

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.063

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



双轴受压状态下混凝土动态抗压特性试验研究

夏伟¹, 许金余^{1,2}, 冷冰林³, 孟博旭¹, 王腾蛟¹, 刘高杰¹

(1. 空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038; 2. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 西安 710072;
3. 南部战区空军保障部, 广州 510000)

摘要: 由于多轴试验装置的高技术性, 混凝土在复杂应力状态下的动力研究相对偏少。为研究双轴受压状态下混凝土的动态抗压特性, 采用真三轴静动综合加载试验系统, 进行了5种双轴受压状态下混凝土立方体试件的冲击压缩试验, 分别从应力-应变曲线特征、强度特性和变形特性等方面分析双轴受压状态对混凝土动力响应的影响规律。结果表明: 双轴受压状态下, 混凝土承受冲击荷载时呈现典型的脆性破坏, 应力-应变曲线初期无明显压实挤密阶段; 主轴压比一定时, 随单侧压比的增大, 混凝土的动态抗压强度呈现出先升高后降低的趋势, 峰值应变和平均应变率皆呈现出先减小后增大的趋势; 双轴受压对混凝土有加固约束作用, 因而提高了其动态抗压强度和抗变形能力, 主轴压比: 单侧压比为0.4:0.4时作用效果最佳。

关键词: 混凝土; 双轴受压; 应力-应变曲线; 动态抗压强度; 冲击压缩变形

中图分类号: TU502 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2021)02-0130-08

Experimental study on dynamic compressive properties of concrete under biaxial compression

XIA Wei¹, XU Jinyu^{1,2}, LENG Binglin³, MENG Boxu¹, WANG Tengjiao¹, LIU Gaojie¹

(1. School of Aeronautical Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, P. R. China; 2. College of Mechanics and Civil Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China; 3. Air Force Support Department of Southern Theater Command, Guangzhou 510000, P. R. China)

Abstract: Due to the high technicality of the multi-axial test equipment, the dynamic research of concrete under complex stress condition is relatively less. In order to study the dynamic compressive properties of concrete under biaxial compression, the impact compression tests of concrete cube specimens under five types of biaxial compression conditions were carried out by using the true triaxial static and dynamic comprehensive loading test system. The effects of biaxial compression on the dynamic response of concrete are analyzed from the aspects of stress-strain curve characteristics, strength characteristics and deformation characteristics. The results show that: under biaxial compression, the concrete exhibits typical brittle failure when subjected to impact load, and there is no obvious compaction stage in the initial stage of the stress-strain curve; when the spindle pressure ratio is fixed, with the increase of the unilateral pressure

收稿日期: 2020-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(51208507, 51378497)

作者简介: 夏伟(1996-), 主要从事防护工程材料研究, E-mail: xiaweiafeui@163.com。

许金余(通信作者), 教授, 博士生导师, E-mail: xujinyuafeu@163.com。

Received: 2020-03-16

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51208507, 51378497)

Author brief: XIA Wei (1996-), main research interest: protective engineering materials, E-mail: xiaweiafeui@163.com.

XU Jinyu (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xujinyuafeu@163.com.

ratio, the dynamic compressive strength of concrete shows a trend of first increasing and then decreasing, and the peak strain and average strain rate show a trend of first decreasing and then increasing; biaxial compression has the effect of reinforcement and restraint on concrete, which improves its dynamic compressive strength and deformation resistance. When the ratio of spindle pressure ratio to unilateral pressure ratio is 0.4:0.4, the effect is the best.

Keywords: concrete; biaxial compression; stress-strain curve; dynamic compressive strength; impact compression deformation

