

文章编号: 1001-4888(2017)02-0265-08

骨料堆积注浆再生混凝土的 抗压强度及其影响因素^{*}

桑国臣, 崔立, 童小根, 朱轶韵

(西安理工大学土木建筑工程学院, 陕西西安 710048)

摘要: 为提高再生粗骨料利用率及降低再生混凝土质量控制难度, 本文采用骨料堆积注浆法制备早强型再生混凝土。利用 Griffith 断裂力学理论及“实际水料比与名义水料比”的差异, 分析了骨料性能对混凝土强度的影响, 并通过扫描电子显微镜(SEM)分析了再生混凝土界面过渡区(interfacial transition zone, ITZ)的特点。结果表明, 骨料强度及吸水率均对再生混凝土强度具有影响, 且骨料吸水作用对混凝土强度提高具有促进作用, 再生混凝土的界面结合强度较高。

关键词: 再生混凝土; 骨料堆积注浆; 抗压强度; 界面过渡区

中图分类号: TU5

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-139

0 引言

我国废弃混凝土数量逐年增加, 由此造成的环境污染、资源浪费等问题不断加重。发展再生混凝土技术可以促进资源循环利用, 但由于再生骨料存在内部缺陷多、组分复杂、形态多样等特点, 以再生骨料取代天然骨料时, 易对混凝土的性能产生不利影响。在等水灰比条件下, 再生混凝土的和易性与强度均随再生骨料取代率的增大而降低^[1,2]。文献[3]对再生骨料基本性能进行了系统的试验分析, 结果表明, 再生粗骨料的吸水率大、压碎指标大、坚固性差等特性, 是影响再生混凝土性能的主要因素。采用水泥净浆或水泥砂浆对再生骨料进行预处理, 可降低骨料的压碎指标及吸水率, 文献[4,5]通过试验测试证实了骨料预处理方法对再生混凝土强度的改善作用。废弃混凝土的再利用问题一直受到广大学者的关注, 长期以来, 学者们通过系统地研究探索与工作积累, 在再生混凝土技术理论方面取得了诸多有益成果, 为再生混凝土的技术突破和理论发展奠定了坚实的基础^[6,7]。但骨料预处理及配合比优化等再生混凝土制备技术, 存在制备工艺复杂及质量控制难度大等特点, 这也是我国再生混凝土研究多、应用少的主要原因之一。

为降低再生混凝土质量控制难度及提高再生骨料利用率, 本文借鉴水利工程中修筑堆石混凝土坝时采用的自密实堆石混凝土的技术思路^[8], 采用骨料堆积自密实注浆的方法, 制备早强型再生混凝土。骨料堆积自密实注浆再生混凝土, 是利用早强型自密实砂浆的高流动性特点, 在粗骨料堆积体(粗骨料粒径大于 5mm)内填充自密实砂浆, 再经凝结硬化而形成的早强型再生混凝土。骨料堆积自密实注浆法制备再生混凝土, 具有施工简单、再生粗骨料利用率高等优点。本文采用骨料堆积自密实注浆的混凝土成型方法, 以原生粗骨料和两种不同强度的再生粗骨料制备出不同的混凝土, 并通过对比分析, 研究再生粗骨料强度、吸水率及界面过渡区(interfacial transition zone, ITZ)特征对抗压强度的影响。

^{*} 收稿日期: 2016-08-01; 修回日期: 2016-08-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278419)

通讯作者: 桑国臣(1973—), 男, 博士, 副教授。主要从事建筑材料与建筑热工研究。Email: sangguochen@xaut.edu.cn

1 试验设计

1.1 试验原材料

试验采用自制的早强快硬型自密实干混砂浆,该砂浆是以快硬硫铝酸盐水泥作为胶凝材料,以石英砂为骨料,石英砂的最大粒径小于 2mm。由于本试验采用骨料堆积注浆法成型混凝土试件,自密实砂浆的流动性须满足自密实注浆要求,并且在浇筑过程中不出现泌水现象。按文献[9]中规定的试验方法对自密实砂浆的工作性能进行试验,确定出砂浆水料比范围:0.20~0.22。水料比为 0.20 和 0.22 的自密实砂浆性能测试结果见表 1。

