

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.03.023

硅酸盐混凝土与岩石材料的动态力学性能比较研究

夏正兵

(江苏城市职业学院 建筑工程学院, 江苏 南通 226000)

摘要: 通过采用 SHPB(分离式霍普金森压杆)装置对混凝土和岩石进行了五种不同应变率下的动态压缩实验,由此得出两种材料的基本动态力学参数,从而进一步归纳出这两种材料的动态抗压强度、峰值应变与应变率的关系,并引入比能量吸收对材料的动态破坏机制进行研究,明确两种材料的动态破坏机制,这为今后的相关工程有序开展提供了丰富的理论指导,在保障工程顺利进行的同时,最大限度的提高了工作效率。

关键词: 混凝土;岩石;动态力学性能;分离式霍普金森压杆(SHPB)

中图分类号: TU502.6

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2016)03—0124—04

Dynamic Mechanical Performance Comparison Between Silicate Concrete and Rock

XIA Zhengbing

(College of Architecture and Civil Engineering, Jiangsu City Vocational College, Nantong, Jiangsu 226000, China)

Abstract: To compare dynamic mechanical performance of silicate concrete and rock, this study performed dynamic compression test with five different strain rates on concrete and rock using Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) to obtain basic dynamic mechanical parameters of them and then summarized the relationship of dynamic compressive strength, peak strain and strain rate of two materials. Moreover, specific energy absorption was introduced to confirm dynamic damage mechanisms of concrete and rock materials. This work can not only help to improve the working efficiency to the largest extent but also ensure the smooth development of engineering, providing rich theoretical guidance for development of related engineering in the future.

Keywords: concrete; rock; dynamic mechanical performance; SHPB

对岩石类材料进行动态力学的相关特性研究是很多建筑领域研究机构的研究方向,这些研究在岩石力学学科中是基础性的研究,属基础研究分支。追根溯源,它起源于我国相关机构对涉密的原子能设施的安全防护和我国地震领域的相关理论研究^[1]。我国近十年来,建筑房地产开发火热,建筑工程施工方面,处处都是高层建筑,这些房屋会频繁遇到岩石类相关材料,再比如我国大型能源水电工程、核设施工程、高铁工程、高速公路等相关基础设施建设迅猛发展,这些工程基本都会涉及爆破施工,或是日常生活中桥梁及机场跑道设计、水坝建设等各种设施建设工程都涉及到岩石类材料在中高应变荷载

作用下的动态力学性能^[2]。为了保障这些工程的顺利开展,越来越多的专家学者对岩石类材料动态力学的特性进行了细致的研究。岩石类材料的静力学研究比较简单,动力学相关问题的研究工作很复杂,需要克服的困难也更加严峻,仅仅从力学分析的角度来讲,其需要具有的物理、化学及数学知识理论就要复杂的多^[3]。因此,到目前为止,我国岩石类材料的动力学研究方面尚处于不成熟的阶段,甚至很多相关研究领域还在起步过程中。而在岩石类材料之中,混凝土材料与岩石类材料是最为常见的两种材质,在建设工程施工的实践中,常常会遇到混凝土材料与岩石类材料相结合使用的情况,例如高铁工程、

收稿日期:2016-02-02

修稿日期:2016-04-04

基金项目:江苏省九三学社科技创新基金项目(YHK1408);江苏省江豪专项资助基金项目(1503)

作者简介:夏正兵(1982—),男,江苏建湖人,硕士,主要从事建筑设备与混凝土材料方面的研究工作。E-mail:109779577@qq.com

隧道设施建设工程、煤矿开采、矿山开发等,为了较好的满足实际工程的需要,更好地实施国家相关重点项目,其关键在于对比研究混凝土和岩石类脆性材料的力学性质^[4]。至今,国内外相关专家主要研究的重点一直放在混凝土和岩石类材料的静力学特性研究方面^[5-6],对于两种材料的动力学相关特性的研究很少。通过相关文献检索,发现也有个别学者对动力学特性进行过简单的研究,但是科学系统地将两类材料充分结合起来并做动力学特性研究的文献几乎没有。本文为了彻底分析两种材料的动态破坏的机制,将通过冲击荷载下的力学性能实验来研究并对相关数据进行科学有效的分析,旨在为建设工程中实际结构承受的相关动荷载研究提供科学的理论依据。