无论民用建筑工程还是军事防护工程,多为钢筋混凝土结构,此类结构不仅要满足自身设计荷载(即结构自重、人、物等外界荷载产生的静载)的要求,往往还要经受碰撞、爆炸冲击等动力作用。近年来,地震、强风等大型自然灾害以及恐怖主义爆炸事件时有发生,导致民用混凝土结构遭受动态荷载破坏的可能性大大增加^[1];军事混凝土防护结构也越来越受到航弹爆炸、武器侵彻等强烈冲击荷载的威胁^[2]。为减少人员伤亡和经济损失,更好地保护物资装备,相关学者针对混凝土的动态力学性能,展开大量试验研究和理论分析,取得了许多有价值的成果。Tai^[3]研究了不同加载速率下混凝土的单轴动态力学性能,发现混凝土具有明显的速率依赖性力学行为;王怀亮等^[4]研究拉伸和压缩动荷载下混凝土的单轴力学性能,测得完整的混凝土单轴动态拉伸和压缩应力-应变曲线;Sun等^[5]通过对混凝土进行单轴动态压缩试验,发现抗压强度和弹性模量随应变率表现出正相关性;吴彬等^[6]对混凝土分别开展应变速率为 10^{-5} 、 10^{-4} 、 10^{-3} s^{-1} 的双向动态压缩试验,发现双向受压下其抗压强度较单轴应力状态时得到增强;刘鹏^[7]进行了混凝土的单轴动态加载、定侧压双轴加载和双轴比例加载试验,提出不同应变率下混凝土动态抗压强度的表达式;程卓群等^[8]进行了不同侧压力下混凝土的动态抗压试验,并利用K-G准则建立了混凝土动态双轴受压破坏准则。相关学者针对混凝土单轴动态力学性能的研究已经比较成熟,而由于多轴试验装置的高技术性、难操作性,目前,有关混凝土在多轴受力状态下的力学性能研究仍存在一些不足,大多以静力研究为主^[9-12],动力研究相对偏少且加载速率较低。在工程实践中,钢筋混凝土结构中的梁、柱、板等基本构件相互连接、相互约束,使得混凝土在大多数工况下处于复杂受力状态^[13-15],如简支梁的截面受弯矩和剪力作用,处于双轴应力状态;另一方面,军事混凝土防护工程多为地下建筑结构,如飞机洞库、地下指挥所、地下油库等,此类结构因承受围岩压力作用,常处于多轴受力状态。此时,

混凝土的各项动态力学性能指标较单轴受力状态下有明显差别,应用单轴强度理论进行结构安全性设计存在不足,甚至偏于危险。因此,为了更加接近实际工况,有必要针对多轴受力状态下混凝土的动态力学性能进行深入研究。

笔者利用真三轴静动综合加载试验系统,对边长为70.7 mm的混凝土立方体试件进行5种双轴受压状态下的冲击压缩试验,研究了动态荷载一定时双轴受压对混凝土动态抗压强度和冲击压缩变形的影响规律,为混凝土材料在民用建筑工程和军事防护工程中能够得到更加安全合理地应用提供理论依据。

1 试验

1.1 试验材料

试验所用混凝土为普通混凝土,各组分具体性能和成分:水泥选用陕西尧柏水泥厂生产的普通硅酸盐水泥(P·O),强度等级为42.5,其化学组成及主要性能指标如表1、表2所示。采用灞河天然中砂,经水洗晾干后使用,砂的主要技术指标见表3。石子选用泾阳县石灰岩碎石(5~12 mm,30%;12~22 mm,70%)。拌合水选用符合检测标准的自来水。减水剂使用山东辉煌新型建材有限公司生产的JKPCA-02型聚羧基高效减水剂,掺量1%,减水率20%。试验所用混凝土配合比依据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)设计,如表4所示。

表1 水泥的化学组成

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	烧失量	碱含量
22.13	62.45	5.34	4.63	2.31	1.40	1.44	0.30

表2 水泥的主要性能指标

初凝时间/min	终凝时间/min	安定性	细度/%	28 d 抗压强度/MPa	28 d 抗折强度/MPa
60	264	合格	1.6	48.6	8.9

表 3 砂的主要技术指标

Table 3 Main technical indexes of sand

表观密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	堆积密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	细度模数	含泥量/%	级配
2 630	1 500	2.7	1.3	合格

表 4 混凝土配合比

Table 4 Concrete mix ratio (kg/m^3)

