

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.013
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 Zhuoqun, WANG Qianfeng, WANG Pu, et al. Dynamic mechanical properties and failure criteria of concrete under biaxial
compression[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(5): 101-107. (in Chinese))

双轴受压混凝土动态力学特性及破坏准则研究

程卓群,王乾峰,王 普,孙尚鹏,刘苗苗
(三峡大学 土木与建筑学院,湖北 宜昌 443002)

摘要:利用动静力三轴试验机进行不同加载速率、不同侧向压力下 300 mm 立方体混凝土的抗压试验,并对所得试验数据进行力学参数分析,在此基础上,建立考虑动态加载速率的 K-G 破坏准则并对其适用性进行了验证。验证分析结果表明:应变速率越低,侧压对混凝土峰值应力的增益作用越明显;混凝土峰值应变随应变速率增加,大致呈先减后增趋势;峰值应变随侧压的增大而增大,侧压对峰值应变的影响在应变速率较低时更明显;随应变速率的增大,混凝土弹性模量呈先增后减趋势;侧压对混凝土弹性模量的影响不明显;建立的改进后的 K-G 准则对动态双轴受压模型描述效果好,而且该模型同时也适用于 100 和 300 mm 混凝土立方体的单向和双向应力状态。

关 键 词:混凝土;应变速率;力学性能;双轴抗压;破坏准则
中图分类号: TU502 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2019)05-0101-07

混凝土材料在使用过程中并不是单一应力状态且无法避免受到动荷载作用,如高层建筑和桥梁承受的风荷载和地震作用,那么如何评价混凝土结构是否安全,归根结底就是要研究混凝土材料在复杂应力状态下的动态性能与破坏准则。自 Abrams^[1]发现混凝土存在率敏感性以来,国内外学者先后对其进行了大量的试验研究和理论推导,但受限于多轴试验设备的复杂性^[2],关于混凝土双轴动态试验研究还比较少^[3-5]。郑金城等^[6]对混凝土进行了不同应变速率和不同侧应力的双向受压试验,得到了混凝土抗压强度随加载速率增加而增加的结论;吴彬等^[7]对混凝土进行了不同应变速率下双轴动态受压试验,认为双轴应力状态下力学参数比单轴应力状态均有所提高。关于应变速率对混凝土变形特性的影响,从目前研究成果来看,其规律并不明显,吕培印等^[8-9]对边长为 100 mm 的混凝土立方体试件进行了单轴动态试验后得到了峰值应变基本不变的结论;彭刚等^[10-12]通过对混凝土进行不同加载速率($10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$)试验,得到了混凝土弹性模量随加载速率的增大而增大的结论。纵观多年研究还发现,对复杂应力状态下大尺度混凝土动态力学特性的试验研究还不完善,需深入研究。

迄今为止,学者们已经提出了上百种破坏准则模型。有摩尔-库伦准则及其修正后的模型^[13-14],这类破坏准则形式简单,但不能很好地描述复杂应力状态下混凝土的破坏^[2];宋玉普等^[15]提出的多轴应力状态下破坏准则,参数较多,表达式较为繁琐;另外,过镇海等^[16]基于试验数据提出的一种满足拉压子午线和偏平面包络线的破坏准则,模拟效果好,但属于静态准则。总体而言,目前所提出的混凝土破坏准则仅在特定的应用范围内表现良好,对于复杂应力状态下的动态强度准则还需要进一步探究。

因此,本文利用真三轴试验机,对强度为 C30,边长为 300 mm 的混凝土立方体进行不同侧压($0, 0.12f_c, 0.24f_c, 0.36f_c, 0.48f_c, f_c$ 为龄期 60 d 的 300 mm × 300 mm 立方体试件单轴极限抗压强度平均值)和不同应变

收稿日期: 2018-09-23
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51709155, 51579139)
作者简介: 程卓群(1993—),男,湖北荆州人,硕士研究生,主要从事混凝土材料动态特性的研究。
E-mail: 121001332@qq.com 通信作者: 王乾峰(E-mail: ifeng1208@ctgu.edu.cn)