1 岩石类材料的动力特性概述

岩石类材料的动力学特性研究主要包括三大方面:(1) 动力输入;(2) 材料的动态力学特性研究;(3) 岩石类材料的动态响应研究^[7]。随着我国科学研究设备的迅猛发展,出现了很多新型的岩石材料研究设备,同时也出现了很多新技术新方法,另外伴随着动力学理论研究的不断进步,在结构动力学研究中,建立一个模型并进行实验已经成为常态。通过一个力学实验就能将相关影响因素在结构中的状态模拟出来,这样就可以将结构在工程中的实际状态完整的通过实验表达出来,进而结合理论进行理

论分析,该方法使得岩石类材料研究发展迅速。除此之外,另外两方面(材料的动力输入和材料动态力学特性)的研究进展缓慢,多年无实质进展,而且相关的研究深度非常不够,基础性工作不牢,亟待改进。

众所周知,材料的动态力学特性研究,必须对材料动态性能的应变率进行相关的实验研究。根据文献研究,并通过对岩石类材料静态与动态实验结果进行分析^[8-9],得出材料性能与材料的应变率关系紧密,这点在建筑材料的研究专家学者中已经得到了普遍的认可。但目前的情况是,材料的应变率对材料的性能到底具体有多大的影响,有没有规律性以及有什么规律性,以上这些问题都未在学术界得到统一的共识,而且已有的相关研究都仅仅停留在某一个问题上,只是对材料强度的影响进行了研究,比如应变率对材料变形特性、动态断裂特性和材料微结构特性的影响等^[10],研究范围有很大的局限性。

2 混凝土与岩石材料动态力学性能对比实验

2.1 相关研究原材料

混凝土材料有6种,本实验采用普通硅酸盐混凝土,材料组分有粗骨料、细骨料及相关添加剂,具体如下:自来水、普通硅酸盐水泥、中砂、粉煤灰、硅灰、碎石和添加剂(减水剂),相关配合比见表1。

表1 普通硅酸盐混凝土的材料配合比

单位: kg/m³

水量	水泥量	煤炭灰量	硅灰量	碎石量	砂量	减水剂量
175	360	110	20	650	1000	4

岩石类材料是江苏徐州一矿山开采工地中的一种天然未风化的岩石,该材料是在矿山施工过程中现场提取的,该岩石类材料的主要成分有石英、方解

石,另外还包括斜长石、钾长石、伊利石、绿泥石、蒙脱石等,呈灰白色,相关矿物的材料组成见表2。

表2 岩石矿物成分组成

矿物成分	石英	方解石	斜长石	钾长石	伊利石	绿泥石	蒙脱石	其它
含量/%	50	30	7	6	1	1	2	3

2.2 实验相关设备及方法

Φ100mmSHPB装置的组成主要有三部分,分别为主体设备、能源系统和相应的测试系统,该设备是进行动态压缩实验时候的主要仪器^[11]。而硅酸盐混凝土和岩石两种材料的试样还需要经过相应的几道专业处理流程,也就是说需要经过加工而成,ZS—

100型自动岩石取芯机是岩石类材料、混凝土材料、水泥浆材料等取样所必备的一种设备,是实验室研究中制取标样的第一道工序,首先运用该机器进行钻芯并取样,然后使用DQ-1型全自动岩石切割机(本机主要适用于石油、冶金、地质、勘探、煤炭及主要耐米器材作切割设备^[12]。相关的技术参数:刀片