水泥	砂	碎石	水	减水剂
318	677	1 314	137	3.81

1.2 试件制备

采用尺寸为 $70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm}$ 的混凝土立方体试件。先根据表 4 所示配合比将搅拌完毕的拌合料装在预先除尘的塑料模具中,插捣均匀后放置于振动台上振捣密实,期间进行人工插捣抹匀;然后将混凝土试件移置室内静置 24 h 后脱模,标准养护 28 d,制得的混凝土抗压试件形貌如图 1 所示。为保证试验结果准确可靠,按照标准试验方法,进行 3 次静态抗压强度试验,取平均值后测得试件的实际单轴抗压强度 $f_c = 54.38 \text{ MPa}$ 。



图 1 混凝土抗压试件形貌

Fig. 1 Appearance of concrete compression test piece

1.3 试验设备

试验采用洛阳腾阳机械科技有限公司与空军工程大学联合开发的真三轴静动综合加载试验系统(系统结构如图 2 所示)进行,该系统不仅可以测试多轴受压条件下混凝土材料的静态力学性能,还可以实现高应变率下混凝土材料的多轴受压动力试验,主要由静力加载系统和动力加载系统两部分组成。静力加载系统(真三轴试验机,如图 3 所示)通过电子系统控制,既可以进行 3 个垂直方向的独立加载、卸载以及复杂路径的试验,还可以任意设置各个方向的加载大小和加载速率,能够实现混凝土材料的真三轴压缩试验。动力加载系统(如图 4 所示)以分离式霍普金森压杆(SHPB)^[16-18]试验装置为基础,其主体试验设备主要由驱动发射装置、子弹、入射杆、透射杆、吸收杆等部分组成;动力系统是通过

压缩气体产生的高压为子弹提供动力,以实现不同高应变率下的动力试验,主要由空压机、大气包(储气罐)以及气体通道组成;数据采集系统包括速度采集系统和应变采集系统。



图 2 真三轴静动综合加载试验系统

Fig. 2 True triaxial static and dynamic comprehensive loading experimental system



图 3 静力加载系统

Fig. 3 Static loading system

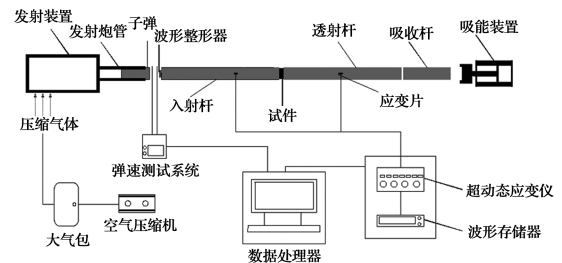


图 4 动力加载系统工作过程示意

Fig. 4 The working process of the dynamic loading system

1.4 试验方法

试验采用双轴静动组合加载方式^[19-20],加载模型如图 5 所示。试验过程中控制试件主轴(X 方向)预静载 P_1 恒为 $0.4f_c$ (混凝土应力在弹性极限附近,与实际工况相符合),依次改变单侧轴(Y 方向)预静载 P_2 (分别为 $0, 0.2f_c, 0.4f_c, 0.6f_c, 0.8f_c$)。为便于试验结果分析,定义主轴向预静载、单侧向预静载与混凝土实际单轴抗压强度之比分别为主轴压比和单侧压比,通过主轴压比:单侧压比这一参数来反映混凝土试件所处的双轴受压状态(试验中主轴压比:单侧压比分别为: $0.4:0, 0.4:0.2, 0.4:0.4, 0.4:0.6, 0.4:0.8$;后文简写为单侧压比)。试验分

4 个步骤完成:

1)以静态压缩试验测得的混凝土实际单轴抗压强度 f_c 为参考标准,确定主轴向预静载并设计不同的单侧向预静载水平;

2)在试件表面均匀涂抹黄油后,将其安置在真三轴试验机的加载板间,并在各加载面与加载板之间增设减摩垫层,根据试验需要分别在试件的主轴向和单侧向以 3 MPa/min 的速率施加预静载 P_1 、 P_2 ;

3)通过 SHPB 动力加载系统中的空气压缩机以 0.35 MPa 的气压推动子弹撞入射杆,从而对处于双轴受压状态下的试件施加冲击荷载 P_d (加载速率约为 12.5 m/s),使试件在冲击作用下发生破坏;

