

Study on Application of Recycled Red Brick Aggregate to Concrete Block

Cheng Tsung Lu*, Mu Qing Chen, Wan Qi Lin, Yun Er Zhang

Department of Civil Engineering, Huizhou University, Huizhou, P.R. China

Email address:

ctl@hzu.edu.cn (Cheng Tsung Lu), 2560714478@qq.com (Mu Qing Chen), www33lwq@163.com (Wan Qi Lin),

zhangyuner426486@163.com (Yun Er Zhang)

*Corresponding author

To cite this article:

Cheng Tsung Lu, Mu Qing Chen, Wan Qi Lin, Yun Er Zhang. Study on Application of Recycled Red Brick Aggregate to Concrete Block. *Science Discovery*. Vol. 10, No. 2, 2022, pp. 92-98. doi: 10.11648/j.sd.20221002.23

Received: April 6, 2022; Accepted: April 29, 2022; Published: May 12, 2022

Abstract: Construction waste in Our country has a good recycling system, can carry out the production of various recycled building materials. In order to understand the availability of red brick in construction waste, the effect of the content of red brick in recycled aggregate on the physical properties and strength of recycled concrete is discussed to explore whether recycled concrete containing red brick is suitable for application in masonry blocks. The results show that there is no significant correlation between the content of red brick and the compressive strength of recycled concrete, while the slurry strength is positively correlated with the compressive strength of recycled concrete. The strength of recycled concrete can be improved by reducing the water-cement ratio. However, reducing the water-cement ratio will reduce the workability of concrete, which needs to be compensated by adding water-reducing agent. According to the experimental results of unit weight, water absorption, ultrasonic wave velocity and resistance properties of recycled concrete, the content of red brick can improve the porosity of recycled concrete and have a negative effect on durability. The overall experimental results are verified by the relevant specifications, and the recycled concrete containing red brick is suitable for class N block and meets the relevant requirements of the specifications.

Keywords: Red Brick, Recycled Aggregate, Recycled Concrete, Concrete Masonry Block

再生红砖骨料应用于混凝土砌块的研究

吕正宗*, 陈木清, 林婉琪, 张韵儿

惠州学院建筑与土木工程学院, 惠州市, 中国

邮箱

ctl@hzu.edu.cn (吕正宗), 2560714478@qq.com (陈木清), www33lwq@163.com (林婉琪),

zhangyuner426486@163.com (张韵儿)

摘要: 建筑垃圾在我国已有良好的回收再利用的系统, 能进行多方面再生建材的生产。为了解建筑垃圾中红砖的可用性, 故针对再生骨料中红砖含量对再生混凝土的物理性质与强度的影响, 探讨含红砖的再生混凝土是否适合应用于砌块。研究结果显示, 红砖含量与再生混凝土抗压强度无明显的相关, 浆体强度与再生混凝土的抗压强度成正相关, 再生混凝土可藉由降低水灰比来提升再生混凝土的强度。红砖含量从再生混凝土的单位重、吸水率、超声波波速及电阻性质等实验结果证明, 均会提升再生混凝土的孔隙率, 对耐久性有负面影响。整体实验结果经与相关规范验证, 含红砖的再生混凝土适合作为N类砌块, 符合规范相关要求。

关键词: 红砖, 再生骨料, 再生混凝土, 混凝土砌块

1. 引言

红砖曾经是我国建筑物作为承重构件或隔墙主要的建材。在经济改革之前,红砖以原料容易取得及制造工艺简易,在建筑的材料选用上,颇受国人青睐。然而后来,因为生产红砖必须燃烧煤炭或重油,会释放大量的温室气体及有害烟尘;以及生产红砖必须使用黏土,会开挖良田,造成土地水土流失,对生态环境造成负面影响,也危害粮食安全。因此出于对土地的保护,国家颁布严禁生产红砖的禁令。

