

文章编号:1001-4888(2019)02-0249-09

粗骨料取代下的高性能再生混凝土率敏性研究^{*}

董海龙¹, 彭有开², 骆开静^{1,3}, 薛东朝¹, 宋伟鹏¹, 葛宇光¹

(1. 中国矿业大学(北京), 力学与建筑工程学院, 北京 100083;

2. 北京建筑大学, 工程结构与新材料北京市高等学校工程研究中心, 北京 100044;

3. 北京城市副中心投资建设集团有限公司, 北京 100029)

摘要:采用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验方法对粗骨料取代率为0%、30%、50%和100%的再生混凝土进行冲击试验,研究了应力—应变关系曲线、动态抗压强度、动态弹性模量以及破坏形态受应变率影响的变化规律。试验表明,应力—应变关系曲线开始段呈线性关系,随应变率的增大,线性段斜率增大,持续范围扩大,峰值应力变大;峰值应力具有率敏性,随应变率增大,峰值应力不断增加,取代率对峰值应力的影响差别不明显;动态弹性模量也具有率敏性,呈正相关关系,取代率不同,其率敏性程度有所差异;随着应变率增大,试件破坏程度随之加剧,从完整无裂缝到瞬间崩裂成碎块。

关键词:再生粗骨料;高性能再生混凝土;分离式Hopkinson压杆;应变率;率敏性

中图分类号: TU8

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-264

0 引言

废弃的混凝土块经过破碎、清洗、分级等工序加工处理(定义为再生骨料),以一定的比例替代天然骨料,与水泥、砂、水等材料混合搅拌形成的混合物材料即为再生骨料混凝土(Recycled Aggregate Concrete),简称再生混凝土^[1]。由于再生混凝土离散性高,强度低,和易性与耐久性相对较差,为了更好的试验效果,本文选择了高性能再生混凝土材料进行研究,即将粉煤灰、矿粉等微小颗粒矿物质和高效减水剂掺入其中,进而制备成高性能可再生混凝土,由于外加剂的作用,对材料的耐久性、强度以及和易性等改善明显^[2,3]。再生混凝土材料的应用,能一定程度上解决资源、生态环境与人类生存、发展之间的矛盾,因此学者对再生混凝土进行了广泛的研究并取得了丰硕的研究成果,如:文献[4,5]研究结果表明:相同的水灰比条件下,普通混凝土的强度与弹性模量都高于再生混凝土;Belén^[6]、Bairagi^[7]等通过对应力—应变曲线关系的研究发现:与普通混凝土相比,再生混凝土的峰值应力随着再生粗骨料取代率的增加而逐渐减小;肖建庄^[8]、陈宗平等^[9]分析了粗骨料取代率对峰值应变、弹性模量以及应力—应变全曲线的影响,结论为:中、低强度时材料的峰值应变与再生粗骨料取代率正相关,而弹性模量、强度与取代率负相关,应力—应变全曲线在达到峰值前相近,但达到峰值后与普通混凝土有所区别。综上,目前对于再生混凝土相关的力学性能研究多为静态力学性能范畴,随着再生混凝土的推广应用,再生混凝土替代普通混凝土修筑的结构面临地震作用、冲击荷载等影响,因此对再生混凝土材料在动态荷载作用下的力学性能研究具有重要意义。

^{*} 收稿日期:2018-12-04;修回日期:2019-01-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51608027, 51378044)

通讯作者:彭有开(1987—),男,博士,讲师,主要从事再生混凝土基本力学性能与结构抗震性能研究。

Email: pengyoukai@bucea.edu.cn

对混凝土类材料的动态力学性能研究目前广泛采用分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)^[10-12]试验,本文采用 75mm 大直径的 SHPB 装置进行研究,探讨在不同再生粗骨料取代率下,高性能再生混凝土的率敏性(混凝土的某一性能随加载应变速率变化而发生相应变化的这一性质,称为应变速率敏感性,简称率敏性),本文的研究结果可为实际工程提供参考。

1 试验概况

1.1 材料

试验采用的再生粗骨料来自北京市某建筑拆除物,经锤石破碎和颚式破碎机破碎,再经人工筛分和冲洗等加工而得。天然粗骨料及天然砂采购于北京市丰台区某混凝土搅拌站。再生粗骨料与天然粗骨料的粒径均在 5~20mm 之间,连续级配,如图 1 所示。实际测得砂的含水率为 0.98%。采用 PO42.5 普通硅酸盐水泥,F 类 I 级粉煤灰。骨料基本性能测试结果见表 1。