表 1 自密实砂浆的基本性能

Tab. 1 The properties of self compacting mortar

编号	水料比	浆体流动度(mm)		抗压强度(MPa)				抗折强度(MPa)			
		初始	15min	2h	4h	1d	28d	2h	4h	1d	28d
GM-1	0.20	360	365	23.0	28.3	37.6	48.8	3.5	4.3	5.4	7.6
GM-2	0.22	370	370	17.7	23.8	34.3	44.5	3.5	3.7	4.0	6.7

注:“水料比”为拌和水与自密实砂浆干混料的质量比。

再生粗骨料(Recycled Aggregate, RA)是由废弃的 C20 和 C30 碎石混凝土经破碎、筛分、烘干所得到的连续级配的碎石类再生粗骨料,两种再生粗骨料分别记为 RA20 和 RA30。原生粗骨料(Nature Aggregate, NA)为碎石,经筛分获得连续级配,烘干备用。试验中所用到的再生骨料(RA)和原生骨料(NA),除筛分及烘干外,不进行其他预处理。再生骨料(RA)和原生骨料(NA)的基本性能见表 2。

表 2 粗骨料的基本性能

Tab. 2 The properties of coarse aggregates

骨料类型	粒径范围(mm)	表观密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	压碎指标(%)	饱和吸水率(%)
NA		2730	9.00	0.31
RA20	5.0~31.5	2245	17.09	4.50
RA30		2490	13.87	3.19

1.2 混凝土配合比

为比较分析骨料性能、砂浆强度对混凝土力学性能的影响,本研究对不同水料比(即水与干混自密实砂浆的质量比)下三种骨料混凝土进行配制与测试,混凝土配合比见表 3。

表 3 混凝土配合比

Tab. 3 Mix proportions of concrete

试件编号		自密实砂浆的水料比	自密实砂浆(g)	粗骨料(g)
CAN	CNA-1	0.20	3000	3600
	CNA-2	0.22		
CRA20	CRA20-1	0.20		
	CRA20-2	0.22		
CRA30	CRA30-1	0.20		
	CRA30-2	0.22		

注: CNA 为原生骨料混凝土(Concrete of Nature Aggregate,CNA);CRA 为再生骨料混凝土(Concrete of Recycled Aggregate,CRA)。

1.3 试件制备与测试方法

混凝土试件的制备,采用 100mm×100mm×100mm 的混凝土模具。在模具中预先堆放粗骨料,将

制备好的自密实砂浆的浆体料,均匀倒入模板内的粗骨料上并辅以适当的振捣,使浆体料充分填充骨料间隙,试件成型方法见图1。每组试件3块,试件在标准养护条件下进行养护至一定龄期,按《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081)测试混凝土试件的抗压强度。

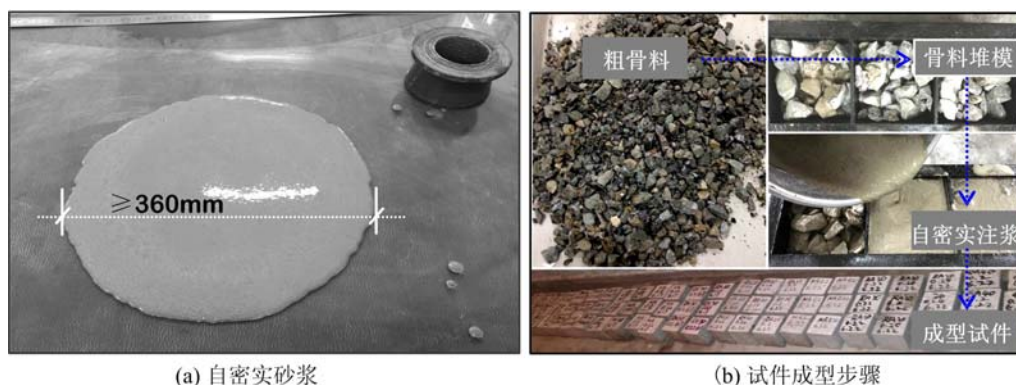


图1 骨料堆积注浆成型混凝土试件

Fig. 1 Concrete specimens preparation using coarse aggregate bulk grouting method