直径:450 mm,600 mm;切割范围刀片:450 mm,160 mm×160 mm×350 mm;刀片:600 mm,220 mm×220 mm×380 mm;主电机功率:2.2 kW;纵向电机功率:0.75 kW)切割,最后再使用 SHM-200 型双端面磨石机,对相关材料进行端面打磨,这样就完成了取样工作。最后结合 SHPB 动态压缩实验的国内外相关参考文献,选用长径比为 1:1.5,大小为 $\Phi 100$ mm×40 mm 的圆柱体试件进行对比实验,对混凝土与岩石这两种材料,笔者设计了 5 种不同的试块并对其

施加相应的冲击荷载,每种冲击荷载都有相对应的应变率,在相同的应变率下,又分别做 3 次相同的实验,最后各组实验数据进行对比并筛选出最合理的一组数据进行最终的分析^[13]。

2.3 实验结果

表 3、表 4 分别是混凝土和岩石在五种不同应变率等级下的冲击实验结果,两者所对应的动态破坏形态如图 1 和图 2 所示(其中两种材料的破坏形态按应变率大小从小到大排列)。

表 3 混凝土的 SHPB 实验结果

试件编号	整形器直径/mm	打击速度/(m·s ⁻¹)	应变率 $\bar{\epsilon}$ /s ⁻¹	动态抗压强度 $f_{c,d}$ /MPa	峰值应变 ϵ_p /10 ⁻³	比能量吸收 E_{sea} /(kJ·m ⁻³)	试件破坏形态
A1	20	5.00	40.00	76.00	6.10	555.90	块状碎裂
B1	22	6.00	60.00	84.00	6.55	827.60	块状碎裂
C1	25	7.00	86.00	95.00	7.15	1174.40	严重碎裂
D1	27	8.00	95.00	107.00	7.22	1344.67	严重碎裂
E1	30	9.00	125.00	130.00	8.62	1558.64	严重碎裂

表 4 岩石的 SHPB 实验结果

试件编号	整形器直径/mm	打击速度/(m·s ⁻¹)	应变率 $\bar{\epsilon}$ /s ⁻¹	动态抗压强度 $f_{c,d}$ /MPa	峰值应变 ϵ_p /10 ⁻³	比能量吸收 E_{sea} /(kJ·m ⁻³)	试件破坏形态
A2	30	10.00	93.10	173.00	18.33	1059.86	大块留芯
B2	33	11.00	123.50	179.00	19.15	2490.34	中块留芯
C2	35	12.00	135.20	203.00	19.55	2830.45	小块留芯
D2	40	13.00	154.90	218.90	20.57	3050.47	块状碎裂
E2	45	14.00	165.00	226.70	21.75	3320.22	严重碎裂