表 1 骨料的相关物理性能
Tab. 1 Aggregate related physical properties

类型	粒径 /mm	级配	吸水率	表观密度 /(kg/m ³)	堆积密度 /(kg/m ³)	细度模数
再生粗骨料	5~20	良好	0.52%	2518	2130	—
天然粗骨料	5~20	良好	0.27%	2663	2205	—
普通砂	—	—	14.23%	2584	1756	2.4



图 1 粗骨料(左:再生粗骨料;右:天然粗骨料)

Fig. 1 Coarse aggregates (left: recycled; right: natural)

表 2 高性能再生骨料混凝土配合比

Tab. 2 Mix proportion of high-performance recycled concrete

分组	取代率	细骨料/kg	粗骨料/kg		胶凝材料/kg		减水剂	实际水量/kg	水胶比 (实际)	砂率 /%
		普通砂	普通	再生	水泥	粉煤灰		水		
1-1	0%	700	1016	0	341	114	3.3	178	0.39	41
2-1	30%	700	711	305	341	114	3.3	182	0.40	41
2-2	50%	700	508	508	341	114	3.3	185	0.41	41
2-3	100%	700	0	1016	341	114	3.3	192	0.42	41

1.2 试件制备

参照规程^[13]配制了水胶比为 0.39,砂率为 41%的高性能再生混凝土,由于骨料拌和之前存在的水分以及再生骨料会吸收更多的水^[14],实际拌合用水量按 8%粗骨料取代量计入实际用水量,按照实际用量的最终配合比见表 2。设计了 4 组粗骨料取代率分别为 0%(试验对照组),30%、50%、100%的试件,分组及编号见表 2。每组浇筑 3 个尺寸为 150mm×150mm×300mm 的棱柱体试件,用以测量轴心抗压

强度(f_c), 2 个尺寸为 $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 的立方体试件, 养护 28 天, 进行取芯, 切割, 两端打磨光滑, 加工成 $\Phi 75\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的小圆柱体试件, 用于 SHPB 试验, 见图 2。



图 2 试件

Fig. 2 Specimens

2 轴心抗压强度试验

再生混凝土轴心抗压强度试验在北京建筑大学结构实验室进行, 采用了德国 Toni technik 刚性试验机对尺寸为 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的试件进行准静态受压加载。根据棱柱体与立方体抗压强度的换算关系式: $f_c = k \cdot f_{cu}$, 将所得 3 组数值 f_{cu} 求得平均值 $f_{cu,m}$, 且满足 95% 的保证率^[15], 得: $f_{cu,k} = f_{cu,m}(1 - 1.645\delta)$, 可得混凝土的强度等级范围为 C40~C50, 如表 3 所示。其中, f_c 为棱柱体抗压强度; f_{cu} 为立方体抗压强度; $f_{cu,m}$ 为立方体抗压强度平均值; $f_{cu,k}$ 为立方体抗压强度标准值; k 为换算系数; δ 为变异系数。

表 3 试件抗压强度

Tab. 3 Compressive strength of specimens

编号	取代率	极限荷载/kN	$f_{cu,m}/\text{MPa}$	$f_{cu,k}/\text{MPa}$	强度等级
1-1	0%	1140.16	50.67	54.23	C50
2-1	30%	971.22	43.17	46.06	C45
2-2	50%	1119.08	49.74	54.54	C50
2-3	100%	856.73	38.08	42.78	C40

由表 3 中立方体抗压强度标准值对比可知: 粗骨料取代率为 30% 时, 抗压强度标准值降低了 15.07%, 取代率为 50% 时, 强度有所回升, 相较于高性能天然混凝土(取代率为 0%) 强度无明显变化; 而当粗骨料取代率为 100% 时, 强度降低了大约 21%。此结果与肖建庄^[16]、Cai^[17]、常彦铮^[18]的研究结论一致。结合参考文献[10, 19], 其原因分析如下: (1) 水泥基与骨料交界面之间过渡区的强度与弹性模量相对较低, 对其整体的强度不利; (2) 因为再生骨料相比天然骨料吸收更多的水, 降低了水灰比, 导致强度增大, 为有利因素; (3) 由于再生粗骨料本身是由天然骨料被老的砂浆包裹而成, 再通过新的水泥胶凝材料与骨料粘结导致其粘结力较弱, 对强度产生不利影响。这三种因素同时存在, 但在不同粗骨料取代率下影响程度不同, 当取代率较低, 如 30% 时, 不利因素占主导, 导致强度降低; 当取代率为 50% 时, 有利因素占比大, 此时强度有所回升; 而当取代率为 100% 时, 不利因素再次占主导, 强度下降严重。