采用 WAW-1000 微机控制电液伺服万能试验机对自密实砂浆及混凝土的强度进行测试,采用 JSM-6700F 型扫描电子显微镜对材料的微观形貌进行分析。

2 试验结果与讨论

按表3中的混凝土配合比,分别以0.20和0.22水料比的自密实砂浆为凝结材料,采用骨料堆积注浆法制备了原生骨料混凝土(CNA)和再生骨料混凝土(CRA20、CRA30),并测试了三种混凝土的2h、4h、1d、28d抗压强度,各龄期混凝土强度见图2。

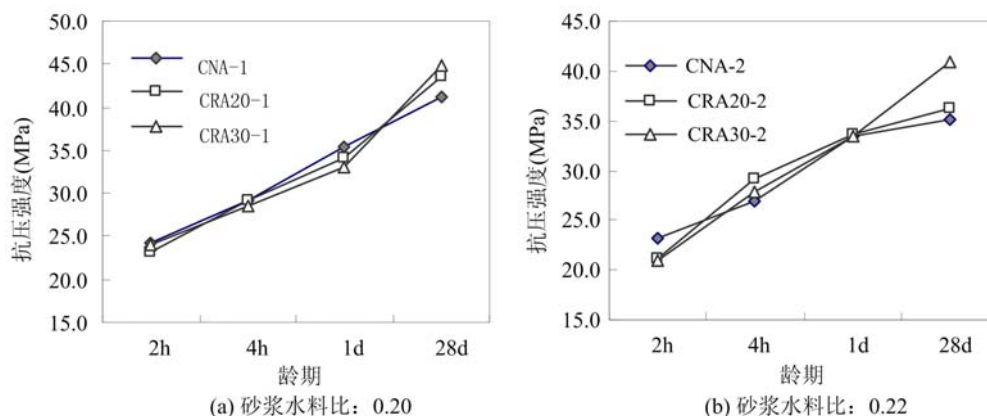


图2 各龄期混凝土抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of concrete specimens at different age

从图2中各龄期混凝土的强度变化情况可见,在两种水料比下,CNA、CRA20和CRA30的2h抗压强度均大于20MPa,4h抗压强度大于25MPa,1d抗压强度大于30MPa,均表现出了早期强度高的特点,其强度发展规律与自密实砂浆的强度增长特点相一致。对比图2中的(a)和(b)可以发现,砂浆水料比显著影响混凝土的抗压强度。当砂浆水料比为0.20时,CNA、CRA20、CRA30的28d抗压强度分别为41.2MPa、45.7MPa和44.9MPa。当砂浆水料比由0.20增加至0.22时,三种混凝土28d抗压强度分别下降了14.8%、20.6%、9.1%。

2.1 再生粗骨料的强度对混凝土抗压强度的影响

两种再生混凝土CRA20和CRA30中所采用的粗骨料RA20和RA30,其性能差别主要表现在表观密度、吸水率及压碎指标值等参数上,并且再生骨料的压碎指标值受骨料表观密度、吸水率、孔隙率的综合影响。从表2可见,粗骨料RA20的压碎指标值为17.09%,RA30的压碎指标值为13.87%,两者

相比,再生粗骨料 RA30 的强度略高。从图 2 中可以看出,在两种砂浆水料比下,再生混凝土 CRA20 和 CRA30 的 28d 抗压强度呈现出了相同的差异,即 CRA30 强度大于 CRA20。

