

文章编号: 1001-1455(2009)05-0516-07

矿渣-粉煤灰基地质聚合物混凝土的冲击力学性能*

范飞林¹, 许金余^{1,2}, 李为民¹, 杨进勇¹, 翟毅¹

(1. 空军工程大学工程学院机场建筑工程系, 陕西 西安 710038;

2. 西北工业大学力学与土木建筑学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 以矿渣和粉煤灰为原料, 以氢氧化钠和液体硅酸钠为激发剂制备出养护 28 d 后静态抗压强度高 56.4 MPa 的矿渣-粉煤灰基地质聚合物混凝土 (geopolymer concrete, GC) 试件, 以普通硅酸盐水泥为原料制备出养护 28 d 静态抗压强度高 61.6 MPa 的普通硅酸盐水泥混凝土 (ordinary Portland cement concrete, PC) 试件, 采用 $\varnothing 100$ mm 霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 试验装置分别对 GC 试件和 PC 试件进行冲击压缩试验, 得到了 2 种材料在 $0 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ 平均应变率范围内的应力应变曲线。通过分析应力应变曲线, 并与 PC 进行了对比, 研究了矿渣-粉煤灰基 GC 的冲击力学性能。结果表明, GC 作为一种新型混凝土类材料, 在冲击荷载作用下具有较好的强度、变形性能和韧性; GC 是一种率敏感材料, 冲击荷载作用下抗压强度、变形性能和韧性随应变率的增大而增强; 和 PC 相比, 冲击荷载下 GC 的抗压强度较小, 韧性较低, GC 在开始破坏前产生的变形与 PC 的基本相等, 完全破坏时产生的变形较小。

关键词: 固体力学; 冲击力学性能; SHPB 试验; 地质聚合物混凝土; 应变率

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 130·15

文献标志码: A

1 引言

地质聚合物是近年来国际上研究非常活跃的无机聚合物材料之一, 最早由 J. Davidovits^[1] 在 19 世纪 70 年代提出。它是以硅铝质材料为主要原料, 经适当的工艺处理, 在较低温度条件下通过化学反应得到的一类具有特殊的无机缩聚三维氧化物网络结构的新型材料, 既具有比高分子材料、陶瓷、水泥和金属更好的性能, 又具有原料来源广泛、工艺简单、能耗少、环境污染小等优点, 是一种可持续发展的绿色环保材料, 已被应用于汽车及航空工业、土木工程、交通工程等领域^[2-3]。自地质聚合物被提出以来, 大量的研究^[4-12] 表明: 地质聚合物材料具有优异性能, 以地质聚合物为胶凝材料制备的 GC, 基本力学性能良好, 耐久性优于普通硅酸盐水泥混凝土, 显示出良好的应用前景。但目前对 GC 的研究多集中于基本静力学性能和耐久性等方面, 对冲击力学性能的研究较少, 而工程上很多时候需要了解材料的冲击力学性能。SHPB 试验系统是目前进行材料在 $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内动态力学性能测试的主要试验手段, 已被广泛应用于金属、混凝土、陶瓷、岩石及软材料等多种材料动态力学性能的测试^[12-14]。

为了研究 GC 的冲击力学性能, 本文中以矿渣和粉煤灰为原料制备具有较高抗压强度的矿渣-粉煤灰基 GC 试件, 同时制备强度基本相当的 PC 试件, 在 $\varnothing 100$ mm SHPB 试验装置上进行对比试验。

2 试验

2.1 试验装置及波形整形技术

$\varnothing 100$ mm SHPB 试验装置, 如图 1 所示, 主要由主体设备、能源系统、测试系统等 3 大部分组成。主体设备包括发射装置、发射炮管、射弹、吸能装置、杆件及其调整支架、操纵台等; 能源系统包括空气压缩机、高压容器及管道; 测试系统包括弹速测试系统和动态应变测试系统。

* 收稿日期: 2008-03-31; 修回日期: 2008-06-26

基金项目: 空军工程大学工程学院优秀博士学位论文创新基金项目 (BC07002)

作者简介: 范飞林 (1983—), 男, 博士研究生。

对于混凝土类脆性材料的高应变率力学性能测试,试件在达到峰值应变前,满足应力均匀分布要求,且保持恒应变率加载,是保证试验结果可靠性的关键。波形整形技术^[15-16]可以延长入射脉冲的上升沿,让试件有足够的时间达到应力均匀,之外,还可以平滑波形,消除应力波的高频振荡。本文中采用H62黄铜波形整形器,厚度为1 mm,直径分别为20、22、25、27、30 mm。结果表明,波形整形器对波形有明显的改善效果,图2为整形后典型的波形。