4)为保证试验精度,每种受压状态下至少进行 3 次冲击试验,所得试验数据采用“三波法”处理后如表 5 所示。

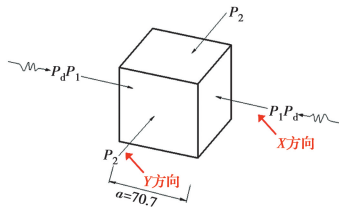


图 5 双轴静动组合加载模型

Fig. 5 Biaxial static and dynamic combined loading model

表 5 混凝土试件在 X 方向冲击荷载作用下的试验结果

Table 5 Test results of concrete specimens under X-direction impact load

主轴压比: 单侧压比	试件	峰值应力/ MPa	峰值应变/ 10^{-3}	动态强度 增强因子	平均应 变率/ s^{-1}
0.4:0	1#	161.49	4.58	2.97	59.32
	2#	160.06	4.54	2.94	58.28
	3#	146.69	4.53	2.69	55.81
	平均值	156.08	4.55	2.87	57.80
0.4:0.2	1#	174.95	3.94	3.22	49.13
	2#	178.49	3.95	3.28	52.81
	3#	185.01	3.99	3.41	49.23
	平均值	179.48	3.96	3.31	50.39
0.4:0.4	1#	203.43	2.65	3.74	38.69
	2#	216.36	2.70	3.98	41.79
	3#	211.35	2.72	3.88	41.96
	平均值	210.38	2.69	3.87	40.81
0.4:0.6	1#	181.72	3.52	3.35	52.47
	2#	184.76	3.46	3.40	58.23
	3#	183.66	3.49	3.38	56.61
	平均值	183.38	3.49	3.38	55.77

续表 5

主轴压比: 单侧压比	试件	峰值应力/ MPa	峰值应变/ 10^{-3}	动态强度 增强因子	平均应 变率/ s^{-1}
0.4:0.8	1#	157.61	4.14	2.90	63.23
	2#	157.45	4.15	2.89	62.03
	3#	161.40	4.13	2.97	65.54
	平均值	158.82	4.14	2.92	63.60

2 试验结果与分析

2.1 应力-应变曲线分析

应力-应变曲线记录的是动载作用下混凝土的性能变化特征,不考虑双向预静载施加过程对其产生的影响,测得主轴方向的混凝土力学性能随双轴受压状态变化的规律如图 6 所示,为平均值曲线;图 7 为单侧压比为 0.2 和 0.4 时混凝土试件双轴动态抗压应力-应变关系曲线。

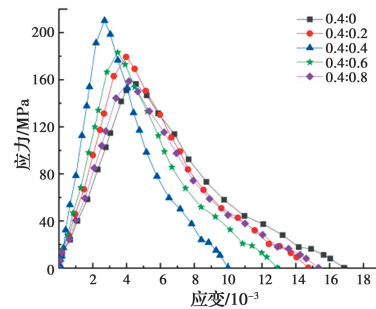


图 6 不同单侧压比条件下混凝土的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of concrete under different unilateral pressure ratios

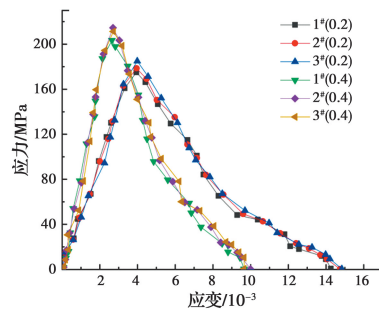


图 7 部分混凝土试件的双轴动态抗压应力-应变曲线

Fig. 7 Biaxial dynamic compressive stress-strain curve of some concrete specimens

从图 6 中可以看出,在不同单侧压比条件下,混凝土承受冲击荷载时的应力-应变曲线变化走势均包括明显的上升段和下降段,峰值应力附近未出现平台段,混凝土达到破坏强度后,随着应变的继续增