3 SHPB 试验系统及过程

本文中动力试验设备采用中国矿业大学(北京)国家重点实验室 $\Phi 75\text{mm}$ 的 SHPB 系统, 该设备的组成如图 3 所示, 包括: 子弹、输入杆、输出杆、吸收杆、动力系统以及测量记录系统 6 部分。其中, 输入、输出杆均为 2m 长的同质钢材, 其弹性模量和密度分别为: 206GPa , $7800\text{kg}/\text{m}^3$ 。

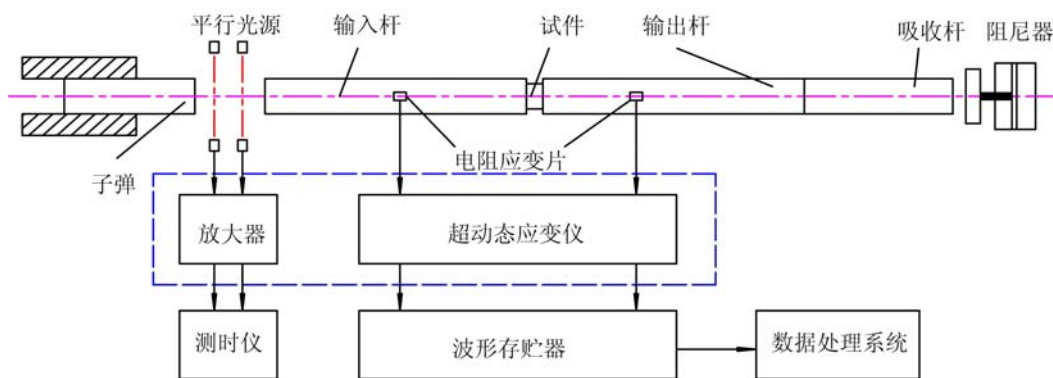


图 3 SHPB 试验系统

Fig. 3 SHPB experimental system

本试验中杆件直径 $\Phi=75\text{mm}$, 子弹长度 $L=400\text{mm}$, 入射波长 $\lambda=800\text{mm}$, 有 $\Phi/2\lambda=0.047$, 可认为满足 Skalak^[20] 一维条件假设理论, 可利用“二波法”对试验数据进行分析。另外, 采用在入射杆与试件的接触面端粘贴 1mm 厚橡胶材质的波形整形器, 可以使入射波的上升时段延长。

试验步骤简要分为: 空打—试件安装—冲击试件—测量及数据采集。首先进行的空打, 是为了确保整个设备准确无误的工作状态及测定敏感度系数 K , K 定义为应变与超动态应变仪测量的电压值 ΔU 的比值。然后安装试件, 调节气压, 进行试件冲击并记录下气压、子弹速度及动态应变采集仪的数据。