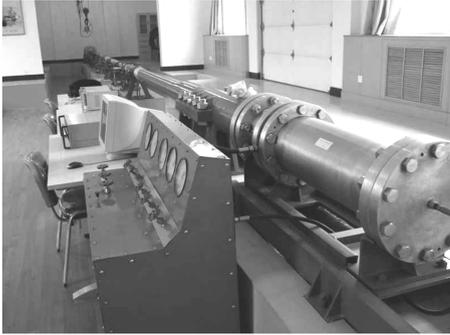


图1 $\varnothing 100$ mm SHPB 试验装置

Fig. 1 A 100-mm-diameter SHPB system

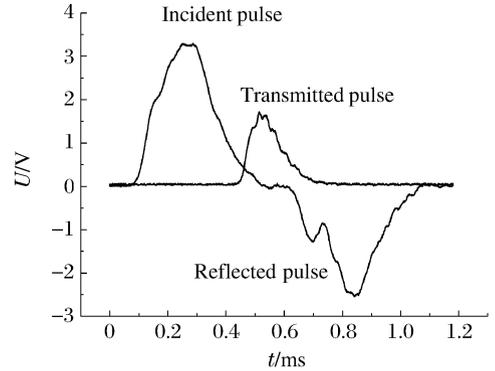


图2 整形后典型的波形

Fig. 2 Typically shaped waveforms

2.2 试件制备

试件的制作参考执行 GB/T 50081-2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》。

2.2.1 原料

水泥:选用 42.5R 级的普通硅酸盐水泥,陕西耀县水泥厂生产。外加剂:采用广州建宝新型建材有限公司生产的 FDN 高效减水剂。水淬高炉矿渣:由陕西蒲城恒远环保建材有限公司提供。粉煤灰:采用韩城第二发电厂生产的一级粉煤灰。硅酸钠水玻璃:由南京合一化工厂生产,液态,模数为 3.0~3.3。氢氧化钠:高浓度的氢氧化钠溶液是铝硅酸盐聚合反应的激活剂,采用东莞市乔声电子科技有限公司生产的化学纯氢氧化钠片状固体。细骨料为灞河中砂,细度模数为 2.8。粗骨料为泾阳县石灰石碎石,级配为:粒径 5~10 mm,15%;粒径 10~20 mm,85%。水为一般自来水。

2.2.2 配合比设计

地质聚合物混凝土的配合比 ρ 经过试配得到,其中 $\rho(\text{矿渣}) = 300.00 \text{ kg/m}^3$, $\rho(\text{粉煤灰}) = 100.00 \text{ kg/m}^3$, $\rho(\text{砂}) = 670.95 \text{ kg/m}^3$, $\rho(\text{碎石}) = 1033.20 \text{ kg/m}^3$, $\rho(\text{水}) = 105.00 \text{ kg/m}^3$;碱溶液由硅酸钠水玻璃和氢氧化钠溶于水中得到,其浓度 w 为硅酸钠水玻璃和氢氧化钠的质量之和与溶液总质量的百分比, $w = 56\%$,氢氧化钠和液体硅酸钠的质量比 $m_{\text{sh}}/m_{\text{wg}} = 0.29$ 。普通硅酸盐水泥混凝土的配合比按 C50 的强度等级设计得到,配合比分别为 $\rho(\text{水泥}) = 300.00 \text{ kg/m}^3$, $\rho(\text{粉煤灰}) = 100.00 \text{ kg/m}^3$, $\rho(\text{砂}) = 518.26 \text{ kg/m}^3$, $\rho(\text{碎石}) = 1368.13 \text{ kg/m}^3$, $\rho(\text{水}) = 144.00 \text{ kg/m}^3$, $\rho(\text{FDN 高效减水剂}) = 3.00 \text{ kg/m}^3$ 。

2 种试件:圆柱体和立方体。圆柱体试件的公称尺寸为 $\varnothing 95 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$;立方体试件的公称尺寸为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。其中 $\varnothing 95 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的试件用来进行冲击试验, $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 立方体试件用来进行静态抗压强度测试。