大随即失去承载能力,说明其破坏形式为典型的脆性破坏;曲线初期近似为直线,接近破坏应力时,曲线表现为非线性。这是由于预静载的存在,使混凝土内部的孔隙和裂缝在一定程度上被压实挤密,从而在冲击加载初期,曲线直接进入线弹性变形阶段。各曲线斜率差异较大,在单轴受压状态(侧压为 0)下,曲线斜率低于双轴受压状态下的结果,且曲线峰值点最低,应力峰值点处对应的应变值最大;在双轴受压状态下,单侧压比从 0 增至 0.4,应力-应变曲线整体左倾,曲线逐渐细高,脆性材料特征明显,单侧压比从 0.4 增至 0.8,曲线整体右倾,上升段和下降段斜率皆逐渐减小;单侧压比为 0.4 时,应力-应变曲线初期陡直,峰值点达到最高,单侧压比为 0.8 时,曲线峰值点较单轴受压状态下略高。可认为单侧压比为 0.4 是应力-应变曲线发生显著变化的临界点,单侧压比对混凝土的应力-应变曲线特征具有双重作用,既可强化混凝土的脆性材料特征,亦可增加其塑性材料特征,但相对于无侧压条件,作用效果是唯一的。

2.2 强度特性分析

动态抗压强度是混凝土在冲击荷载作用下发生破坏时的极限强度,用峰值应力表示。图 8 为单侧压比对混凝土动态抗压强度的影响规律。由图 8 可知,在冲击荷载一定时,混凝土的双轴动态抗压强度均大于单轴动态抗压强度。单侧压比从 0 增至 0.4,混凝土的动态抗压强度与其成正相关性,随着单侧压比的增加,其能够不断提高混凝土的动态抗压强度;单侧压比为 0.4 时,混凝土的动态抗压强度出现最大值;单侧压比从 0.4 增至 0.8,混凝土的动态抗压强度与其成负相关性,其开始对混凝土的动态抗压强度表现为弱化作用。说明单侧压比对混凝土强度的影响不是单一的,强化和弱化相互交织,单侧压比较小时,强化效应占主导地位,单侧压比较大时,弱化作用表现明显,最佳单侧压比为 0.4。

采用动态强度增强因子作为冲击荷载作用下混凝土的强度增强指标,表示动态抗压强度与静态抗压强度之比。图 9 为动态强度增强因子与单侧压比之间的关系。由图 9 可见,侧压为 0 时动态强度增强因子为 2.87,此后,随单侧压比的增大,动态强度增强因子先上升后下降;动态强度增强因子在单侧压比为 0.4 时达到最大值 3.87,在单侧压比为 0.2

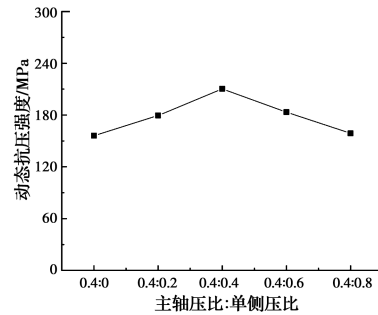


图 8 动态抗压强度与单侧压比之间的关系

Fig. 8 Relationship between dynamic compressive strength and unilateral pressure ratio

和 0.6 时,其分别为 3.96 和 3.49,两者大小相近,而当单侧压比为 0.8 时,动态强度增强因子为 2.92,略高于无侧压状态下的结果。说明不同单侧压比可产生相同的作用效果,也反映出单侧压比对混凝土强度的作用并不是唯一增加的。

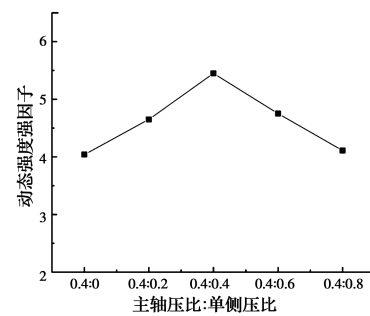


图 9 动态强度增强因子与单侧压比之间的关系

Fig. 9 Relationship between dynamic intensity enhancement factor and unilateral pressure ratio

2.3 变形特性分析

峰值应变即混凝土材料达到峰值应力时所对应的应变,是分析双轴受压状态下混凝土经冲击荷载作用后变形特性的重要参数。平均应变率是指混凝土材料在受力过程中,自身应变随时间变化的平均速率,与加载速率、材料自身特性等因素密切相关,可反映出混凝土的变形能力。