混凝土主要是由水泥石、粗骨料及界面过渡区(ITZ)等构成的脆性复合材料,材料在宏观受压破坏时,内部的孔隙、裂纹等并不是简单受压,而是处于复杂受力状态,因此材料受压初始破坏主要是由相对薄弱的拉应力控制^[10]。根据 Griffith 断裂力学理论及其在水泥基材料中的拓展研究成果可知,水泥基材料在外力作用下孔隙断裂时的临界拉应力为^[11]:

$$\sigma_{tc} = \sqrt{\frac{2E_0\gamma_0}{\pi}} \cdot \frac{(1-P)}{\sqrt{k \cdot r}} \quad (1)$$

式中, σ_{tc} 为水泥基材料的断裂临界应力; E_0 为水泥基体的弹性模量; γ_0 为水泥基体断裂表面能; P 为孔隙率; r 为孔径; k 为材料的特征系数。

由(1)式可知,混凝土强度主要受水泥基体的性能及内部孔隙含量与孔隙大小的影响。比较 CRA20 和 CRA30 可知,虽然两种混凝土中自密实砂浆性能相同,但再生粗骨料 RA20 的孔隙率大、强度低,由此造成 CRA20 混凝土的孔隙率大、混凝土基体弹性模量小、基体断裂能小,因此 CRA20 的 28d 抗压强度较 CRA30 小。

2.2 再生粗骨料吸水作用对混凝土抗压强度的影响

从图 2 中的混凝土强度测试结果可见,在两种水料比下,原生混凝土 CAN 的 28d 抗压强度小于再生混凝土 CRA20 和 CRA30 的 28d 抗压强度。再生粗骨料在破碎过程中受到较大的外力作用,在骨料内部会出现微裂缝,其表面也可能附着有水泥砂浆,这些都会造成其孔隙率大、表观密度小及吸水率高等特点。从表 2 中可见,三种骨料中,原生骨料 NA 的吸水率最小。

骨料吸水作用会对混凝土中起胶结作用的自密实砂浆实际水料比产生影响。自密实砂浆的“实际水料比”,是指粗骨料吸水后砂浆体内部的实际水料比,记为“(W/m_m)_n”。由于粗骨料的吸水作用,混凝土中自密实砂浆的实际水料比与名义水料比存在一定的差别,其差别的程度受骨料吸水率的影响,骨料的饱和吸水率越大,实际水料比越小。实际水料比的计算公式为:

$$(W/m_m)_n = \frac{m_w - \gamma L W_A}{m_m} \quad (2)$$

式中, m_w 为自密实砂浆中的拌和水用量,g; γ 为吸水率折算系数,取 0.5^[16]; L 为粗骨料的用量,取 3600g; W_A 为粗骨料的饱和吸水率,%。

根据表 2 中的骨料饱和吸水率和表 3 中的混凝土配合比,由式(2)计算出砂浆名义水料比为 0.20 和 0.22 时三种混凝土中自密实砂浆的实际水料比,见图 3。

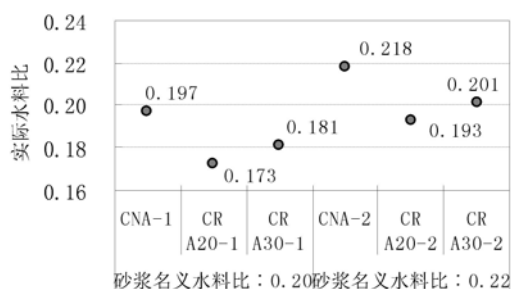


图 3 砂浆相的实际水料比与名义水料比

Fig. 3 Real water-material ratio and name water-material ratio of mortar phase in concrete

由图 3 可见,CNA 的实际水料比最大。结合图 2 中三种混凝土 28d 抗压强度值的差异,可以发现,CAN 的实际水料比最大,其 28d 抗压强度值最小,由此可见,骨料吸水率是影响混凝土强度的重要因素之一。通过对比本试验中的骨料吸水率与混凝土抗压强度表明:采用骨料堆积注浆法制备再生混凝土时,自密实砂浆水料比在 0.20~0.22 范围内,相同水料比下,骨料的吸水作用对混凝土 28d 抗压强度提高具有一定的促进作用。