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

试件在养护 28 d 后,采用液压试验机对立方体试件进行静态抗压强度的测试,得到 GC 和 PC 试件的抗压强度分别为 56.4 和 61.6 MPa,近似认为试件静态的平均应变率为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

采用 $\varnothing 100 \text{ mm}$ SHPB 试验装置对经过切割、打磨的 GC 和 PC 圆柱体试件分别进行了 3 组冲击试验,试验得到的动态应力应变曲线如图 3 所示,试件开始破坏前的应变率时程曲线如图 4 所示,试验结果如表 1 所示。其中 $\bar{\epsilon}$ 为试件达到峰值应力 σ_p 之前的平均应变率,动态抗压强度 $f_{c,d}$ 为试件达到的峰值

应力,是反映材料强度的指标;峰值应变 ϵ_p 为试件达到峰值应力时对应的应变,极限应变 ϵ_{max} 为试件达到的最大应变, ϵ_p 和 ϵ_{max} 是反映材料变形性能的指标;动态增长因子 β 为试件动态抗压强度和静态抗压强度的比值,是反映冲击荷载下材料抗压强度增幅的指标。采用比能量吸收^[13,17] α_s 来表征混凝土材料的韧性,其物理意义是单位体积的混凝土材料吸收应力波能量的大小,可表示为

$$\alpha_s = \frac{AEc}{A_s l_s} \int_0^{t_d} (\epsilon_i^2(t) - \epsilon_r^2(t) - \epsilon_t^2(t)) dt \tag{1}$$

式中: E 为杆的弹性模量, c 为杆中波速, A 、 A_s 分别为杆、试件的横截面积, l_s 为试件的初始厚度, ϵ_i 、 ϵ_r 、 ϵ_t 分别为杆中的入射、反射、透射应变, t_d 为试件完全破坏时刻。

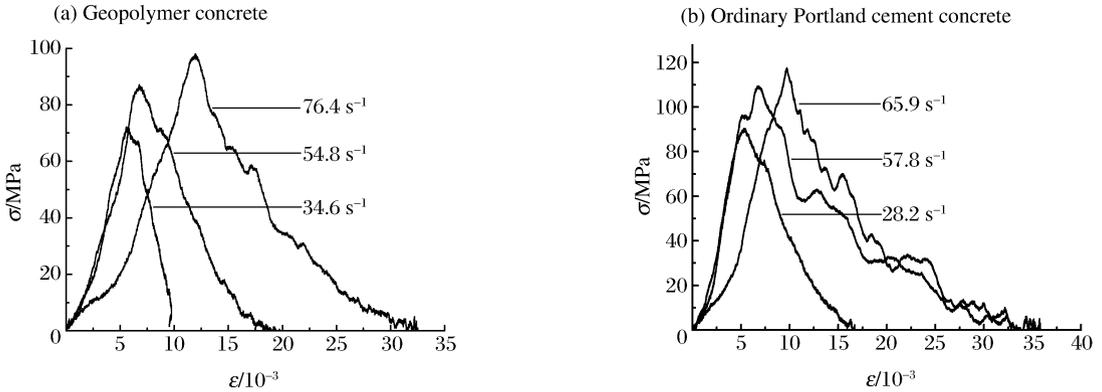


图 3 在不同的平均应变率下 GC 和 PC 试件的动态应力应变曲线

Fig. 3 Dynamic stress-strain curves of geopolymer concrete and ordinary Portland cement concrete specimens at different average strain rates

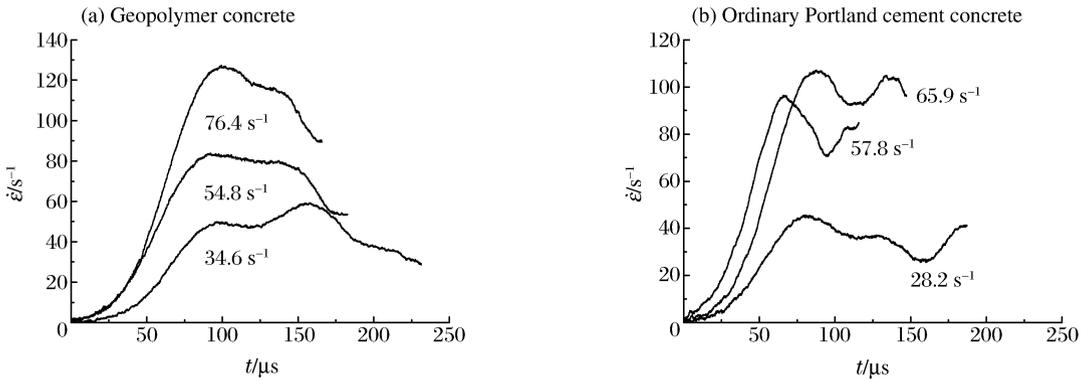


图 4 在不同的平均应变率下 GC 和 PC 试件的应变率时间历程曲线

Fig. 4 Strain rate history curves of geopolymer concrete and ordinary Portland cement concrete specimens at different average strain rates