图 10、图 11 分别为 X 方向冲击荷载作用下混凝土峰值应变和平均应变率随单侧压比的变化规律。从图中可以看出,混凝土的峰值应变为 $2.6 \times 10^{-3} \sim 4.6 \times 10^{-3}$,变化幅度较小;随单侧压比的增大,混凝土的峰值应变先减小后增大,单侧压比 0~0.4 为曲线下降段,单侧压比 0.4~0.8 为曲线上升段;单侧压比为 0 和 0.4 时,峰值应变分别达到最小值和最大值。此外,混凝土的平均应变率随单侧压

比增大,同样表现为先减小后增大的趋势,单侧压比为0.4和0.8时,平均应变率分别达到最小值 40.81 s^{-1} 和最大值 63.60 s^{-1} ,与无侧压时相比,分别减小和增大了29%和10%。说明单侧压比对混凝土冲击压缩变形的抑制作用先增加后减小,单侧压比可通过改变混凝土整体结构特征来影响其应变率特性。

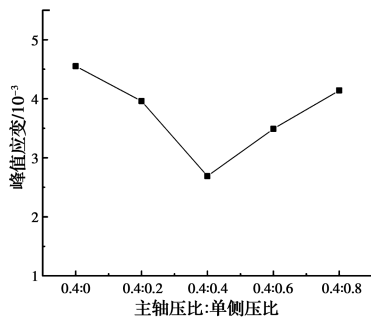


图10 峰值应变与单侧压比之间的关系

Fig. 10 Relationship between peak strain and unilateral pressure ratio

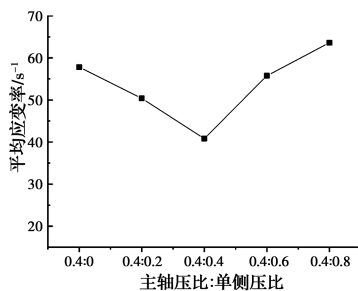


图11 平均应变率与单侧压比之间的关系

Fig. 11 Relationship between average strain rate and unilateral pressure ratio

3 机理分析

混凝土作为一种多相复合材料,其内部存在大量微裂缝和孔洞等初始缺陷,且各组成成分的力学特性差异较大。在外部压力作用下,微裂缝和孔洞通过乱向扩散、产生、聚集以及形成宏观裂缝等形式耗散能量。混凝土还是一种具有应变率相关性和粘性特征的脆性材料,在动态荷载作用下,由于孔隙水的粘性效应和微观惯性效应,使混凝土的各项力学性能变化更加复杂。

3.1 双轴受压对应力-应变曲线的影响

在主轴向预静载作用下,混凝土主轴向已被挤压密实,单侧压比较小时(0~0.4),随着单侧压比的增大,混凝土侧向逐渐密实,导致其内部各组间连

系更加紧密,结构更加坚硬,脆性特征增强,故随单侧压比的增加,应力-应变曲线整体逐渐向左倾斜。而单侧压比较大时(0.4~0.8),由于混凝土各组分性能不同,在相互挤压过程中产生破碎、分解现象,导致混凝土内部出现严重损伤,可塑性增大,故此时应力-应变曲线向右倾斜,但由于双向应力强化、约束作用的存在,使得混凝土脆性材料特征仍大于无侧压作用时。

3.2 双轴受压对强度和变形的影响

混凝土在主轴压作用下处于弹性受力阶段,内部孔隙数量和孔径皆有一定程度减小,整体性能得到增强。在此基础上,单侧压比较小时(0~0.4),其一方面可促使混凝土内部与侧向有夹角的部分裂缝和孔隙闭合,另一方面可抑制外力作用下裂缝的产生、延伸,进一步提高混凝土密实度的同时约束了侧向变形。此外,裂缝和孔隙数量的减少,直接降低了冲击应力波在混凝土内部反射的次数,加速应力波通过试件,既减少了反射拉伸波造成的损伤,增大了混凝土强度,又减小了变形量,间接减弱了混凝土的变形能力。故单侧压比较小时,随单侧压比的增大,混凝土动压强度逐渐增大,峰值应变和平均应变率逐渐减小。