虽然红砖现今已经很少被使用,但从过去到现在累积了大量的砖砌建筑物。在城市与乡村更新改建当中,这些老旧砖造建筑会被拆毁,并产生废弃的红砖。这些红砖若以掩埋的方式处理,因破砖粒形欠佳及碎砖之间摩擦力大,难以压实填实,造成回填表面的覆土会长期性的向下移动到填埋红砖间的孔隙里,填土表面会产生不均匀沉降。此外红砖掩埋弃置,粗颗粒料会阻碍植物根系的生长与扩展,细粒料则因黏土经高温烧结后经破碎而来。其细颗粒性质近似于沙土或粉土,仅适于少部分植物生长,对大部分植物的生长无益。

在我国旧有的建筑里,房屋构造材料的占比,砌筑材料比水泥混凝土来得多,混凝土多半使用于框架结构的梁与柱;旧建筑里还有许多连混凝土柱都没有,直接采用了砖墙来承重,仅保留了墙上的围梁。因此在拆除旧建筑时,建筑拆除废料里红砖的占比就相当的高。从存量来说,全国各地以往五十年间至少生产了300亿立方米的黏土砖,将来五十年大多数会转变成建筑垃圾[1]。因此如未对废弃红砖进行有效且合理的处理,任其抛弃堆放,此势将对自然环境造成伤害。从Lihua Zhu (2020)及J. Suárez (2017)的研究结果,可知红砖骨料适合作为混凝土的粗骨料[2,3],因此本研究选择将再生废弃红砖回收再用于混凝土砌块,既能减少红砖弃置掩埋的废弃量,减少对环境的污染;又能将再生红砖骨料所生产的混凝土使用于非结构主要承载力量的砌墙构件上,无致建筑结构强度折减的疑虑,是为恰当的应用途径。

参照Alessandra Mobili (2018)研究的成果[4],再生的红砖骨料孔隙较高,在强度及水密性上性能较差,若取代天然骨料拌和成混凝土,可能会折减混凝土强度及增加渗透性,造成再生混凝土的耐候性变差。而且红砖骨料颗粒表面具多孔隙,骨料颗粒间摩擦力大,在拌和过程中和易性会变差。因此含红砖的再生混凝土,不论是耐候性或和易性的折损,均需由水泥浆的质与量来做弥补。本研究的成果证实红砖骨料经适当的配比设计,能成为混凝土砌块合适的骨料。

2. 方法

建筑垃圾主要成分包括混凝土块、砖瓦、金属、废木料、玻璃、以及其他如纸类、纤维屑、废塑料等。在陈明良的研究(1996)中显示,在建筑垃圾中以废混凝土及砖(石)块占比为最大,分别占了大约44%及37%。因此在探讨红砖回收再利用时,不能忽视废混凝土同时存在的事实[5]。本研究的实验规划,在材料的配比上考虑了上述比例的关系。

将建筑垃圾再生利用于生产混凝土,虽在强度上能达到GB/T 50743-2012《工程施工废弃物再生利用技术规范》中再生混凝土的强度要求[6],但为确保结构主要承载构件的耐久性及可靠性,建议再生混凝土勿使用在承重构件上。此外再生骨料中的细料,包含许多细碎的水泥石或硬化砂浆,其表面粗糙,内部存在大量微裂纹,吸水率高、强度欠佳及体积稳定性不良[7],要处理至符合GB/T 25176-2010《混凝土和砂浆用再生细骨料》的要求[8],需较多的工序处理。以实务应用上的考虑来讲,耗费成本较高,于此不建议使用。且细料占建筑垃圾的比例低及体积小,弃置回填时对空间的占容性少,对环境伤害性影响较轻,因此再生混凝土的细料建议采用天然机制砂,弃用再生细骨料。

2.1. 材料

2.1.1. 水泥

使用符合GB175《通用硅酸盐水泥》规定的P·I型硅酸盐水泥,强度等级42.5,化学成份与相关性质如表1所示。

2.1.2. 再生废混凝土骨料

取抗压强度在C20-C35之间的混凝土试块,经破碎机破碎、洗净烘干及各标准筛筛号筛开后,依筛号分开储存,作为混凝土再生骨料,其性质符合GB/T 25177《混凝土用再生粗骨料》的规定[9]。