速率($10^{-5}/\text{s}$, $5 \times 10^{-5}/\text{s}$, $10^{-4}/\text{s}$, $5 \times 10^{-4}/\text{s}$, $10^{-3}/\text{s}$)下的动态压缩试验,得到应变速率和侧压对常态混凝土受压力学性能的影响,建立了混凝土动态双轴受压破坏准则,并基于其他学者的试验数据对该破坏准则进行了适用性验证分析。

1 试验概况

1.1 试件制备

试验采用的混凝土试件根据《水工混凝土配合比设计规程》(DL/T 5330—2005)按 C30 强度进行配合比设计,其材料用量为:水 $175.0 \text{ kg}/\text{m}^3$,水泥 $291.0 \text{ kg}/\text{m}^3$,砂 $676.9 \text{ kg}/\text{m}^3$,小石 $502.8 \text{ kg}/\text{m}^3$,中石 $754.3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。其中水泥采用 P·O 42.5 硅酸盐水泥,选用中砂,碎石粒径为 $5 \sim 40 \text{ mm}$,其中小石粒径 $5 \sim 20 \text{ mm}$,中石粒径 $20 \sim 40 \text{ mm}$,小石与中石的比例为 4: 6。试件采用 300 mm 的立方体,由钢模浇筑成型。搅拌时采用二次投料和先干拌后湿拌的方法,待试件浇筑完成,拆模后将试件放入标准养护室养护,90 d 后将混凝土移至室外自然养护。

1.2 试验设备与过程

(1) 试验设备:试验采用三峡大学的 TAZW-10000 型 10 MN 大型多功能液压伺服动静力三轴仪,有关设备详情见文献[10-12]。

(2) 试验过程:① 装样及对中:将试件置于夹具内,放置于试验机下并严格对中;② 变形计安装:安装变形计至试件周边并用仪器检验其传导正常;③ 预加载:利用移动和移动转换指令分别使试件竖向、侧向预加载至 20 kN ;④ 侧向加载:按拟定侧压力,采用负荷控制方式($2\,000 \text{ N}/\text{s}$)加载至拟定大小($0, 0.12f_c, 0.24f_c, 0.36f_c, 0.48f_c$);⑤ 竖向加载:利用移动转换命令中的变形控制方式进行操作,按预定加载速率($10^{-5}/\text{s}, 5 \times 10^{-5}/\text{s}, 10^{-4}/\text{s}, 5 \times 10^{-4}/\text{s}, 10^{-3}/\text{s}$)加载,直至试件破坏;⑥ 试验完成,保存荷载 F 和变形 Δ 的试验数据;⑦ 通过 $\sigma = F/A, \varepsilon = \Delta/l$ 得到应力和应变数据。

试验中,三轴仪控制加载速率为 $0.18 \text{ mm}/\text{min}$ 时对应的应变速率为 $10^{-5}/\text{s}$ 。

2 试验结果与分析

2.1 峰值应力

试验得到混凝土在不同侧压和不同应变速率下的峰值应力见图 1。

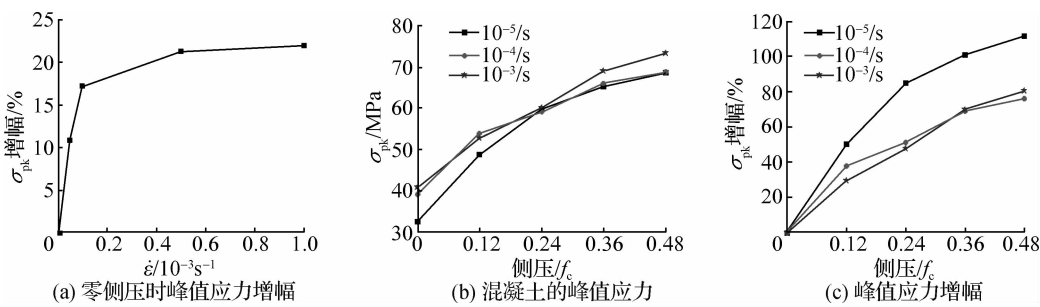


图 1 侧压及应变速率对峰值应力的影响

Fig.1 Peak stress influence curves under lateral pressures and strain rates

由图 1 可见:① 相同侧压下,混凝土峰值应力随应变速率的增大而增大;而相同应变速率加载时混凝土的峰值应力随着侧压的增大而增大。② 当应变速率小于 $10^{-4}/\text{s}$ 时,混凝土的率效应很明显;当应变速率达到 $10^{-4}/\text{s}$ 时,混凝土抗压强度大大增加;当应变速率继续增大时,其对混凝土抗压强度的增益效果一般。