骨料吸水作用除了影响混凝土 28d 的抗压强度外,还影响混凝土的强度发展特点。比较不同龄期下的混凝土抗压强度与同水料比自密实砂浆抗压强度,结果见图 4。

由图 4 可见,混凝土初期($\leq 4h$)抗压强度均大于同水料比下的自密实砂浆抗压强度,而在 1d 后混凝土的抗压强度小于砂浆抗压强度,并且这种强度差值随龄期的变化与砂浆水料比有关,水料比越大差值越大。其原因在于,骨料吸水作用始发于自密实砂浆与骨料混合时,但随着骨料吸水饱和后,砂浆相

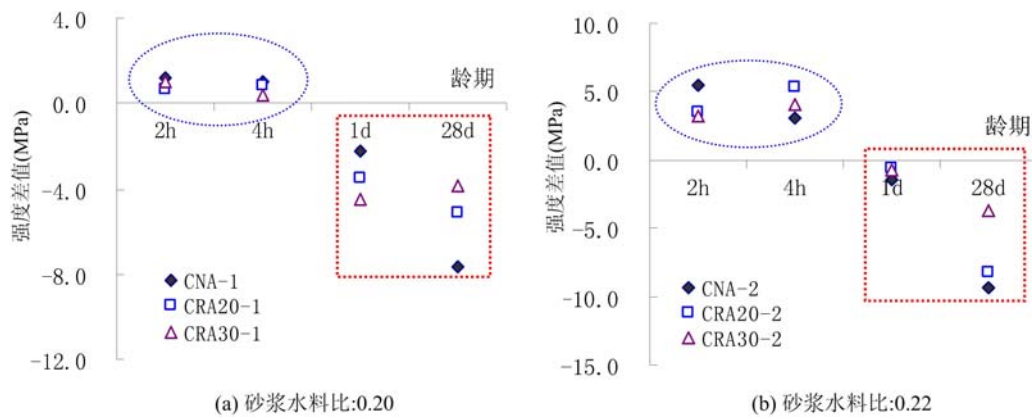


图4 各龄期混凝土抗压强度与自密实砂浆抗压强度差

Fig. 4 The compressive strength difference between concrete and self compacting mortar at different age of the water-to-binder ratio tends to be stable. The water absorption of aggregate mainly occurs in the early stage, at this time the actual water-to-binder ratio of the mortar phase in the concrete is smaller than the nominal water-to-binder ratio of the self-compacting mortar, which is the reason for the early compressive strength of concrete being higher than the mortar strength.

2.3 原生与再生骨料混凝土的 ITZ 对比分析

采用骨料堆积注浆法制备的混凝土,可将其视为由骨料堆积体、自密实砂浆及界面过渡区(ITZ)构成的三相非均质复合材料,但由于再生骨料和原生骨料性质不同,因此两种混凝土的界面特征可能也存在一定的差异。对于再生粗骨料混凝土而言,再生粗骨料中裂缝及孔隙的含量较原生骨料显著增加,其裂缝和孔隙含量情况可由骨料吸水率看出。为探究两种混凝土在受压状态下的界面破坏差异,比较了原生骨料混凝土和再生骨料混凝土受压破坏后的断面形貌特征(见图5)。