2.1.3. 红砖

红砖为一般市购的红砖,强度等级为MU15,经破碎机破碎,清洗洁净后以各标准筛筛号筛开,依筛号分开储存,作为红砖再生骨料。依照GB/T 25177《混凝土用再生粗骨料》的规定,在三类再生粗骨料的要求中能达标准,性质接近规范值底线。

2.1.4. 碎石骨料

由于再生骨料的细料对混凝土的体积稳定性及耐久性有明显的负面影响,因此细骨料采用天然机制砂,并符合GB/T 14684-2019《建设用砂》规定[10]。碎石骨料筛分析的级配分布如表2所示,粗骨料物性实验结果如表3,细骨料的物性实验结果如表4,综合规范要求属三类再生粗骨料。

2.2. 实验规划

2.2.1. 再生骨料处理

再生骨料,不论是废混凝土骨料或是废红砖骨料,吸水率普遍偏高,因此本研究所使用的再生骨料,使用前均进行常温24小时的浸水作业,在拌和1至2小时前取出至经加固过的细筛网上滴干表面水,使再生骨料处于面干内饱和的状态。

2.2.2. 配比设计

- 本研究依据JGJ55-2011《普通混凝土配合比设计规程》的规定进行配合比设计,采用水灰比0.5、0.6及0.7进行混凝土拌制。

- b. 再生粗骨料的混合比采用 $\frac{\text{红砖}}{\text{红砖}+\text{废混凝土}} = 0、10\%、20\%、30\%、40\%$ 进行配料，最终配合比材料用量，详见表5。
- c. 龄期取1天、7天、14天、28天，但本文仅显示28天龄期的结果。
- d. 工程性质试验，取浇筑完成的再生混凝土试块进行：吸水率、单位重、抗压强度、电阻性质、超声波试验。
- e. 微观分析试验：取适当位置的混凝土碎片，经终止水化及干燥后进行扫描式电子显微镜（SEM）观测。

表1 水泥化学及物理性质。

试验材料	化学性质							物理性质		
	MgO	SO ₃	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	烧失量	不溶物	细度(cm ² /g)	比重
水	规范	Max=6.0	Max=3.0	50.0	25.0	12.0	8.0	Max=3.0	Max=0.75	Min=2800
泥	实验值	2.3	2.2	40.3	27.4	10.1	9.9	1.5	0.08	3052
										3.15

表2 粗、细骨料采用筛分析的级配值。

粗骨料	筛号	1”	3/4”	3/8”	#4	#8	-	-
	过筛率	100	90-100	20-55	0-10	0-5	-	-
	采用值	100	95	37.5	5	2.5	-	-
细骨料	筛号	3/8”	#4	#8	#16	#30	#50	#100
	过筛率	100	95-100	80-100	50-85	25-60	10-30	2-10
	采用值	100	97.5	90	67.5	42.5	20	6

表3 粗骨料物性试验。

种类	空隙率(%)	干捣单位重 (kg/m ³)	吸水率 (%)	压碎指标 (%)	表观密度	烘干比重
GB/T 25177规定Ⅲ类	<53	-	>8.0	<30	>2.25	-
废混凝土试块	44.9	1299.34	6.38	16.4	2.36	2.21
废红砖骨料	48.5	1101.53	13.2	27.1	2.14	1.86

*因再生骨料均经清水淘洗并烘干，故无微粉、泥块有机物及杂物等。

表4 细骨料物性试验。

种类	细度模数F.M.	干捣单位重 (kg/m ³)	吸水量 (%)	面干内饱和比重	烘干比重
天然机制砂	2.76	1731.15	1.48	2.69	2.65