每组设计 5 组不同的冲击速度, 范围取 $2.0\sim 7.0\text{m/s}$, 相同气压下冲击 3 个试件。

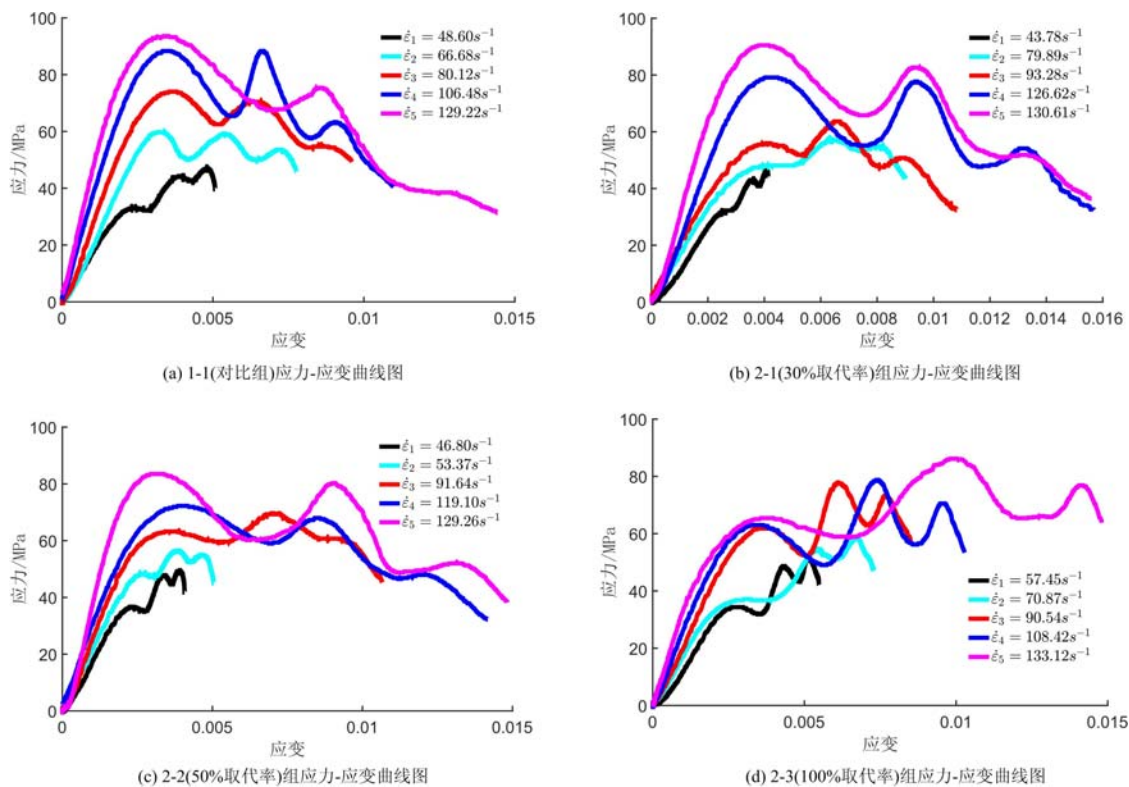


图 4 再生混凝土动态应力-应变曲线

Fig. 4 Dynamic stress-strain curve of recycled concrete

4 SHPB 试验结果分析

4.1 应力-应变曲线受应变率的影响

通过对试验数据进行处理, 可得各组试件在不同应变率下的动态应力-应变曲线, 如图 4 所示。

由图 4 中各应力-应变曲线的对比分析可知, 高性能普通混凝土(粗骨料取代率为 0%)与高性能

再生混凝土的动态应力—应变曲线的变化趋势是相同的:在第一个波峰出现之前的(开始)阶段近似表现为线性相关,此阶段定义为弹性变形期;随应变率增大,曲线开始阶段越来越陡,且弹性变形的曲线段变长,峰值应力及其对应的应变增大。由图4还可以看出:首先,不同取代率之间的差异比较小,由于再生混凝土的离散性较大,判断不同取代率对应力—应变曲线的影响需要大量的试验做进一步研究。其次,在应变率相对低时,应力—应变曲线在达到峰值应力之前有一段波动上升期,此现象与文献[21,22]的结果一致,结合文献分析,主要是因为试件受到冲击荷载后,材料的孔隙或者微裂缝压缩使其承载力有所增强;当应变率较小时,试件受到冲击时被压缩的时间更久,由于再生混凝土新老砂浆界面区组成的不均匀性使其抵抗荷载不均匀,所以呈现了曲线的波动上升段,此段实为应力的均匀期。而当冲击速度较大时,应变率较大,试件被压缩快,瞬时达到极限承载力。当达到极限承载力后试件的承载能力瞬间下降,表现为曲线瞬间下降。

4.2 应变率对试件抗压强度的影响

根据试验数据,可得峰值应力与应变率的关系如图5所示,应变率在 $20\sim 140\text{s}^{-1}$ 范围内有以下规律:(1)高性能再生混凝土与高性能普通混凝土的峰值应力都随应变率的增加而增加,且随着应变率的增加,可高达准静态加载下峰值应力的2.5倍,说明两者的峰值应力(抗压强度)具有率敏性。(2)两者上升的速度与幅度没有明显的差别。(3)当取代率为100%时,离散性很大。

由文献[23]可知,导致上述现象的原因是:应变率较低时,试件大多沿着截面薄弱区

(或过渡区,即混凝土砂浆与粗骨料粘结区域)破坏;而随着应变率增大,薄弱区与粗骨料两者都会被破坏,且应变率越大,骨料破坏得越多,此时界面过渡区对于破坏的影响很小,动态抗压强度可以大幅提升。另外,从裂缝扩展角度进行剖析可知,随着应变率增大,原生裂缝发展的同时次生裂纹出现,且发展过程逐渐缩短,速度变快,导致裂纹的扩展未来得及绕道通过薄弱区而直接穿过骨料,由于骨料强度高于薄弱区及水泥基,所以强度随应变率的增大而提高,具有率敏性。