③ 相同应变速率加载时,混凝土峰值应力随侧压的增大而增大,且应变速率越低,侧压对混凝土峰值应力的增益作用越明显。

2.2 峰值应变

试验得到混凝土在不同侧压和不同应变速率下的峰值应变如图 2 所示,可见:① 基于试验数据,得出应变速率在 $10^{-5}/s \sim 10^{-3}/s$ 范围内时,混凝土峰值应变在 $2 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3}$,虽然其变化范围数量级很小,且混凝土存在一定离散性,但仍然存在着先减后增规律。② 应变速率相同时,峰值应变随侧压增大而增大;应变速率较低时,侧压对峰值应变的影响更明显,可见应变速率改变了混凝土对侧压的敏感性。

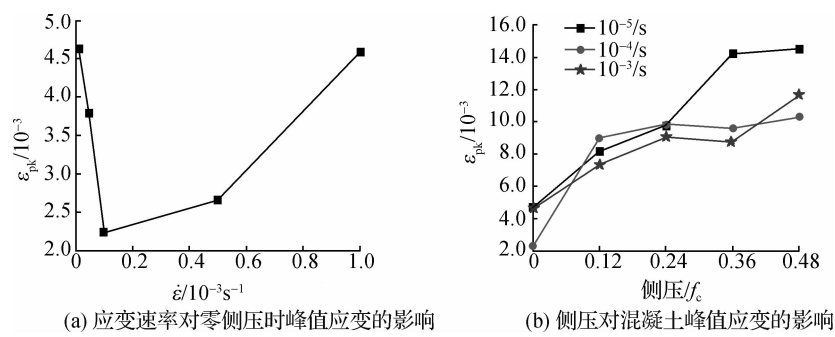


图 2 侧压及应变速率对峰值应变的影响
Fig.2 Peak strain influence curves under lateral pressures and strain rates

2.3 弹性模量分析

弹性模量取峰值应力的 35% ~ 45% 时的应力-应变全曲线割线斜率。试验得到混凝土在不同侧压和不同应变速率下弹性模量如图 3 所示,可见:① 随应变速率增大,混凝土弹性模量呈先增后减趋势。② 由于混凝土材料本身力学特性的离散性较大, $10^{-5}/s \sim 10^{-3}/s$ 的加载速率范围内,侧压对混凝土弹性模量的影响不明显。

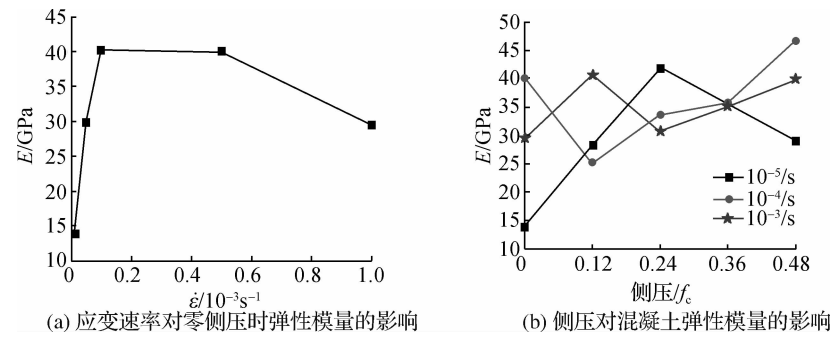


图 3 侧压及应变速率对弹性模量的影响
Fig.3 Influence curves of concrete elastic modulus under lateral pressures and strain rates