表5 再生混凝土各组配合比。

红砖比例	配合比项	水灰比 (W/C)	水泥量 (kg/m ³)	拌合水量 (kg/m ³)	粗骨料用量 (kg/m ³)		细骨料用量(kg/m ³)	设计单位重 (kg/m ³)
					再生料	红砖料		
红砖=0%		0.5	380.0	190	812.1		800.1	2182
		0.6	316.7	190	812.1		853.3	2172
		0.7	271.4	190	812.1		891.4	2165
红砖=10%		0.5	380.0	190	730.9	81.2	781.7	2164
		0.6	316.7	190	730.9	81.2	835.0	2154
		0.7	271.4	190	730.9	81.2	873.1	2147
红砖=20%		0.5	380.0	190	649.7	162.4	763.4	2146
		0.6	316.7	190	649.7	162.4	816.7	2136
		0.7	271.4	190	649.7	162.4	854.7	2128
红砖=30%		0.5	380.0	190	568.5	243.6	745.1	2127
		0.6	316.7	190	568.5	243.6	798.4	2117
		0.7	271.4	190	568.5	243.6	836.4	2110
红砖=40%		0.5	380.0	190	487.3	324.8	726.8	2109
		0.6	316.7	190	487.3	324.8	780.0	2099
		0.7	271.4	190	487.3	324.8	818.1	2092

3. 结果与分析

3.1. 吸水率

依GB/T 25177-2010《混凝土用再生粗骨料》规定，再生粗骨料三类（简单破碎型）吸水率需小于8%[9]，本研究废混凝土再生粗骨料（以下均称为再生骨料）吸水率

过关，不过因为粗骨料上有残馀水泥石及水泥砂浆，使其吸水率明显高于天然骨料；而且红砖的吸水率明显高于规范值（详表3）。再生骨料吸水率偏高，势必大幅折减新拌再生混凝土的和易性，因此本研究的再生骨料均采用面干内饱和的状态进行拌料。

本研究的再生混凝土使用再生骨料仅限于粗骨料的部分。实验结果再生混凝土随着红砖含量的增加，吸水率

也随之增加,此因红砖孔隙多,本就易于吸水,因此红砖增加,再生混凝土吸水率也增加,是正常的趋势。但是在无红砖,粗骨料纯粹来自废混凝土再生骨料的这组(吸水率: 6.43%、7.48%、7.68%),吸水率高于红砖含量20%的这组(吸水率: 6.21%、7.03%、7.32%),由图1可视。乃因为本研究的废混凝土再生骨料,在经破碎后未经过整形处理,黏附在骨料表面的水泥砂浆增加了吸水量,因此造成纯废混凝土再生粗骨料这组的吸水率高于红砖含量20%的再生混凝土。此外,再生混凝土水灰比的增加,亦会提高水泥石质地的孔隙率,造成吸水率的提高,由图1所示。

在GB/T 8239-2014《普通混凝土小型砌块》的规定[11], N类(非承重砌块)的吸水率应不大于14%,由图1所示,含红砖的再生混凝土吸水率介于5.71%至8.03%之间,能够符合作为非承重砌块的要求。

3.2. 单位重

含红砖的再生混凝土单位重介于2196-2268kg/m³之间,随着红砖含量增加其单位重越小,参见表5。红砖块破碎成再生粗骨料使用,因红砖骨料的比重低于天然骨材与混凝土再生骨材,含红砖组的单位重减少幅度在3%之内,显示红砖含量多寡对再生混凝土单位重的减少有限。整体再生混凝土单位重的趋势为:水灰比越高,单位重越低;红砖含量越高,单位重亦越低,趋势图如图2所示。此趋势的原因为红砖的干比重为1.86,与废混凝土再生骨料比重2.21及天然碎石骨料2.60相比,明显轻了18.8%及39.8%,因此红砖含量越高,混凝土比重越轻。但若本研究的再生混凝土要用做生产轻质混凝土砌块,则依据GB/T 15229《轻集料混凝土小型空心砌块》有关密度等级的规定,其最高密度等级1400级的密度应小于1400kg/m³。但本研究密度(意同比重)最轻的配比为水灰比=0.7;红砖含量为40%,其密度为2196 kg/m³,远高于轻集料混凝土小型空心砌块规范的要求。因此建议含红砖的再生混凝土仍以应用于普通混凝土小型砌块N类为佳。