4.3 动态弹性模量受应变率的影响

本文将动态弹性模量简称动弹模。将应力—应变曲线上0.4倍峰值应力与原点连接形成的直线的斜率定义为该应变率下试样的弹性模量。不同应变率、不同取代率下试件的弹性模量与应变率的关系如图6所示。

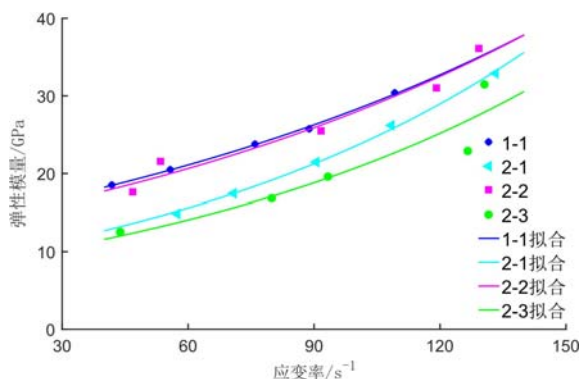


图6 动态弹性模量与应变率关系图

Fig. 6 Relationship between dynamic elastic modulus and strain rate

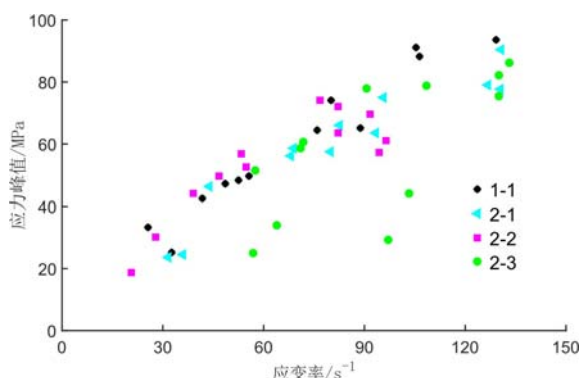


图5 峰值应力与应变率关系图

Fig. 5 Relationship between peak stress and strain rate

从图6可知,高性能再生混凝土与普通混凝土一样,都表现出动弹模率敏性,应变率越大,动弹模越大,且动弹模的增幅也随之变大。究其原因:一方面,动力作用增加引起的应变率的增加导致试件细裂缝未发展就被破坏了^[23],压缩导致试件更加密实;另一方面,应变率的增加使得试件内部自由水粘结力加大,使得混凝土材料抵抗变形破坏的抗力进一步提升,试件刚度变大,因此动弹模提高。通过试验数据的拟合,试件在受到冲击荷载时,动弹模与应变率近似呈线性或指数函数关系。

再生混凝土的动弹模低于普通混凝土,且受取代率的影响,在相同的应变率下,高性能

普通混凝土的动弹模与取代率为 50% 时相当,且分别大于 30% 和 100%,这一结论与文献[10]中强度越高,弹性模量越大的结论一致。由文献[23]可知,骨料的弹性模量直接影响混凝土弹性模量,且骨料的弹性模量越大,则混凝土弹性模量越大。由再生混凝土的组成可知,其骨料相当于天然骨料外面包裹了一层老砂浆,而老砂浆本身的弹性模量低于天然骨料,所以再生混凝土的弹性模量低于天然混凝土。

4.4 应变率对试件破坏形态的影响

限于篇幅,本文仅列出取代率为 50% 的一组试件的破坏形态进行分析,如图 7 所示(其中 a、b、c、d、e 为试件名称,应变率依次由低到高,1、2 为角标,1 表示试件横截面图,2 表示试件侧面图)。由图 7 可知,随应变率增大,试件的损伤程度加剧。试件 a 到试件 d,外形从完好至破裂成碎块。对于试件 a,应变率 $\dot{\epsilon}=31.64\text{s}^{-1}$,试件并没有出现明显的裂缝,损伤发生在内部。对于试件 b,应变率 $\dot{\epsilon}=82.16\text{s}^{-1}$,可以明显看到有贯通的裂缝,试件出现轴向劈裂破坏,但试件仍保持完整,并未出现破碎。对于试件 c,应变率 $\dot{\epsilon}=93.28\text{s}^{-1}$,相对于试件 b 的裂缝更多更加明显,并出现了沿着压应力方向的破裂面,样本被劈裂为两半。试件 d 的应变率 $\dot{\epsilon}=108.42\text{s}^{-1}$,试件的破坏进一步加剧,形成多个碎块,其中有部分小碎块。试件 e 的应变率 $\dot{\epsilon}=120.61\text{s}^{-1}$,试件破坏程度继续加剧,在应力波作用下最终形成粉碎性破坏。