表 1 GC 和 PC 试件 SHPB 试验结果

Table 1 Results of SHPB tests on geopolymer concrete and ordinary Portland cement concrete specimens

试件种类	$\bar{\epsilon} / s^{-1}$	$f_{c,d} / MPa$	$\epsilon_p / 10^{-3}$	$\epsilon_{max} / 10^{-3}$	$\alpha_s / (J/cm^3)$	β
GC	34.6	72.3	5.60	9.75	0.34	1.28
	54.8	87.1	6.77	19.81	0.69	1.54
	76.4	98.1	11.97	32.41	1.07	1.74
PC	28.2	90.3	5.29	16.70	0.62	1.47
	57.8	109.4	6.71	35.20	1.15	1.78
	65.9	117.5	9.70	35.85	1.30	1.91

3.2 试验结果分析

3.2.1 GC 和 PC 试件抗压强度的对比

图 5 为 GC 和 PC 试件在静态、动态共 4 种不同平均应变率下抗压强度和动态增长因子的对比。由图 5 可以看到:GC 是一种率敏感材料,抗压强度和动态增长因子表现出随平均应变率的增大而增加的趋势,PC 的抗压强度表现出类似的变化趋势;在相同平均应变率下,GC 的抗压强度和动态增长因子低于 PC 的。

由于 GC 和 PC 都属于混凝土类材料,因而其抗压强度在冲击荷载作用下表现出相同的变化规律;又因为 GC 是不同于 PC 的一种混凝土类材料,且 GC 的静态抗压强度略小于 PC 的,所以,在相同平均应变率下,GC 的抗压强度和动态增长因子小于 PC 的。

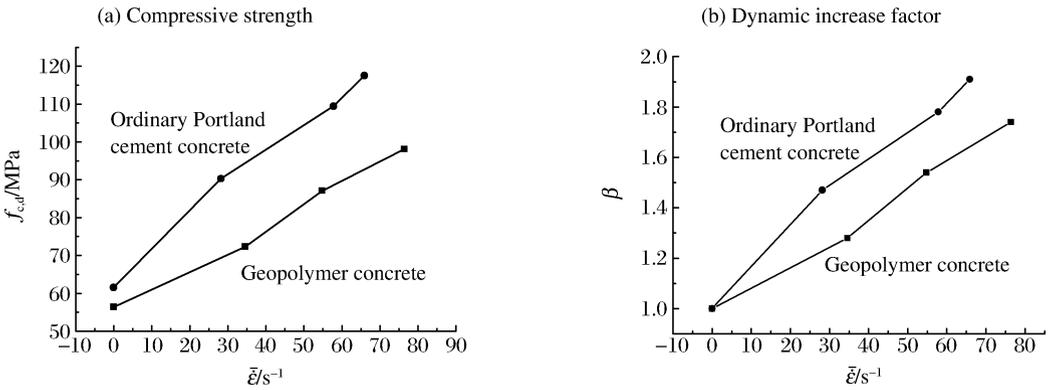


图 5 不同平均应变率下 GC 和 PC 试件的抗压强度和动态增长因子的对比

Fig. 5 Comparison of compressive strengths and dynamic increase factors between geopolymer concrete and ordinary Portland cement concrete specimens at different average strain rates

3.2.2 GC 和 PC 试件峰值应变和极限应变的对比

图 6 为 GC 和 PC 试件在 3 种不同平均应变率下的峰值应变 ϵ_p 和极限应变 ϵ_{max} 的对比。由图 6 可以看到:GC 的峰值应变和极限应变均表现出随平均应变率增加而增大的变化趋势,PC 表现出类似的变化趋势;在相同平均应变率下,GC 和 PC 的峰值应变基本相等,GC 的极限应变小于 PC 的。