3.3. 抗压强度

红砖是高孔隙及低强度的建材,再生红砖骨料使用于再生混凝土中,混凝土抗压强度理应随红砖骨料含量增加而递减。在图4中各项水灰比(W/C=0.5、0.6及0.7)的再生混凝土,抗压强度本应随红砖取代量增加而降低,但试验的结果并不然。实际成果由图3所示,抗压强度与水灰比成负相关,与普通混凝土一般,水灰比高则混凝土强度低。且在以红砖含量为水平变量,各红砖含量的趋势线接近且相互交叉,无明显的差距产生,均局限在一长斜的带状范围,这表示红砖含量抗压强度,无明显的交互关系;此关系可在图4看得更明显。由图4所示,在各个水灰比的条件下,红砖含量与抗压强度均无明显的倾向关系,此与A. M. Pitarch(2019)研究的结果一致[12]。图4中在各水灰比之下,红砖含量与抗压强度的回归分析,显示了相关系数。在水灰比为0.5、0.6与0.7之下,红砖含量与抗压强度的相关系数(R²)分别为0.0389、-0.4083及-0.2659(二个负数由回归线的斜率方向所判读),三组相关系数均未

达0.5,因此在各水灰比之下红砖含量与抗压强度的相关性低。而造成此一现象的原因,乃因红砖的抗压强度由GB/T 5101-2017《烧结普通砖》中规定为从MU10至MU30,而再生混凝土的抗压强度在C25至C35之间,红砖或许是抗压过程中试块的脆弱点,但硬化水泥浆强度高时,局部性骨料强度的降低,对整体混凝土抗压强度的影响就不会太明显。由图4可见,水灰比为0.5时水泥石强度高,红砖含量与抗压强度的相关系数仅0.0389,趋近无相互关系。当水灰比为0.6及0.7时,水泥石无法提供足够的强度在脆弱的再生骨料周围形成拱效应抵抗轴压力,因此抗压强度较低的红砖骨料会被压碎,造成红砖含量越高,再生混凝土抗压强度越低的趋势。在水灰比为0.6时相关系数为-0.4083;水灰比为0.7时相关系数为-0.2659,再生混凝土的红砖再生骨料含量与抗压强度均有负相关的趋势,只是相关趋势并不明显。

依据GB/T 8239-2014《普通混凝土小型砌块》规定,空心砌块N类最高等级为MU10;实心砌块N类最高等级为MU20.0。由图4可见,在水灰比为0.7,红砖含量为30%时(此为所有配比的抗压强度最低值),抗压强度尚有23.01MPa,高于MU20.0所代表强度的20MPa。在抗压强度的量度衡量上,本研究各组配比所拌制的混凝土,均能符合混凝土砌块在抗压强度上的要求。

3.4. 电阻性质

由 Ozkan Sengul(2014) 及 Ronaldo A. Medeiros-Junior(2016)研究成果的经验整理归纳后可得知[13,14],混凝土的导电性与其结构孔隙内部电解质溶液的成份与浓度有关,混凝土的致密程度会影响混凝土的电阻值。混凝土致密性越高表示孔隙越少,导电物质变少,混凝土的电阻会相对提高。由图5可见,再生混凝土的电阻随红砖含量增加而降低。原因为红砖骨料高比例的孔隙,能附着较多含有许多盐类矿物离子(从硬化的混凝土中溶出)的水,提供了良好导电的环境。当红砖含量越高时,骨料内含有离子的孔隙水越多,离子导电的通路连续性会越好,因此造成电阻下降。实验结果为再生混凝土的红砖含量越高,内部的电阻就越低。

3.5. 超声波试验

波动在固体中的传播速度高于液体,于气体中最慢。因此由波在介质中的传递速度(通常量测以时间判断波速快慢),可判断固体的孔隙含量及密实程度。本研究超声波的测定就是利用超声波在再生混凝土中传递的速率,判断混凝土内孔隙的多寡,属于无损检测。超声波波速与材料密度有关,而材料密度与材料弹性模数及强度有正相关,再生混凝土中密度越高、弹性模数越大、强度越强者,试验所量测得的波速越快[15]。由图6所示,龄期28天时再生混凝土在相同红砖含量下,水灰比越低其超音波波速值越高,显示材质越致密,强度越高,可与图4相互呼应;在相同水灰比下,红砖含量越高,其超音波波速越低,因红砖质地疏松多孔,密度较低所造成。Powers发现[16],晚龄期混凝土抗压强度与胶孔比相关。由公式1可见,固体的比例含量可三次方地正向影响混凝土试块的强度,亦即