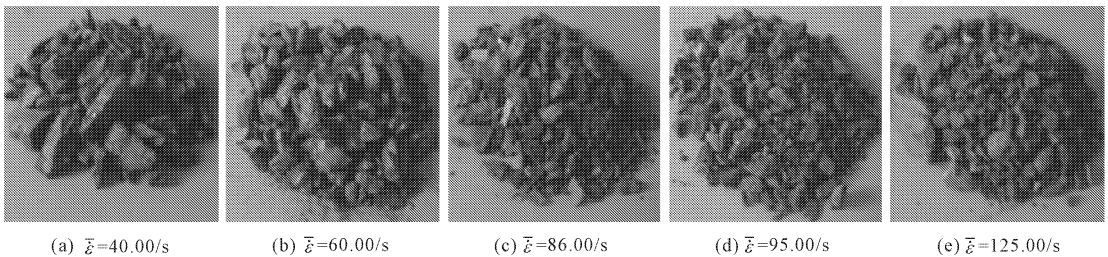


图 1 混凝土试件的破坏形态

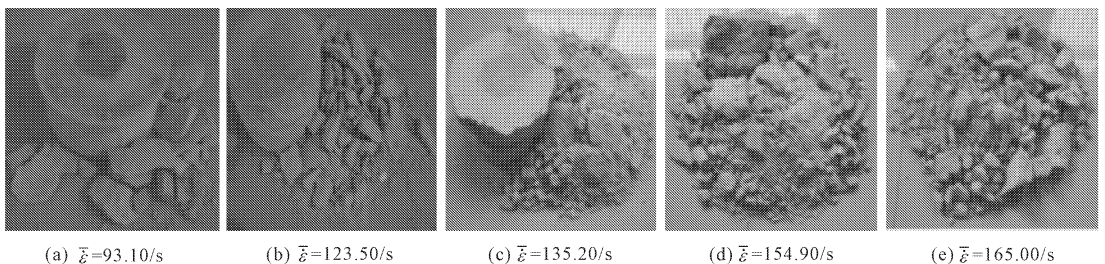


图 2 岩石试件的破坏形态

2.4 结果分析

根据表 3 和表 4 的数据可明显的发现:这两类

材料的共性是动态力学性能都与其应变率密切相关,可以看出这两类材料的动态抗压强度与其应变

率成正比,几乎成一次函数直线关系,另外,应变率一定的情况下,岩石的动态抗压强度明显高于混凝土,根据数率统计的方法对相关数据进行线性回归处理,得出相关理论公式^[14]:(C 表示混凝土, S 表示岩石类材料, R^2 为相关系数)

$$\begin{cases} f_{c,a}(C) = 48.40 + 0.54 \bar{\epsilon} & R^2 = 0.95067 \\ f_{c,a}(S) = 96.56 + 0.79 \bar{\epsilon} & R^2 = 0.87914 \end{cases} \quad (1)$$

对上述公式进行对比分析,可得混凝土的动态抗压强度随应变率的变化比岩石材料迟缓,没有岩石类材料明显。

混凝土与岩石类材料在相关冲击荷载的作用下,峰值应变与应变率的变化关系,由表3、表4可以看出,两类材料的峰值应变与应变率成正比,并且可以看出相对应的关系应该是一种二次对应的关系,根据数率统计的方法对相关数据进行线性回归处理,得出相关理论公式:(C 代表混凝土材料, S 代表岩石类材料, R^2 为相关系数):

$$\begin{cases} \epsilon_p(C) = 6.60 - 0.019 \bar{\epsilon} + 2.76 \times 10^{-4} \bar{\epsilon}^2 \\ R^2 = 0.99756 \\ \epsilon_p(S) = 23.37 - 0.108 \bar{\epsilon} + 5.87 \times 10^{-4} \bar{\epsilon}^2 \\ R^2 = 0.96554 \end{cases} \quad (2)$$

分析可得,混凝土和岩石材料在承受冲击荷载时,会发生相应的形态变化,其变化程度与应变率呈正相关,即峰值应变随着应变率增大而增大。

3 动态破坏机制分析

由图1和图2可以发现,两类材料在冲击荷载下的破坏形态差异很大,对于混凝土材料(图1)在受到冲击荷载的时候,与该材料的应变率高低无关,被破坏成的形状基本都是比较均匀的块状,相反,岩石类材料(图2)的破坏形态表现不同,在不同的应变率的作用下,有截然不同的表现,承受低应变率的冲击荷载时,岩石试样有较大留芯,破碎后成大块,而在高应变率条件下则被严重破坏,大部分呈小碎块,其余为粉末状^[15]。为了充分说明两种材料的破坏机理,笔者认为可以运用比能量吸收来对相应的材料韧性进行研究比较能说明问题,比能量吸收代表的含义是:单位体积的相关实验材料试样在破坏过程中吸收应力波能量的大小。

可以明显得出结论:混凝土与岩石材料的比能量吸收与其应变率成正比,为一次性函数关系,得出相关理论公式:(C 代表混凝土材料, S 代表岩石类材料, R^2 为相关系数):

$$\begin{cases} E_{\text{sea}}(C) = 95.28 + 13.10 \bar{\epsilon} & R^2 = 0.96732 \\ E_{\text{sea}}(S) = -1482.34 + 29.80 \bar{\epsilon} & R^2 = 0.88972 \end{cases} \quad (3)$$