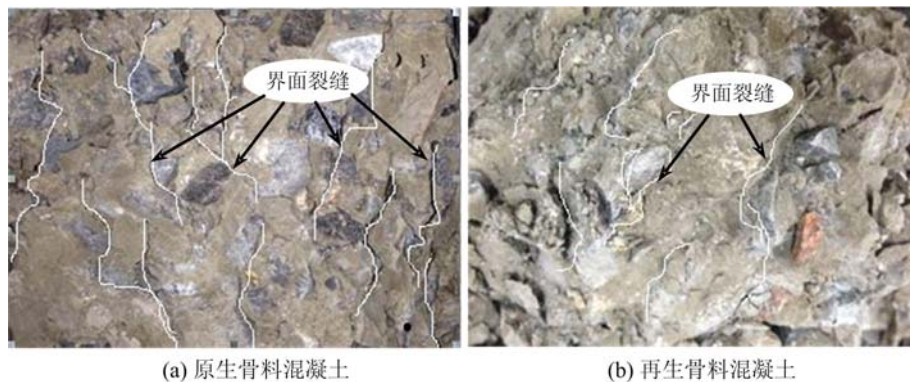


图5 混凝土受压破坏后的断面形貌特征

Fig. 5 Fracture surface morphology of damaged concrete specimen

从图5(a)中可以看出,原生骨料混凝土中骨料与水泥石的界面裂缝数量多、形貌清晰,界面裂缝相互贯通形成网格状分布特征,并且断面上呈现出了明显的骨料界面剥离破坏特点。图5(b)再生骨料混凝土中,虽然也存在明显的界面裂缝,但与图5(a)相比,数量明显减少,并且骨料裸露的数量有所减少。图5中两种混凝土界面裂缝的特征差别,正是由于骨料的性能差异造成的。与原生骨料不同,再生粗骨料是由石子与其表面附着的水泥浆体构成的,因此吸水率明显偏大,并且骨料表面粗糙。原生骨料与再生骨料的表面形貌特征见图6。

根据已有研究可知^[12,13],普通混凝土界面过渡区的形成,是由于新拌混凝土中的粗骨料被水膜包覆,粗骨料附近的水灰比要大于水泥浆体的水灰比,混凝土凝结硬化后其粗骨料周围的孔隙率较水泥浆体本体的高。因此,界面过渡区(ITZ)在普通混凝土中是薄弱环节,是直接影响混凝土力学性能的重要因素^[14]。但再生骨料吸水特性在理论上应该能够改善界面过渡区(ITZ)的质量,从而提高混凝土的界面结合强度。图7和图8是用SEM拍摄的原生骨料混凝土(CNA20-1)和再生骨料混凝土(CRA20-1)的界面过渡区(ITZ)。其中,大图是放大300倍的SEM照片,小图是放大2000倍的SEM照片。