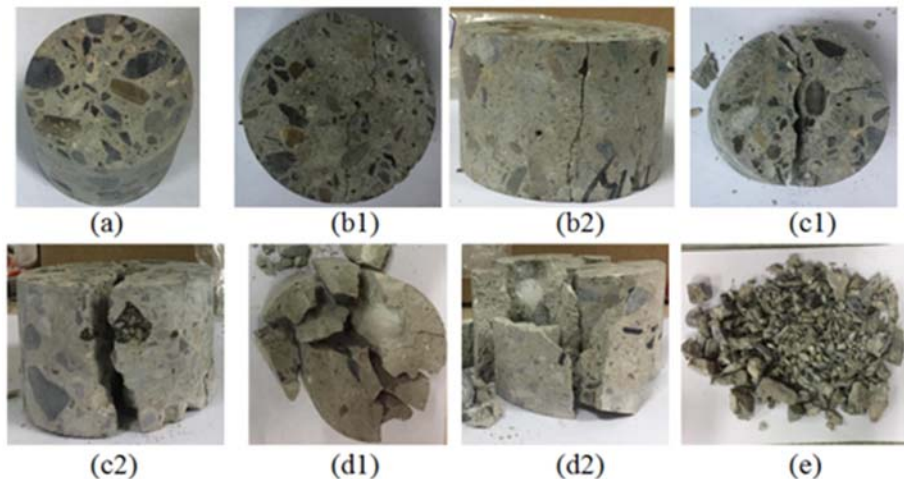


图 7 不同应变率下取代率 50% 组试件破坏形态

Fig. 7 Damage form of specimens with replacement ratio of 50% under different strain rate

综上可知,受应变率逐渐增大的影响,试件表现变化依次为:从完好 0 裂缝慢慢发展为有细微的裂纹、裂缝不断增多、整个试件贯通的裂缝、试件从压力作用方向裂成两块、被劈裂成多块,样本被瞬间冲击破碎,形成碎块。此外,应变率越大,试件破坏后碎块的粒径越小,试样破坏的声音越响,破坏的时间也越短。

应力波在发生反射、投射途中,促进裂缝沿着作用力的方向发展,试样破坏基本沿轴向,为劈裂破坏,即泊松效应引起的拉应力破坏。根据文献分析^[24-27],试件受到动力荷载时破坏机理的应变率效应总结为如下几点:

(1) 粘性效应:在应力波作用下,混凝土材料的强度有明显的率敏性,动态抗压强度随应变率增加而增大,称之为粘性特征^[28-30]。混凝土在冲击作用下,水泥基具有的粘性能抵抗细裂纹局部发展和宏观裂纹的进一步扩展。应变率越大,粘性效应越明显,试件强度越高。

(2) 裂纹的演化:仅单条裂缝时,随应变率的增大,裂缝会变平直并直接穿过骨料及水泥基;而对于细微裂缝,随应变率的增大,裂缝的数量会减少。John 等^[31]的试验表明,裂纹的扩展速度也随应变率的增大而加速。当应变率达到某一临界值的瞬间,裂缝来不及穿过试件的薄弱区而直接穿过了骨料,骨料强度比薄弱区强度大,所以试件受冲击荷载时强度增大,这一现象明显地呈现在了图 7 中。

(3) 惯性效应:当试件受到动力作用产生变形时,惯性力抵抗其变形,当应变率加大,惯性力相应增加,试件破坏需要更大的力,强度提高。由 Garnier^[32]的模拟分析可知,由于惯性力的约束,试件内部处于三向受力状态,试件强度提高。

5 结论

(1) 应力—应变曲线在开始的弹性阶段近似为线性变化;随着应变率增大,曲线越来越陡,且弹性变形的曲线段变长,同时峰值应力及其对应的应变也增大。

(2) 峰值应力具有应变率敏感性,应变率取值在 $20\sim 140\text{s}^{-1}$ 范围内,峰值应力随应变率的增加而增加,普通混凝土与再生混凝土上升的速度与幅度没有明显的差别。

(3) 高性能再生混凝土动态弹性模量具有应变速率敏感性,动态弹性模量与应变率正相关;再生混凝土的动态弹性模量低于普通混凝土,且因取代率的不同而有所差别,动态弹性模量从大到小按取代率排列依次为: $0\%>50\%>30\%>100\%$ 。

(4) 高性能再生混凝土试件的破坏形态也受应变率的影响,由完整无裂缝的试件到瞬间崩碎的粉碎性破坏,应变率越大,试件破坏越彻底。

参考文献:

- [1] 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, 25(10):17—20 (XIAO Jianzhuang, LI Jiabin, LAN Yang. Research on recycled aggregate concrete—A review [J]. Concrete, 2003, 25(10):17—20 (in Chinese))
- [2] Salem R M, Burdette E G. Role of chemical and mineral admixtures on physical properties and frost-resistance of recycled aggregate concrete[J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(5):558—563.
- [3] 冯乃谦. 普通混凝土, 高强混凝土与高性能混凝土[J]. 建筑技术, 2004, 35(1):20—23 (FENG Naiqian. Ordinary concrete, high strength concrete and high performance concrete[J]. Architecture Technology, 2004, 35(1):20—23 (in Chinese))
- [4] Ilker B T, Şengel S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate[J]. Cement & Concrete Research, 2004, 34(8):1307—1312.
- [5] Etcheberria M, Vázquez E, Marí A, et al. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete[J]. Cement & Concrete Research, 2007, 37(5):735—742.
- [6] Belén G F, Fernando M A, Diego C L, et al. Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate[J]. Construction & Building Materials, 2011, 25(5):2335—2342.
- [7] Bairagi N K, Ravande K, Pareek V K. Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates[J]. Resources Conservation & Recycling, 1993, 9(1-2):109—126.
- [8] 肖建庄. 再生混凝土单轴受压应力—应变全曲线试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(11):1445—1449 (XIAO Jianzhuang. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading[J]. Journal of Tongji University (Nature Science), 2007, 35(11):1445—1449 (in Chinese))
- [9] 陈宗平, 徐金俊, 郑华海, 等. 再生混凝土基本力学性能试验及应力应变本构关系[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1):24—32 (CHEN Zongping, XU Jinjun, ZHENG Huahai, et al. Basic mechanical properties test and stress-strain constitutive relations of recycled coarse aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1):24—32 (in Chinese))
- [10] 胡时胜. Hopkinson 压杆实验技术的应用进展[J]. 实验力学, 2005, 20(4):589—594 (HU Shisheng. The application development of experiment technique of Hopkinson pressure bar [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(4):589—594 (in Chinese))
- [11] Tang T X, Malvern L E, Jenkins D A. Dynamic compressive testing of concrete and mortar[C]. Engineering Mechanics in Civil Engineering, ASCE, 2015.
- [12] Liu F, Chen G, Li L, et al. Study of impact performance of rubber reinforced concrete[J]. Construction & Building Materials, 2012, 36(4):604—616.
- [13] JGJ55—2011, 普通混凝土配合比设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011 (JGJ55—2011, The design regulation of mix ratio of ordinary concrete[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011 (in Chinese))
- [14] 张亚梅, 秦鸿根, 孙伟, 等. 再生混凝土配合比设计初探[J]. 混凝土与水泥制品, 2002(1):7—9 (ZHANG Yamei, QIN Honggen, SUN Wei, et al. Preliminary study on mix proportion design of recycled aggregate

- concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2002(1):7—9 (in Chinese))
- [15] 李勇飞, 隋玉明. 桥梁勘察中红砂岩单轴抗压强度标准值的计算方法探讨[J]. 路基工程, 2015, 6(6):66—69 (LI Yongfei, SUI Yuming. Discussion on the calculation method of standard value of red sandstone uniaxial compressive strength in the bridge site survey[J]. Subgrade Engineering, 2015, 6(6):66—69 (in Chinese))
- [16] 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 (XIAO Jianzhuang, LI Jiabin, SUN Zhenping, et al. Study on compressive of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Tongji University (Nature Science), 2004, 32(12):1558—1561 (in Chinese))
- [17] Cai Haiyong, Zhang Min, Dang Lingbo. Experimental study on compressive strength of recycled aggregate concrete with different replacement ratios [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012(6):1277—1280.
- [18] 常彦铮. 再生混凝土抗压试验的数值模拟与等效抗压强度折减系数研究[D]. 西安建筑科技大学, 2011:17—21 (CHANG Yanzheng. Study on reduction factor of equivalent compressive strength and numerical simulation of compression test of recycled concrete[D]. Xi'an University of Architecture and Technology, 2011:17—21 (in Chinese))
- [19] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008 (XIAO Jianzhuang. Recycled aggregate concrete [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008 (in Chinese))
- [20] Skalak R. Longitudinal impact of a semi-infinite circular elastic bar [J]. Journal of Applied Mechanics-transactions of the Asme., 1957, 24:59—64.
- [21] 胡功笠, 刘荣忠, 齐爱东, 等. 混凝土材料的 SHPB 试验及动态性能分析[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2005(4):420—424 (HU Gongli, LIU Rongzhong, QI Aidong, et al. SHPB experiment and dynamic properties of concrete[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Nature Science), 2005(4):420—424 (in Chinese))
- [22] 张志刚, 孔大庆, 宫光明, 等. 高应变率下混凝土动态力学性能 SHPB 实验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007(6):611—618 (ZHANG Zhigang, KONG Daqing, GONG Guangmign, et al. Dynamic mechanical behavior of concrete under high strain rate using SHPB[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Nature Science), 2007(6):611—618 (in Chinese))
- [23] 李龙, 肖建庄. 再生骨料混凝土动力特性的探讨[C]. 第三届全国再生混凝土学术交流会, 2012 (LI Long, XIAO Jianzhuang. Discussion on dynamica behavior of recycled aggregate concrete[C]. The 3rd National Recycled Aggregate Concrete Academic Conference, 2012 (in Chinese))
- [24] Rossi P, Toutlemonde F. Effect of loading rate on the tensile behavior of concrete: description of the physical mechanisms[J]. Materials and Structures, 1996, 29:116—118.
- [25] Li Q M, Meng H. About the dynamics strength enhancement of concrete like-materials in a split Hopkinson pressure bar test[J]. International of Solid sand Structures, 2003, 40:343—360.
- [26] Rossi P, Boulay C. Influence of free water in concrete on the cracking process[J]. Magazine of Concrete Research, 1990, 42:143—146.
- [27] Rossi P, van Mier J G M, Boulay C, et al. The dynamie behavior of concrete: influence of free water[J]. Materials and Structures, 1992, 25:509—514.
- [28] 刘军忠, 许金余, 吕晓聪, 等. 冲击压缩荷载下角闪岩的动态力学性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10):2113—2120 (LIU Junzhogn, XU Jinyu, LV Xiacong, et al. Experimental study on dynamical properties of amphibolites under impact compressive loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10):2113—2120 (in Chinese))
- [29] 严成, 欧卓成, 段卓平, 等. 脆性材料动态强度应变率效应[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(4):423—427 (YAN Cheng, OU Zhuocheng, DUAN Zhuoping, et al. Strain-rate effect on dynamic strength of brittle materials[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(4):423—427 (in Chinese))
- [30] 宫凤强, 陆道辉, 李夕兵, 等. 不同应变率下砂岩动态强度准则的试验研究[J]. 岩土力学, 2013(9):2433—2441, 2429 (GONG Fengqiang, LU Daohui, LI Xibing, et al. Experimental research of sandstone dynamic strength criterion under different strain rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013(9):2433—2441, 2429 (in Chinese))
- [31] John R, Antoun T, Rajendran A M. Effect of strain rate and size on tensile strength of concrete[J]. Shock

Compression of Condensed Matter, 1992, 1994:501—504.

- [32] Garnier C. Etude du comportement dynamique des structures composites réalisées par LRI : application à l'impact et à la fatigue[J]. Toulouse Inpt, 2011.

Study on rate sensitivity of high performance recycled concrete with different coarse aggregate replacement ratios

DONG Hai-long¹, PENG You-kai², LUO Kai-jing^{1,3},

XUE Dong-chao¹, SONG Wei-peng¹, GE Yu-guang¹

(1. School of Mechanics and Architecture Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Civil Engineering Structure and Renewable Material, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Beijing Investment Group Co., LTD, Beijing 100029, China)

Abstract: The impact tests on recycled concrete with recycled coarse aggregate replacement ratios of 0%, 30%, 50% and 100% are conducted experimentally by the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB). The change rules of stress-strain curve, dynamic compressive strength, dynamic elastic modulus and failure form of high-performance recycled concrete influenced by the strain rate are studied. The experimental results show that at the beginning stage, the stress-strain curves are approximately linear. The slope and the length of the linear section as well as the peak stress increase with the strain rate increasing. The peak stress is sensitive to the strain rate and increases gradually as the strain rate increases. The difference among the effects of replacement ratios on the peak stress is not obviously obtained. Dynamic elastic modulus also has the property of rate sensitivity and is positively correlated with the strain rate. The degree of strain rate sensitivity is different for different replacement ratios. The degree of specimen damage gets more serious for larger strain rate. The specimen presents a completely uncracked form for low strain rates, while it breaks into pieces in an instant for high strain rate.

Keywords: recycled coarse aggregate; high-performance recycled concrete, Split Hopkinson Pressure Bar; strain rate; rate sensitivity