单侧压比较大时(0.4~0.8),混凝土处于塑性受力阶段,此时,侧压一方面会使混凝土基体的部分原始缺陷闭合,另一方面会造成其内部结构严重损伤,且损伤弱化效应大于闭合增益作用。具体表现为主轴向变形被约束时,较大侧压作用下,双向挤压导致骨料间、骨料与水泥浆体间以及水化产物整体框架产生大量裂缝和孔隙,甚至分解破坏,以及混凝土竖向表面发生凸起、破裂现象,致使混凝土内部结构松散,密实度降低,整体性能弱化,但变形能力增加。此外,大量裂缝和孔隙增大了应力波在混凝土内部反射的可能性,波速减缓,导致应力波在试件内部传递时间延长,造成相同加载速率下,混凝土内部损伤加重,变形量增大。故单侧压比较大时,随单侧压比的增大,混凝土的动压强度逐渐减小,峰值应变和平均应变率逐渐增大。但单侧压最大时,相对于无侧压条件,其对混凝土强度和峰值应变的影响依旧表现为强化和抑制作用。这一方面是由于主轴向应力的存在既增强了混凝土的整体性能,又消耗了部分单侧压加载产生的能量,导致混凝土内部缺陷

弱于初始缺陷;另一方面是由于双向应力的存在,既限制了混凝土的变形,又消耗了动载作用产生的部分能量,间接弥补了预静载过大给混凝土整体性能带来的损伤。

4 结论

采用控制变量法,以峰值应力、峰值应变和平均应变率为指标,研究了当动态荷载一定时双轴受压状态对混凝土立方体试件动态抗压强度和冲击压缩变形的影响,主要结论如下:

1) 双轴受压状态下,混凝土承受冲击荷载时呈现典型的脆性破坏,应力-应变曲线初期近似为直线段,压实挤密阶段不明显,接近破坏应力时,曲线表现为非线性。

2) 随着单侧压比的增大,混凝土的动态抗压强度呈现出先升高后降低的趋势,单侧压比为 0.4 时,混凝土的动态抗压强度出现最大值。

3) 随着单侧压比的增大,混凝土的峰值应变和平均应变率皆呈现出先减小后增大的趋势,单侧压比为 0.4 时,混凝土的峰值应变和平均应变率出现最小值。

4) 双轴受压状态增强了混凝土的脆性材料特征,提高了其动态抗压强度和抗变形能力,主轴压比:单侧压比为 0.4:0.4 时提高程度最大。

参考文献:

[1] TOROK R. The 9/11 Commission Report and the reframing of the 'war on terror' as a new type of warfare [J]. *Journal of Policing, Intelligence and Counter Terrorism*, 2011, 6(2): 137-150.

[2] 邸成. 日本广岛原子弹事件[J]. *世界环境*, 2012(4): 7.
DI C. Hiroshima atomic bomb incident in Japan [J]. *World Environment*, 2012(4): 7. (in Chinese)

[3] TAI Y S. Uniaxial compression tests at various loading rates for reactive powder concrete [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2009, 52(1): 14-21.

[4] 王怀亮, 闻伟. 碾压混凝土单轴动态力学性能研究 [J]. *水力发电学报*, 2011, 30(4): 155-160, 167.
WANG H L, WEN W. Dynamic mechanical properties of RCC under uniaxial stress [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30(4): 155-160,

167. (in Chinese)

[5] SUN J S, MA L J, DOU Y M, et al. Effect of strain rate on the compressive mechanical properties of concrete [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 450/451: 244-247.