3 破坏准则分析

3.1 基于 K-G 准则的动态双轴受压破坏准则分析

作为常用二维结构的 Kupfer-Gerstle^[17] 准则在主应力空间上的破坏准则,经修正后被纳入欧洲模式规范^[18];考虑应变速率对混凝土力学性能的影响,建立基于 K-G 准则的动态双轴受压破坏准则。对于混凝土双轴受压破坏准则,假定动态加载时曲线仍与静态加载时的曲线相似,那么 K-G 准则中的 f_c 则需替换为某个应变速率下混凝土的动态单轴抗压强度 $f_{c,d}$,即:

$$\sigma_3/f_{c,d} = [a + b(\sigma_2/f_{c,d})]/(1 + \sigma_2/f_{c,d})^2 \tag{1}$$

式中： σ_3 为抗压强度； σ_2 为侧压强度； a 和 b 为试验拟合参数。 $f_{c,d}$ 的确定基于本文不同应变速率单轴峰值应力数据，结合吕培印等^[8-9]研究的线性表达式(2)与欧洲规范^[18]中的非线性关系式(3)进行拟合。

$$f_{c,d}/f_c = \alpha + \beta \ln(\dot{\epsilon}_0/\epsilon_0)$$

(2)

$$f_{c,d}/f_c = \begin{cases} (\dot{\epsilon}_0/\epsilon_0)^{1.026\alpha}, & \dot{\epsilon} \leq 30/s \\ \beta \dot{\epsilon}^{1/3}, & \dot{\epsilon} > 30/s \end{cases}$$

(3)

式中： $f_{c,d}$ 为混凝土动态抗压强度； $\dot{\epsilon}$ 为动态应变速率； $\dot{\epsilon}_0$ 为静态应变速率，以 $10^{-5}/s$ 为静态应变速率； α, β 为反映应变速率影响的参数，可通过拟合得到。

吕培印等^[8-9]的研究中，取 $\alpha=1.025, \beta=0.109\ 2, R^2=0.918\ 2$ ，欧洲规范中取 $\alpha=0.047\ 63, R^2=0.859\ 8$ 。可以看出，吕培印等研究的线性表达式对本文数据拟合准确度更高，故选式(2)构建双轴动态破坏准则。其 $f_{c,d}$ 的表达式为 $f_{c,d} = (1.025 + 0.047\ 43 \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0))f_c$ ，其中 $f_c=33.33\ \text{MPa}$ 。

采用已构建的双轴动态破坏准则对 $10^{-5}/s, 10^{-4}/s, 10^{-3}/s$ 应变速率下的双轴压缩试验数据进行拟合，所得参数如表1所示，参数 a 受应变速率的影响很小，仅在1上下波动，且变化幅度小于5%，不妨假设 $a=1$ ；而参数 b 变化较大，遂将式(1)变为式(4)；由表1可以看出参数 b 的取值随着应变速率的增大而减小，近似地可以采用式(5)。式(5)通过表1的数据拟合分析，得到 $b_1=5.509, b_2=-0.257\ 3$ ，则最终的改进 K-G 准则表达式如式(6)所示。

表 1 混凝土动态双轴压破坏准则参数

Tab. 1 Failure criterion parameters of concrete under dynamic biaxial compression

应变速率/ s^{-1}	a	b	R^2
10^{-5}	1.012	7.376/7.064	0.999/0.997
10^{-4}	1.041	6.220/6.366	0.992/0.986
10^{-3}	0.951	6.175/5.986	0.985/0.977

注：参数 b 和 R^2 项中“/”前数值为式(1)拟合值，后为式(4)拟合值。

$$\sigma_3/f_{c,d} = [1 + b(\sigma_2/f_{c,d})]/(1 + \sigma_2/f_{c,d})^2$$

(4)

$$b = b_1 + \exp(b_2 \ln \dot{\epsilon})$$

(5)

$$\sigma_3/f_{c,d} = \left[1 + (b_1 + \exp(b_2 \ln \dot{\epsilon})) \frac{\sigma_2}{f_{c,d}} \right] / (1 + \sigma_2/f_{c,d})^2$$

(6)

基于式(4)和(6)，模型分别对 $10^{-5}/s, 10^{-4}/s, 10^{-3}/s$ 应变速率下的双轴压缩试验数据进行拟合(见图4)。由图4可见：①应变速率大的曲线位于应变速率较小的曲线上方，充分说明了混凝土的率效应，并且应变速率越高，率效应越明显。②基于改进后的 K-G 准则所画曲线，通过计算，应变速率 $10^{-5}/s, 10^{-4}/s, 10^{-3}/s$ 时的样本点与破坏准则曲线之间的平均误差分别为1.21%，1.99%，2.69%，可见基于改进后 K-G 准则建立的动态双轴受压模型能较好地应用于本文。