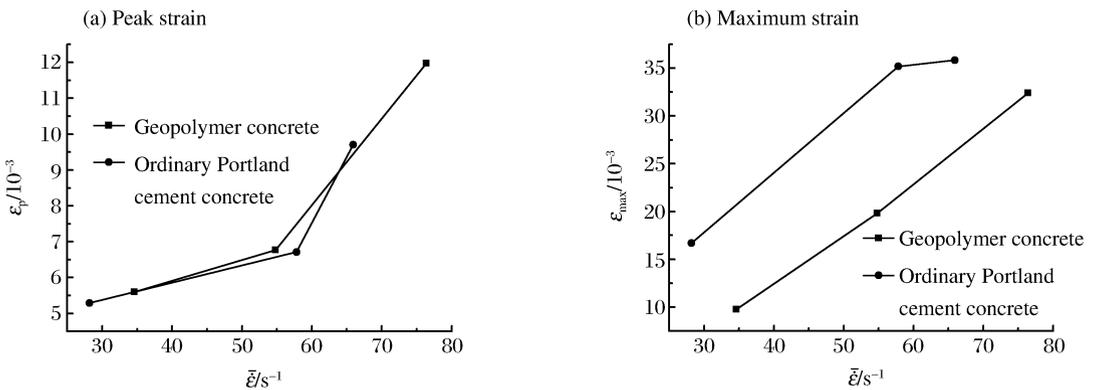


图 6 GC 和 PC 试件在 3 种不同平均应变率下的峰值应变 ϵ_p 和极限应变 ϵ_{max} 的对比

Fig. 6 Comparison of peak strains and maximum strains between geopolymer concrete and ordinary Portland cement concrete specimens at different average strain rates

3.2.3 GC 和 PC 试件比能量吸收的对比

图 7 为 GC 和 PC 试件在不同应变率下的比能量吸收的对比。由图 7 可以看到:GC 的比能量吸收表现出随平均应变率增加而增大的变化趋势,PC 的比能量吸收也表现出有类似的变化趋势,在相同的平均应变率下,GC 的比能量吸收小于 PC 的。

3.2.4 冲击力学特性分析

以上试验结果分析表明,地质聚合物混凝土作为一种新型混凝土类材料,具有较好的冲击压缩强度、变形和韧性;在冲击荷载作用下,其强度、变形和韧性均表现出明显的率敏感性,随平均应变率的增加而增强;相比于静态强度基本相当的普通硅酸盐水泥混凝土,冲击荷载下 GC 的强度和韧性较低,GC 和 PC 开始破坏时的变形基本相等,但 GC 完全破坏时的变形小于 PC 的。

从地质聚合物混凝土这种材料本身的角度来分析,它是地质聚合物为胶凝材料,加入骨料制备的,因而力学性能会受到地质聚物理化性能以及地质聚合物与骨料之间粘结性能的影响。

地质聚合物具有特殊的无机缩聚三维氧化物网络结构,微观结构和物理化学性能优于传统水泥,还具有快凝、高强、耐久性优良、可回收利用等优点,但地质聚合物也有脆性较大的缺点,需要通过加入高性能纤维等多种方式进行增韧改性^[18],地质聚合物特殊的微观结构以及良好的理化性能使得其与骨料之间具有优于水泥的更好的粘结性能(这一点在浇注试件时可观察到),因而地质聚合物混凝土的固有缺陷如微裂缝、孔隙等较少,内部结构致密。

地质聚合物混凝土受地质聚合物及其与骨料之间粘结性能的影响,具有较好的冲击压缩强度、变形和韧性;但由于地质聚合物的脆性较大,导致以地质聚合物为胶凝材料制备的地质聚合物混凝土的韧性相对较低;混凝土类材料在承受冲击荷载作用时,有一个明显的压密过程,由于压密的影响,导致混凝土的抗压强度增加,地质聚合物混凝土材料的固有缺陷,要少于利用传统水泥制备的 PC 的。对 PC 来说,内部缺陷较多,压密影响明显,抗压强度增幅较大;而对于内部结构致密、固有缺陷较少的 GC 来说,压密影响不大,产生了材料抗力的惯性效应,抗压强度增幅较小;此外,GC 静态抗压强度相对略小,这些综合导致冲击荷载下 GC 的抗压强度相对较低。