[6] 吴彬, 彭刚, 周寒清. 双轴受压下混凝土动态力学特性试验研究 [J]. *水电能源科学*, 2013, 31(5): 100-102, 148.
WU B, PENG G, ZHOU H Q. Experimental study on dynamic characteristics of concrete under biaxial compression [J]. *Water Resources and Power*, 2013, 31(5): 100-102, 148. (in Chinese)

[7] 刘鹏. 混凝土动态力学性能试验研究与数值分析 [D]. 辽宁 大连: 大连大学, 2011.
LIU P. Experimental study and numerical analysis of dynamic mechanical properties of concrete [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University, 2011. (in Chinese)

[8] 程卓群, 王乾峰, 王普, 等. 双轴受压混凝土动态力学特性及破坏准则研究 [J]. *水利水运工程学报*, 2019(5): 101-107.
CHENG Z Q, WANG Q F, WANG P, et al. Research on dynamic mechanical characteristics and failure criteria of biaxial compression concrete [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2019(5): 101-107. (in Chinese)

[9] 李志光. 双轴压-压下活性粉末混凝土的实用破坏准则试验研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
LI Z G. Experimental study on practical failure criterion of reactive powder concrete under biaxial compression [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. (in Chinese)

[10] 王四巍, 王忠福, 潘旭威, 等. 多轴应力下塑性混凝土峰值后变形特征 [J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(4): 654-658.
WANG S W, WANG Z F, PAN X W, et al. Post peak deformation characteristics of plastic concrete under multiaxial stress state [J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(4): 654-658. (in Chinese)

[11] 张家兴. 再生混凝土多轴压强度试验及破坏准则研究 [D]. 北京: 北方工业大学, 2015.
ZHANG J X. Strength characteristic and failure criterion of plain recycled aggregate concrete under multi-axial compression states [D]. Beijing: North China University of Technology, 2015. (in Chinese)

[12] 白卫峰, 解伟, 管俊峰, 等. 复杂应力状态下孔隙水压

- 力对混凝土抗压强度的影响 [J]. 建筑材料学报, 2015, 18(1): 24-30, 37.
- BAI W F, XIE W, GUAN J F, et al. Effect of pore water pressure on compressive strength of concrete under complex stress state [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(1): 24-30, 37. (in Chinese)
- [13] 孟顺意. 混凝土双轴动态试验研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2010.
- MENG S Y. Experimental study on concrete under biaxial dynamic stress [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [14] 任政. 混凝土真三轴力学性能试验与本构理论研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
- REN Z. Experimental research on the true triaxial mechanical properties and constitutive theory of concrete [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [15] 李振宝, 崔燕伟, 宋坤, 等. 双向受力下钢筋混凝土框架节点抗剪承载力计算方法[J]. 工程力学, 2019, 36(1): 175-182.
- LI Z B, CUI Y W, SONG K, et al. Shear capacity calculation method of panel zone in reinforced concrete frame under bidirectional loading [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(1): 175-182. (in Chinese)
- [16] 李为民, 许金余. 大直径分离式霍普金森压杆试验中的波形整形技术研究 [J]. 兵工学报, 2009, 30(3): 350-355.
- LI W M, XU J Y. Research on waveform shaping technology in large diameter Split Hopkinson Pressure Bar test [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(3): 350-355. (in Chinese)
- [17] 陈艺顺, 王波, 周健南, 等. 冲击载荷作用下蒸压加气混凝土动态力学性能研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(18): 201-206, 255.
- CHEN Y S, WANG B, ZHOU J N, et al. Dynamic mechanical properties of AACs under impact loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(18): 201-206, 255. (in Chinese)
- [18] 李林涛. 高应变率下不同含水率混凝土力学性能的试验研究[J]. 建筑科学, 2019, 35(11): 78-83.
- LI L T. Experimental study on mechanical properties of concrete with different moisture content under high strain rate [J]. Building Science, 2019, 35(11): 78-83. (in Chinese)
- [19] 李萌. 静动组合荷载下混凝土多轴动态强度研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- LI M. Dynamic multiaxial strength of concrete under static-dynamic coupled loading [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [20] 王杰, 金解放, 袁伟, 等. 基于 SHPB 的岩石动静组合加载试验研究进展[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(5): 75-81.
- WANG J, JIN J F, YUAN W, et al. Experimental research progress of rock under coupled dynamic and static loading based on SHPB [J]. Mining Research and Development, 2019, 39(5): 75-81. (in Chinese)

(编辑 胡玲)