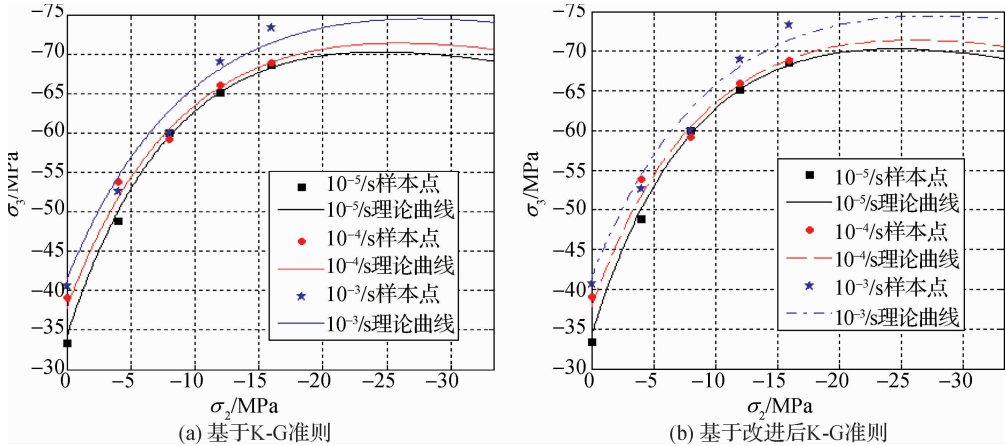


图 4 两种 K-G 准则的动态双轴混凝土受压模型与样本点对比

Fig. 4 Comparison between curves given by dynamic biaxial compression model and sample points based on two K-G criteria

3.2 改进 K-G 模型验证

引用文献[19]中边长为 100 mm 的普通混凝土立方体试件进行不同应变速率和不同侧压的试验分析,所得数据见表 2。

根据侧压试验数据拟合得到单轴强度准则为: $f_{c,d}/f_c = 0.997\,4 + 0.083\,23\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)$,可决系数为 0.997 5。采用改进后的 K-G 破坏准则模型对不同加载速率下的数据进行拟合得到参数及可决系数见表 3。

表 2 文献[19]双轴受压试验数据
Tab.2 Biaxial compression test data from literature [19]

应变速率/ s ⁻¹	不同侧压下的峰值抗压强度/MPa			
	0 MPa	3 MPa	6 MPa	9 MPa
10 ⁻⁵	9.84	14.63	15.44	16.14
10 ⁻⁴	10.63	15.48	16.07	16.53
10 ⁻³	11.38	16.14	17.01	17.22
10 ⁻²	12.32	16.86	17.42	17.83

表 3 基于改进 K-G 模型对应文献[19]数据的参数
Tab.3 Parameters of corresponding literature [19] data based on improved K-G model

应变速率/s ⁻¹	<i>b</i>	<i>R</i> ²
10 ⁻⁵	5.234	0.970 1
10 ⁻⁴	4.941	0.987 1
10 ⁻³	4.757	0.995 9
10 ⁻²	4.521	0.989 8

从表 3 可见,采用改进 K-G 模型与试验数据的吻合度极高,并且参数 *b* 与加载速率之间的关系为: $b = 4.012 + \exp(-0.119\,1\ln\dot{\varepsilon})$,两者之间的可决系数为 0.991 8;修正所有参数后,得到基于文献[17]试验数据并考虑加载速率的双轴受压破坏准则为:

$$\frac{\sigma_3}{f_c} = \frac{0.997\,4 + 0.083\,23\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0) + (4.012 + \exp(-0.119\,1\ln\dot{\varepsilon}))\sigma_2/f_c}{\left(1 + \frac{\sigma_2}{f_c(0.997\,4 + 0.083\,23\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0))}\right)^2}$$

(7)