直角立体空间里三轴方向的固含量比均会对强度造成一个空间维度的影响。因此若欲考虑混凝土强度，降低混凝土内部孔隙率是极为重要的。

$$f_c = ax^3 \tag{1}$$

- f_c : 混凝土28天的抗压强度
- a : 材料孔隙率 p 为0时的本征强度
- x : 固孔比，混凝土中固体的比值，于此公式中 $x=1-p$

3.6. 电子显微镜（SEM）观测

由图7电子显微镜的照片可看出，再生混凝土的骨料确实存在疏松与裂缝，但这些孔洞或间隙尺寸规模，远大于水泥水化物中钙矾石(AF_t)及单硫型水化硫铝酸钙(AF_m)等呈长条放射状或玫瑰花瓣状等疏松结晶所形成的空隙，在水化过程中水化硅酸钙($C-S-H$)会持续沉淀与填充在前述水化结晶物的空隙之中[17]。相同的，再生骨料的孔隙及微裂缝也有机会由 $C-S-H$ 所填充并黏结。可由配比中加入适量的火山灰材料，如矿渣或粉煤灰等；并以高压蒸压的方式，驱策水化生成物往内部孔隙生成结晶，可有效弥补再生骨料质地上的缺陷。由图8所示，本研究的再生混凝土，水泥水化生成物在骨料表面结晶并附着，与一般混凝土的骨料表面并无差异，因此再生混凝土的强度能与一般混凝土持平。