4 结 论

采用 $\varnothing 100$ mm SHPB 试验系统,研究了矿渣-粉煤灰基地质聚合物混凝土的冲击力学性能,主要结论如下:(1)GC 作为一种新型混凝土类材料,在冲击荷载作用下具有较好的强度、变形和韧性;(2)GC 是一种率敏感材料,冲击荷载作用下其抗压强度、变形和韧性随平均应变率的增加而增强;(3)与 PC 相比,冲击荷载下 GC 的抗压强度相对较小、韧性相对较低,GC 开始破坏时的变形与 PC 的基本相等,但 GC 完全破坏时的变形相对较小。

虽然从本文的试验结果来看,冲击荷载作用下 GC 的抗压强度和韧性相对较低,但 GC 作为一种新型混凝土类材料,具有较好的冲击力学性能,这一点是可以肯定的。通过调整 GC 的制备原料和配合比,可望得到静态强度更高的 GC 试件,冲击荷载下的抗压强度也将更高;针对 GC 韧性相对较低的特性,可借鉴陶瓷、水泥的改性方法,通过加入高性能纤维等手段进行增韧改性,以提高 GC 的韧性。目前,地质聚合物的增韧改性研究已取得了一定的成果,但关于 GC 增韧改性的研究少见报道,高强地质聚合物混凝土的制备研究以及地质聚合物混凝土的增韧改性研究将是下一步研究的重点之一。

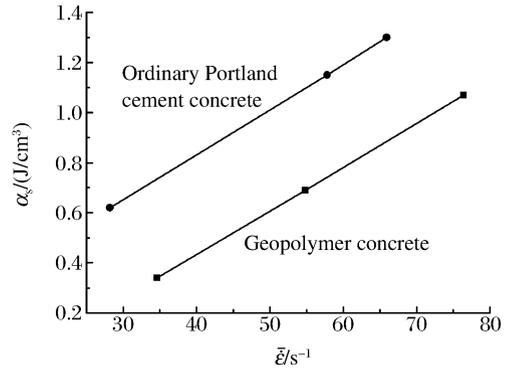


图 7 GC 和 PC 试件比能量吸收的对比

Fig. 7 Comparison of specific energy absorptions at different average strain rates

参考文献:

- [1] Davidovits J. Chemistry of geopolymeric systems, terminology[C]//Davidovits J, Davidovits R, James C. Proceedings of the Second International Conference on Geopolymer. Saint-Quentin, France: Geopolymer Institute, 1999:9-39.
- [2] Davidovits J. Geopolymers and geopolymeric materials[J]. Journal of Thermal Analysis, 1989,35(2):429-441.
- [3] 郑娟荣,覃维祖. 地聚物材料的研究进展[J]. 新型建筑材料,2002(4):11-12.
- [4] Chindaprasirt P, Chareerat T, Sirivivatnanon V. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer[J]. Cement and Concrete Composites, 2007,29(3):224-229.
- [5] Panias D, Giannopoulou I P, Perraki T. Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2007,301(1-3):246-254.
- [6] Van Deventer J S J, Provis J L, Duxson P, et al. Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007,139(3):506-513.
- [7] 马鸿文,凌发科,杨静,等. 利用钾长石尾矿制备矿物聚合材料的试验研究[J]. 中国地质大学学报,2002,27(5):576-583.
- MA Hong-wen, LING Fa-ke, YANG Jing, et al. Preparation of mineral polymer from potassium feldspar wastes: An experimental study[J]. Journal of China University of Geosciences, 2002,27(5):576-583.
- [8] ZHANG Yun-sheng, SUN Wei, CHEN Qian-li, et al. Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of slag based geopolymer[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007,143(1-2):206-213.
- [9] ZHANG Yun-sheng, SUN Wei. Fly ash based geopolymer concrete[J]. Indian Concrete Journal, 2006,80(1):20-24.
- [10] 王恩. 地质聚合物的制备及安全耐久性研究[D]. 北京:北京科技大学,2006.
- [11] 李海宏. 地质聚合物的制备及机理研究[D]. 陕西:西安建筑科技大学,2007.
- [12] 陈德兴,胡时胜,张守保,等. 大尺寸 Hopkinson 压杆及其应用[J]. 实验力学,2005,20(3):399-402.
- CHEN De-xing, HU Shi-sheng, ZHANG Shou-bao, et al. Large dimension Hopkinson pressure bar and its application[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005,20(3):399-402.
- [13] 李为民,许金余. 玄武岩纤维对混凝土的增强和增韧效应[J]. 硅酸盐学报,2008,36(4):476-481.
- LI Wei-min, XU Jin-yu. Strengthening and toughening in basalt fiber reinforced concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008,36(4):476-481.
- [14] 李为民,许金余,沈刘军,等. 玄武岩纤维混凝土的动态力学性能[J]. 复合材料学报,2008,25(2):134-142.
- LI Wei-min, XU Jin-yu, SHEN Liu-jun, et al. Dynamic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete using a split Hopkinson pressure bar[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008,25(2):134-142.
- [15] 李为民,许金余,沈刘军,等. $\varnothing 100$ mm SHPB 应力均匀及恒应变率加载试验技术研究[J]. 振动与冲击,2008,27(2):129-133.
- LI Wei-min, XU Jin-yu, SHEN Liu-jun, et al. Study for 100-mm-diameter SHPB techniques of dynamic stress equilibrium and nearly constant strain rate loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008,27(2):129-133.
- [16] Frew D J, Forrestal M J, Chen W. Pulse shaping techniques for testing elastic-plastic materials with a split Hopkinson pressure bar[J]. Experimental Mechanics, 2005,45(2):186-195.
- [17] 余同希,卢国兴. 材料与结构的能量吸收:耐撞性·包装·安全防护[M]. 华云龙,译. 北京:化学工业出版社,2006:209-212.
- [18] 张书政,龚克成. 地聚合物[J]. 材料科学与工程学报,2003,21(3):430-436.
- ZHANG Shu-zheng, GONG Ke-cheng. Geopolymer[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2003,21(3):430-436.