采用式(7)绘制的模型曲线与试验样本点间的对比如图 5 所示。由图 5 可得:10⁻⁵/s,10⁻⁴/s,10⁻³/s 和 10⁻²/s 时理论曲线的平均误差分别为 2.37%,1.19%,0.98%和 1.05%,改进 K-G 模型能准确估算不同加载速率和侧压下的混凝土极限强度。

4 结 语

- (1) 本次研究主要针对地震作用引起的混凝土材料响应,选择 10⁻⁵/s ~ 10⁻³/s 的加载速率进行试验,其研究更具真实性,并且 300 mm 立方体混凝土能对目前主流 150 mm 标准试件动态力学特性的研究成果进行补充。
- (2) 应变速率越大,峰值应力也越大,并且当应变速率小于 10⁻⁴/s 时,混凝土的率效应很明显,应变速率继续增大,其对混凝土峰值应力的增益作用逐渐减弱。混凝土峰值应变随应变速率的增大呈先减后增趋势。弹性模量随应变速率的增大呈先增后减趋势。
- (3) 侧压应力对混凝土峰值应力和峰值应变的影响显著,对弹性模量无明显影响。
- (4) 基于 K-G 破坏准则,考虑动态特性,确定了一种改进的 K-G 破坏准则,该准则具有较强的适用性。

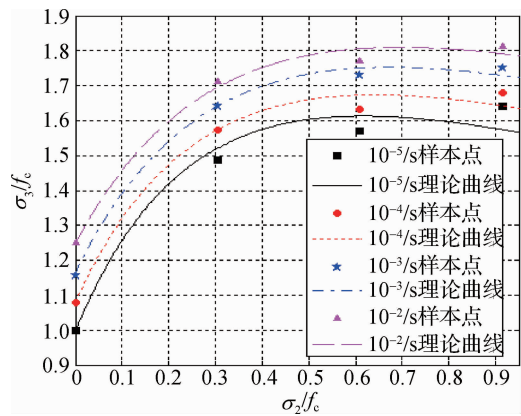


图 5 基于改进后 K-G 准则的动态双轴受压模型与文献[19]样本点对比

Fig.5 Comparison between curves given by dynamic biaxial compression model and literature[19] sample points based on improved K-G criterion

参 考 文 献:

- [1] ABRAMS D A. Effect of rate of application of load on the compressive strength of concrete[J]. ASTM J, 1917, 17(34): 364-377.
- [2] 孟顺意. 混凝土双轴动态试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010. (MENG Shunyi. Double axial dynamic test of concrete [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [3] MATSTEIN D. Effect of straining rate on the compressive strength and elastic properties of concrete[J]. ACI J, 1953, 49(4): 729-744.
- [4] 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.
- [5] TEDESCO J W, POWELL J C, ROSS C A, et al. A strain-rate-dependent concrete material model for ADINA[J]. Computer and Structures, 1997, 64(5/6): 1053-1067.
- [6] 郑金城, 徐超, 彭刚, 等. 预静态加载后的混凝土动态受压特性试验[J]. 实验力学, 2013, 28(3): 352-359. (ZHENG Jincheng, XU Chao, PENG Gang, et al. Experimental study on dynamic compressive behaviors of concrete due to monotonic loading history[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(3): 352-359. (in Chinese))
- [7] 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 Bin, PENG Gang, ZHOU Hanqing. Experimental study on dynamic mechanical properties of concrete under biaxial compression [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(5): 100-102, 148. (in Chinese))
- [8] 吕培印, 宋玉普. 混凝土动态压缩试验及其本构模型[J]. 海洋工程, 2002, 20(2): 43-48. (LÜ Peiyin, SONG Yupu. Dynamic compression test of concrete and its constitutive model[J]. The Ocean Engineering, 2002, 20(2): 43-48. (in Chinese))
- [9] 闫东明, 林皋. 混凝土单轴动态压缩特性试验研究[J]. 水科学与工程学报, 2005(6): 8-10. (YAN Dongming, LIN Gao. Experimental study on uniaxial dynamic compression properties of concrete[J]. Water Science and Engineering Technology, 2005(6): 8-10. (in Chinese))
- [10] 彭刚, 王乾峰, 梁春华. 有压孔隙水环境中的混凝土动态抗压性能研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(1): 11-18. (PENG Gang, WANG Qianfeng, LIANG Chunhua. Study on dynamic compressive properties of concrete under pore water pressure environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(1): 11-18. (in Chinese))
- [11] 肖洋, 彭刚, 王乾峰, 等. 考虑率效应的混凝土压剪强度及破坏准则试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(4): 46-53. (XIAO Yang, PENG Gang, WANG Qianfeng, et al. Experimental studies on compressive shear strength and failure criterion of concrete considering rate effect [J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(4): 46-53. (in Chinese))
- [12] 肖洋, 彭刚, 黄超, 等. 压剪共同作用下混凝土的损伤演化研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(2): 112-119. (XIAO Yang, PENG Gang, HUANG Chao, et al. Damage evolution study of concrete under joint action of compression and shear [J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(2): 112-119. (in Chinese))
- [13] 王哲. 混凝土含损伤的摩尔-库伦强度模型试验研究[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(4): 84-88. (WANG Zhe. Experimental study on Mohr-Coulomb model with damage for concrete[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(4): 84-88. (in Chinese))
- [14] 高金良, 梅甫良. 基于莫尔强度理论的钢管混凝土轴心受压短柱承载力计算[J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33(5): 126-129. (GAO Jinliang, MEI Fuliang. Strength calculation of concrete filled steel tubular short columns under axial compression based on Mohr's strength theory[J]. Sichuan Building Science, 2007, 33(5): 126-129. (in Chinese))
- [15] 宋玉普, 赵国藩, 彭放, 等. 多轴应力下多种混凝土材料的通用破坏准则[J]. 土木工程学报, 1996, 29(1): 25-32. (SONG Yupu, ZHAO Guofan, PENG Fang, et al. General failure criteria for different concrete materials under multiaxial stresses[J]. China Civil Engineering Journal, 1996, 29(1): 25-32. (in Chinese))
- [16] 过镇海, 王传志. 多轴应力下混凝土的强度和破坏准则研究[J]. 土木工程学报, 1991, 24(3): 1-14. (GUO Zhenhai,