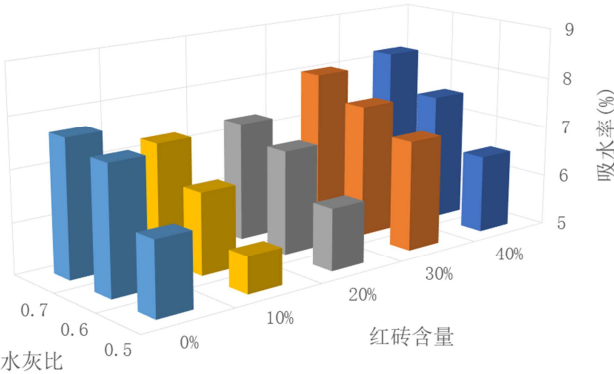


图1 再生混凝土的吸水率趋势。

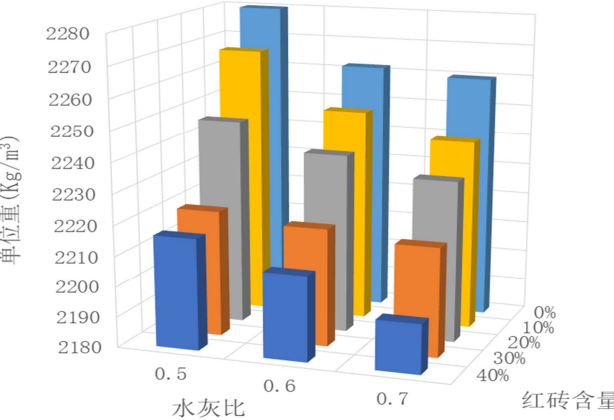


图2 再生混凝土的单位重趋势。

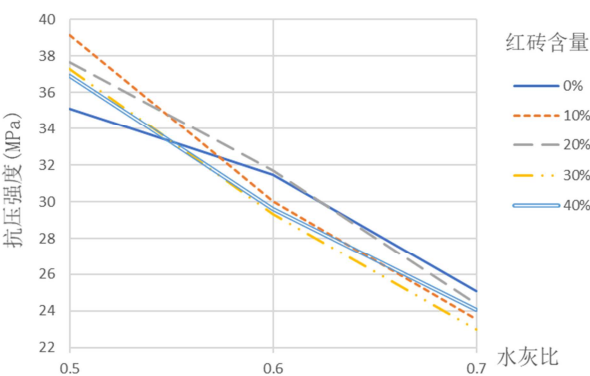


图3 28天龄期在不同红砖含量下随水灰比不同抗压强度的趋势。

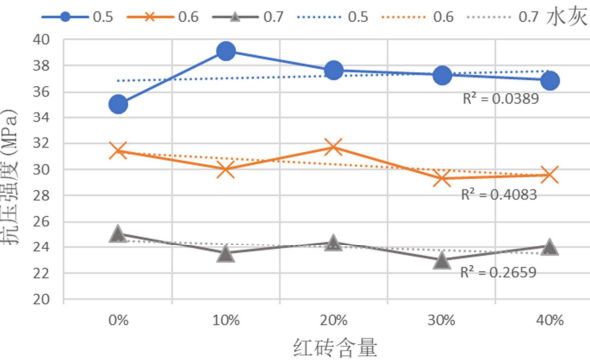


图4 28天龄期在不同水灰比下红砖含量影响抗压强度的变化。

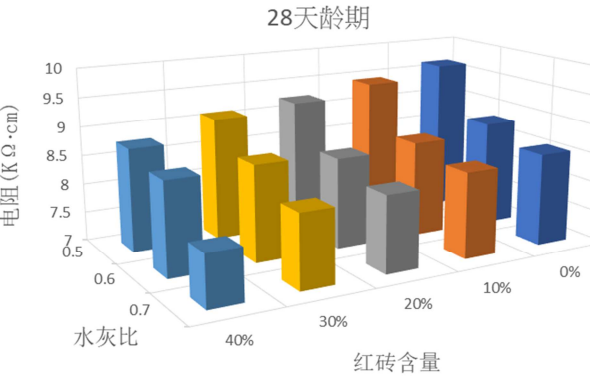


图5 再生混凝土的电阻趋势。

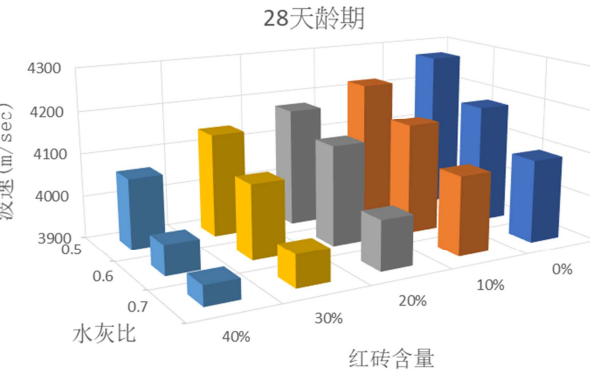


图6 再生混凝土超声波波速的趋势。



图7 再生骨料存在着缺陷。

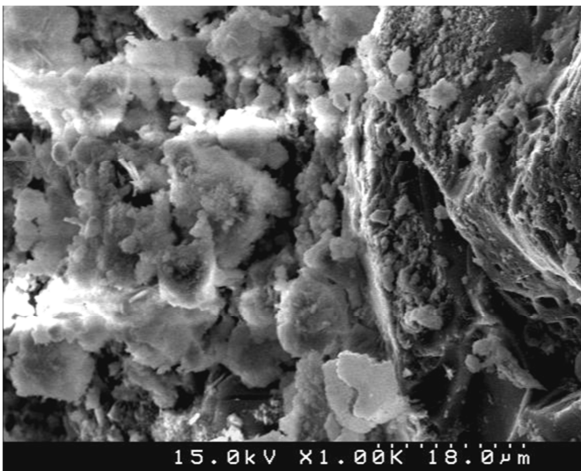


图8 水泥水化生成物正常地附着于再生骨料表面。

4. 讨论与结论

1. 再生红砖骨料单位重虽较低,但与轻质骨料相比仍是较重的,且依照本研究成果,红砖含量最高(40%)的再生混凝土单位重,仍不符GB/T 15229《轻集料混凝土小型空心砌块》的要求,仅能使用GB/T 8239-2014《普通混凝土小型砌块》作为N类砌块。
2. 再生混凝土红砖含量高,造成吸水率提高、电阻性质降低及超声波波速也降低,均是源由于孔隙率高。高孔隙的再生混凝土制成的砌块若使用于外墙,有抵御天然气候水密性不足的疑虑;若使用在室内的隔间墙,高孔隙易蓄积湿气,墙面长期处于湿度较高的状态,致使涂刷在墙面的腻子、漆料或壁纸,较易脱落,因此有必要克服再生混凝土孔隙偏高的问题。
3. 再生混凝土孔隙率高,外界有害物质入侵的机率较大,易有体积稳定性及耐久性的隐患;此外可能会造成强度的折减。
4. 对于再生混凝土孔隙偏高的缺点,建议添加火山灰材料,并施以外部压力进行养护,增加水化硅酸钙含量来改善再生混凝土的致密性。
5. 再生混凝土的抗压强度能符合GB/T 50743《工程施工废弃物再生利用技术规范》及GB/T 8239《普通

混凝土小型砌块》N类空心砌块及实心砌块最高级别MU20.0的强度需求,综合本研究的相关工程特性,亦符合上述规范的要求,因此再生混凝土适用于制造混凝土砌块。

致谢

本文之成果为惠州学院教授、博士科研启动项目:《水泥浆与既有混凝土表面的性质对新老混凝土界面黏结性能的影响》,编号:2020JB032,经费支持所得。

参考文献

- [1] 我国建筑垃圾的数量占到城市垃圾总量三到四成[EB/OL]. (2021-08-13). https://www.sohu.com/a/483115061_121069867
- [2] Lihua Zhu, Zengmei Zhu, Advances and New Challenges for Recycled Aggregate Concrete[J], Advances in Materials Science and Engineering, Volume 2020 Article ID 6326178, <https://doi.org/10.1155/2020/6326178>
- [3] J. Suárez, F. López, C. L. Pérez, P. Serna, and M. A. Serrano, Influence of recycled brick aggregates on properties of structural concrete for manufacturing precast prestressed beams[J], Construction and Building Materials, vol.149, pp. 507–514, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.147>
