltd. Technical specification of lightweight steel and lightweight concrete structures: JGJ383-2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [17] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T 50080-2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- China Academy of Building Research. Standard for test method of performance on ordinary fresh concrete: GB/T 50080-2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.

作者简介



黄宏(1977-), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 江西省青年科学家(井冈之星)培养对象, 中国钢结构协会组合结构分会理事, 江西省土木工程学会空间结构分会副主任委员, 江西省土木工程学会地下空间及轨道交通专业委员会委员, 研究方向为钢-混凝土组合结构, E-mail:

huanghong1977@foxmail.com.