通过上述研究发现,在应变率一定的条件下,岩石类的材料能量吸收特性比混凝土材料要明显高出很多。同时还发现,随着应变率的不断增大,混凝土的比能量吸收的变化与岩石类材料相比不明显(斜率低)。从混凝土材料与岩石类材料的动态破坏形态来看,可以看出其破坏的形态与比能量吸收值的关系也相当紧密,成一次函数的正比关系,即随着比能量吸收值的变大,动态破坏的程度就越明显,而且破碎之后的碎块就越小。

研究可进一步得出如下结论:混凝土和岩石类相关材料的动态破坏机制是一致的,相关材料在吸收一定的冲击荷载能量后的一个破碎过程,材料吸收的能量与其破坏程度成正比,即能量越大,破坏程度就越严重,破坏后的粒径会越小。众所周知,两种材料的能量吸收性质都是由材料自身的情况决定的,一般岩石类材料的能量吸收特性都比混凝土材料强很多。

4 结论

根据本文的实验结果可以归纳总结为以下三点:

(1) 混凝土和岩石类材料的动态力学性能与应变率关系密切,材料动态抗压强度与应变率都成正比关系,后者变大,前者也相应变大,材料的峰值应变与应变率成正比,并且可以看出相对应的关系应该是一种二次对应的关系。

(2) 混凝土和岩石类材料的材料的动态抗压强度与应变率是一次线性关系,峰值应变与应变率是二次关系,混凝土材料的对应关系比岩石类材料的对应关系要强的多。

(3) 实验发现,这两类材料的动态破坏机制的实质是材料产生的一个动态失稳过程(吸收冲击荷载能量后),其变化规律是破坏程度与吸收能量的增大成正比,能量越大,破坏越大,而能量吸收性质的强弱往往取决与材料本身的特性以及其应变率。

通过上述三点结论,可以初步推断出混凝土比岩石类脆性材料更适用于充当建筑材料,但在相关工程建设的开展过程中,对于材料的选择还是会受到多因素的影响,因此施工材料的选用还是需要秉承“因地制宜”的原则。

参考文献:

- [1] 黄理兴. 岩石动力学研究成就与趋势[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 2889-2900.
- [2] 洪 亮, 李夕兵, 马春德, 等. 岩石动态强度及其应变率灵敏性尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 526-533.
- [3] 许金余, 李为民, 范飞林, 等. 碳纤维增强地聚合物混凝土的 SHPB 实验研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(4): 66-69.
- [4] 武建华, 于海祥, 李 强, 等. 定围压比作用下混凝土轴向受压性能实验研究[J]. 实验力学, 2007, 22(2): 142-148.
- [5] 支乐鹏, 许金余, 刘军忠, 等. 基于 SHPB 实验下两种岩石的动态力学性能研究[J]. 四川建筑科学研究, 2012, 38(4): 111-114.
- [6] 焦楚杰, 孙 伟, 高培正. 钢纤维超强混凝土抗爆炸研究[J]. 工程力学, 2008, 25(3): 158-166.
- [7] 许金余, 刘 石. 大理岩冲击加载实验碎块的分形特征研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3225-3229.
- [8] 邵明申, 李 黎, 李最雄. 龙游石窟岩石在不同含水状态下的弹性波速与力学性能[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 3514-3518.
- [9] 黄志平, 唐春安, 赵 文. 不同轴向应力下瞬态卸载诱发岩爆破坏数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(6): 859-863.
- [10] 王思敬. 论岩石的地质本质性及其岩石力学演绎[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 433-450.
- [11] 曹擎宇, 孙 伟, 赵 勇, 等. 纤维素纤维混凝土性能及在二次衬砌中的应用[J]. 铁道学报, 2012, 34(7): 103-107.
- [12] 陈 猛, 白 帅, 张海鹏, 等. 混杂纤维混凝土抗压和抗拉性能实验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(10): 113-117.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规范: JGJ55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [14] 陈树建, 翟爱良, 赵爱华, 等. 含水率对再生砖骨料混凝土力学性能影响规律实验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(4): 21-23.
- [15] 姬小祥, 张 帆, 邵景干. 不同类型钢纤维混凝土力学性能室内实验分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(5): 168-172.