- [4] Alessandra Mobili, Chiara Giosuè, Valeria Corinaldesi, Francesca Tittarelli, Bricks and Concrete Wastes as Coarse and Fine Aggregates in Sustainable Mortars[J], Advances in Materials Science and Engineering, Volume 2018, Article ID 8676708, <https://doi.org/10.1155/2018/8676708>
- [5] 陈明良, 建筑产业废弃物再利用之研究—台北都会区建筑废弃物数量与种类之调查研究[D], 台北, 台湾工业技术学院硕士论文, 1996.07, P.4-P.12。
- [6] GB/T 50743-2012《工程施工废弃物再生利用技术规范》[S]。
- [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, 2010, P.42-P.47。
- [8] GB/T 25176-2010《混凝土和砂浆用再生细骨料》[S]。
- [9] GB/T 25177-2010《混凝土用再生粗骨料》[S]。
- [10] GB/T 14684-2011《建设用砂》[S]。
- [11] GB/T 8239-2014《普通混凝土小型砌块》[S]。
- [12] Pitarch, A. M., Reig, L., Tomás A. E., F. J. López, Effect of Tiles, Bricks and Ceramic Sanitary-Ware Recycled Aggregates on Structural Concrete Properties [J], Waste and Biomass Valorization, 10, P.1779–1793, 2019, <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0154-0>
- [13] Ozkan Sengul, Use of electrical resistivity as an indicator for durability [J], Construction and Building Materials, Volume 73, 30 December 2014, Pages 434-441, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.077>

- [14] Ronaldo A. Medeiros-Juniora, Maryangela G. Limab, Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement [J], Construction and Building Materials, Volume 107, 15 March 2016, Pages 11-16, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.168>
- [15] R. Latif Al-Mufti, A.N.Fried, The early age non- destructive testing of concrete made with recycled concrete aggregate [J], Construction and Building Materials, Volume 37, December 2012, Pages 379-386, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.058>
- [16] Powers, T. C., J. Am. Ceram.Soc. [J], 1958, Vol. 41, No.1, P. 1-6.
- [17] P. Kumar Mehta, Paulo J. M. Monteiro, Concrete Microstructure, Properties and Materials [M], New York, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2006, P. 30-P. 42.