WANG Chuanzhi. Investigation of strength and failure criterion of concrete under multi-axial stresses [J]. China Civil Engineering Journal, 1991, 24(3): 1-14. (in Chinese))

[17] KUPFER H, GERSTLE K H. Behavior of concrete under biaxial stresses [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1973, 99(4): 853-866.

[18] Comite Euro-International du Beton. Bulletin d'information NO. 213/214, CEB-FIP model code 1990: Concrete structures[S]. Lausanne, Switzerland: Comite Euro-International du Beton, 1993.

[19] 闫东明, 林皋, 刘钧玉, 等. 定侧压下混凝土的双轴动态抗压强度及破坏模式[J]. 水利学报, 2006, 37(2): 200-204. (YAN Dongming, LIN Gao, LIU Junyu, et al. Dynamic biaxial compressive strength and fracture pattern of concrete with constant confining pressure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(2): 200-204. (in Chinese))

**Dynamic mechanical properties and failure criteria of
concrete under biaxial compression**

CHENG Zhuoqun, WANG Qianfeng, WANG Pu, SUN Shangpeng, LIU Miaomiao
(College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The compression tests of 300 mm concrete cubic specimen under different lateral pressures and different loading rates are carried out by using a dynamic and static triaxial test machine, and the mechanical parameters of the test data are analyzed. On this basis, the K- G failure criterion considering the dynamic loading rate is established and its applicability is verified. The results of validation analysis show that the lower the strain rate is, the more obvious the effect of lateral pressure on the peak stress of concrete is; the peak strain of concrete decreases first and then increases with the increase of the strain rate; the peak strain of concrete increases with the increase of the lateral pressure, and the effect of the lateral pressure on the peak strain is more significant when the strain rate is low; the elastic modulus of concrete increases first and then decreases with the increase of strain rate; and the influences of the lateral pressure on the elastic modulus of concrete is not significant. The improved K-G criterion is more effective in describing the dynamic biaxial compression model, and the model can also be used to verify and analyze the uniaxial and biaxial stress states of 100 mm and 300 mm concrete cubic specimens.

Key words: concrete; strain rate; mechanical properties; biaxial compressive strength; failure criteria