Impact mechanical properties of slag- and fly ash-based geopolymer concrete

FAN Fei-lin^{1*}, XU Jin-yu^{1,2}, LI Wei-min¹, YANG Jin-yong¹, ZHAI Yi¹

(1. *Department of Airfield and Building Engineering, Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, Shannxi, China;*

2. *College of Mechanics and Civil Architecture, Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, Shannxi, China*)

Abstract: The slag- and fly ash-based geopolymer concrete (GC) specimens were prepared by sodium silicate and sodium hydroxide alkali-activated slag and fly ash, the ordinary Portland cement concrete (PC) specimens were prepared by Portland cement, the 28-day-static compressive strengths of the GC and PC were 56.4 and 61.6 MPa, respectively. Impact compressive experiments were carried out on the GC and PC specimens, respectively, by using a 100-mm-diameter split Hopkinson pressure bar (SHPB) device. The dynamic stress-strain curves in the average strain rate range of 0 to 100 s⁻¹ for these two materials were obtained experimentally. These stress-strain curves were compared to explore the dynamic mechanics properties of the GC. The GC takes on favorable impact compressive strength, deformation performance and toughness under impact load. The GC exhibits rate sensitivity, its dynamic compressive strength, deformation performance and toughness increases with the increase of strain rate under impact load. The impact compressive strength and toughness of the GC are less than those of the PC, the deformation of the GC before the specimens start breaking is approximate to that of the PC, while the deformation of the GC after the specimens break completely is less than that of the PC.

Key words: solid mechanics; impact mechanical properties; SHPB experiment; geopolymer concrete; strain rate

* Corresponding author: FAN Fei-lin

E-mail address: fanfeilin@163.com

(责任编辑 张凌云)

第十一届全国岩石动力学学术会议暨工程安全与防护专题研讨会会议报道

2009年8月12~14日本次会议在绵阳举行,由中国岩石力学与工程学会岩石动力学专委会和工程安全与防护分会联合主办,西南科技大学承办,会议主题为“强地震作用下岩石工程安全与防护”,有150余人出席会议。

大会由罗学刚教授主持,肖正学教授致欢迎词,李海波研究员致开幕词。大会特邀郑颖人院士、周丰峻院士、林俊德院士、黄润秋教授、韦昌富研究员作特邀报告,王明洋教授等20多名学者作大会报告。大会讨论热烈,学术气氛浓厚。

大会共征文112篇,经评审择优有25篇文章刊登在《岩石力学与工程学报》上,有40多篇发表在《岩土力学》上。经大会评审,严鹏等5位青年学者的论文获优秀论文奖。

大会代表考察了5·12汶川特大地震北川地震遗址,探讨地震破坏效应,共商防震减灾大业。

大会期间,岩石动力学委员会、工程安全与防护分会分别召开了会议;部分两会领导出席了《爆炸与冲击》编辑部茶话会。

(黄理兴提供)