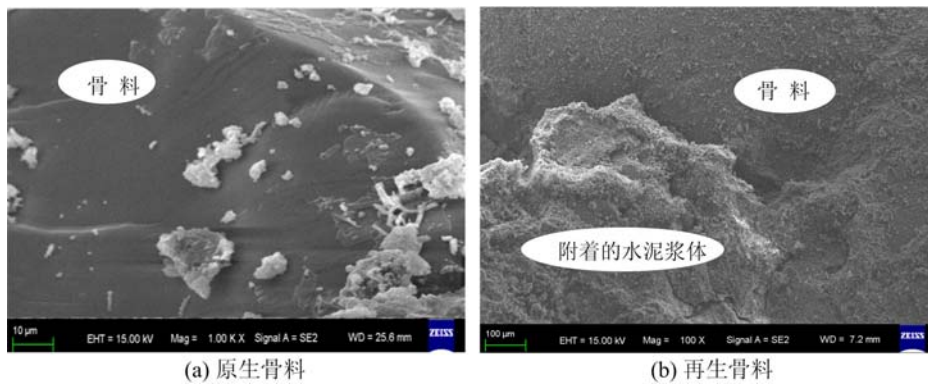


图 6 骨料表面形貌特征

Fig. 6 Aggregate surface morphology characteristics

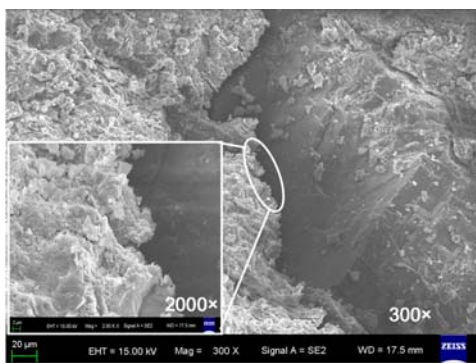


图 7 CNA20-1 界面过渡区的 SEM 照片

Fig. 7 The ITZ SEM photo of CNA20-1

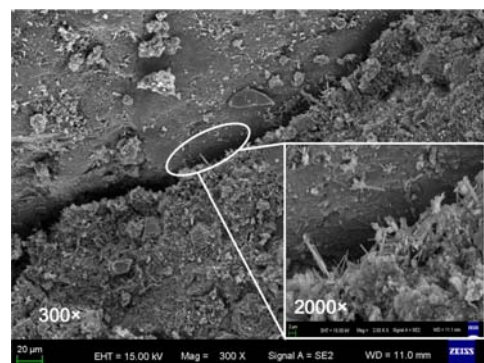


图 8 CRA20-1 界面过渡区的 SEM 照片

Fig. 8 The ITZ SEM photo of CRA20-1

由图 7 和图 8 可见,原生骨料和再生骨料与水泥浆体之间的界面均比较明显,但通过对比可以看出,原生骨料与水泥浆体间的界面更为清晰。原生骨料的质地密实且吸水率非常低(0.31%),所以水泥浆体及其水化产物不容易渗入骨料内部。从图 8 中可以看出,再生骨料的表面较粗糙,在硬化水泥浆体到骨料表面间形成了一个结构疏松的过渡区。通过对此过渡区放大(2000 倍 SEM)可清楚地看到,过渡区内存在有少量的针棒状钙矾石晶体等水泥水化产物。由此可以推断,再生骨料与水泥浆体的界面结合强度要高于原生骨料,这可能是同水料比条件下,与原生骨料混凝土相比,再生骨料混凝土 28d 抗压强度略高的主要原因之一。此外,从图 7 和图 8 中的界面过渡区 SEM 照片可以看出,ITZ 不仅是普通混凝土也是再生混凝土的薄弱环节。因此,同水料比下两种混凝土的 28d 抗压强度均小于无粗骨料的自密实砂浆(无 ITZ)的强度。

3 结论

根据试验测试和理论分析的结果,可得到以下主要结论:

(1) 骨料堆积自密实注浆方法制备再生混凝土,具有制备工艺简单、质量稳定、再生粗骨料利用率高、混凝土强度发展快等优点。所制备出的混凝土 28d 抗压强度大于 40MPa,且 2h、4h 和 1d 抗压强度分别达到了 28d 抗压强度的 50%、60%和 70%以上。

(2) 再生混凝土的抗压强度及其发展规律受骨料强度及吸水率的综合影响。再生骨料的强度是影响混凝土强度的重要因素之一,但相比原生骨料,再生骨料的吸水作用对混凝土强度提高具有一定的促进作用。

(3) 界面过渡区(ITZ)不仅是普通混凝土也是再生混凝土的薄弱环节,但由于再生骨料的吸水作用,使得再生混凝土的 ITZ 内有更多的水泥水化产物填充,其界面结合强度较原生骨料混凝土高。

参考文献:

- [1] 何锦云, 毛明明. C30 再生粗骨料混凝土和易性和抗压强度研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2011, 28(4):18—21 (HE Jinyun, MAO Mingming. Study on the workability and compressive strength of C30 recycled coarse aggregate concrete[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2011, 28(4):18—21 (in Chinese))
- [2] 李佳彬, 肖建庄, 孙振平. 再生粗骨料特性及其对再生混凝土性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2004, 7(4):390—395 (LI Jiabin, XIAO Jianzhuang, SUN Zhenping. Properties of recycled coarse aggregate and its influence on recycled concrete[J]. Journal of Building Materials, 2004, 7(4):390—395 (in Chinese))
- [3] 李佳彬, 肖建庄, 黄健. 再生粗骨料取代率对混凝土抗压强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(3):297—301 (LI Jiabin, XIAO Jianzhuang, HUANG Jian. Influence of recycled coarse aggregate replacement percentages on compressive strength of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(3):297—301 (in Chinese))
- [4] 陈彦文, 潘文浩, 孙小巍. 预处理再生骨料混凝土性能的试验研究[J]. 混凝土, 2012(1):81—83 (CHEN Yanwen, PAN Wenhao, SUN Xiaowei. Performance study of pretreated concrete with recycled aggregate[J]. Concrete, 2012(1):81—83 (in Chinese))
- [5] 刘军, 李瑶, 刘宇, 等. 无机预处理再生粗骨料的性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(1):133—138 (LIU Jun, LI Yao, LIU Yu, et al. Study on property of recycled coarse aggregate pretreated with inorganic materials [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition), 2009, 25(1):133—138 (in Chinese))
- [6] 陈宗平, 周春恒, 陈宇良. 再生碎石混凝土力学性能试验研究[J]. 实验力学, 2014, 29(3):333—343 (CHEN Zongping, ZHOU Chunheng, CHEN Yuliang. Experimental investigation on mechanical properties of recycled gravel aggregate concrete[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(3):333—343(in Chinese))
- [7] 许元. 超细粉煤灰对不同级配再生混凝土增强技术的研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2011(10):63—65 (XU Yuan. Research of ultra-fine fly ash on enhancement technology of recycled concrete under different gradations[J]. China Concrete and Cement Products, 2011(10):63—65 (in Chinese))
- [8] 李静, 姜林, 刘震, 等. 不同种类再生大骨料制作自密实堆积混凝土的实验研究 [J]. 实验力学, 2010, 25(4):425—430 (LI Jing, JIANG Lin, LIU Zhen, et al. Experimental study of self-compacting accumulation concrete prepared from different recycled big aggregate[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(4):425—430 (in Chinese))
- [9] JC/T 986—2005. 水泥基灌浆料[S]. 北京:中国建材工业出版社, 2005 (JC/T 986—2005. Cementitious grout [S]. Beijing: China Building Materials Press, 2008 (in Chinese))
- [10] 金南国, 金贤玉, 郭剑飞. 混凝土孔结构与强度关系模型研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(11):1680—1684 (JIN Nanguo, JIN Xianyu, GUO Jianfei. Relationship modeling of pore structure and strength of concrete [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(11):1680—1684 (in Chinese))
- [11] Kumar R, Bhattacharjee B. Study on some factors affecting the results in the use of MIP method in concrete research [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(3):417—424.
- [12] Alexander M G. Engineering and transport properties of the interfacial transition zone in cementitious composites [M]. RILEM, 1999.
- [13] 万惠文, 徐金龙, 水中和, 等. 再生混凝土 ITZ 结构与性质的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(11):29—32 (WAN Huiwen, XU Jinlong, SHUI Zhonghe, et al. Study on the structure and properties of interfacial transition zone (ITZ) of the regenerated concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, 26(11):29—32 (in Chinese))
- [14] 秦拥军, 梁芮, 于江. 新疆地区再生骨料砂浆含量对混凝土性能影响[J]. 混凝土, 2015(12):46—50 (QING Yongjun, LIANG Rui, YU Jang. Effect on the performance of concrete in Xinjiang area recycled aggregate mortar [J]. Concrete, 2015(12):46—50 (in Chinese))

Analysis on Compressive Strength and Its Influence Factors of Recycled Aggregate Concrete Prepared by Coarse Aggregate Bulk Grouting Molding Method

SANG Guo-chen, CUI Li, TONG Xiao-gen, ZHU Yi-yun

(School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to improve the utilization of recycled coarse aggregate and to reduce the difficulty of recycled concrete quality control, the coarse aggregate bulk grouting molding method was employed to prepare early strength recycled aggregate concrete. The influence of aggregate properties on concrete compressive strength was investigated by using Griffith fracture mechanics theory and the difference between “actual water to material ratio and nominal water to material ratio”. The Interfacial transition zone (ITZ) characteristics of recycled concrete were analyzed based on scanning electron microscope (SEM). Results show that both strength and water absorption of aggregate have influence on strength of recycled concrete, as well as the water absorption of aggregate has a promoting effect on the improvement of concrete strength, and the interface bonding strength of recycled concrete is higher than normal concrete.

Keywords: recycled aggregate concrete; coarse aggregate bulk grouting molding method; compressive strength; interfacial transition zone